

Метод измерения профиля поверхности мехатронным профилографом с параллельным управлением приводами датчиков

Сергей Анатольевич Васильев^{1✉}, Алена Анатольевна Федорова², Виктор Васильевич Алексеев³

^{1, 2, 3} Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

¹vsa_21@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0003-3346-7347>

²e_a@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0257-9197>

³av77@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2780-1727>

Аннотация. Рассмотрены задачи повышения манёвренности и быстродействия мехатронного профилографа, а также расширения диапазона измерения профилей различных поверхностей. Для решения этих задач предложен метод измерения профиля поверхности мехатронным профилографом с параллельным управлением приводами датчиков по заданной траектории. Описана система управления мехатронным профилографом с распределённым управлением исполнительными приводами, эффективно реализующая программные движения исполнительного органа (лазерного датчика) профилографа. Применение данной системы управления позволяет повысить точность, чувствительность, быстродействие и надёжность мехатронного профилографа при эксплуатации, а также сократить время измерений и калибровки при одновременном существенном повышении точности результатов измерений. Разработана информационно-измерительная система мехатронного профилографа. Предложено программное обеспечение для управления электроприводами мехатронного профилографа. Установлены и при поверке подтверждены метрологические характеристики мехатронного профилографа: диапазон измерения расстояния от датчика до поверхности 100–500 мм; пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений $\pm 0,05$ % диапазона; диапазон измерения по окружности 0–360°; пределы допускаемой погрешности углового энкодера $\pm 30''$. В графическом виде представлены результаты измерения профиля поверхности гофрированного листа с прогибом в поперечном сечении вниз в полярных координатах и найден прогиб ($13,8 \pm 0,05$) мм. Результаты исследований будут полезны для различных отраслей народного хозяйства – машиностроения, сельского хозяйства, строительства и др.

Ключевые слова: метод измерения, профиль, мехатронный профилограф, система управления, программное движение, лазерный датчик, угловой энкодер

Финансирование: работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МД-1198.2020.8, соглашение № 075-15-2020-228.

Для цитирования: Васильев С. А., Федорова А. А., Алексеев В. В. Метод измерения профиля поверхности мехатронным профилографом с параллельным управлением приводами датчиков // Измерительная техника. 2021. № 12. С. 22–28. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-22-28>

Method of measuring the surface profile by a mechatronic profiler with parallel control of sensor drives

Sergey A. Vasiliev^{1✉}, Alena A. Fedorova², Viktor V. Alekseev³

^{1, 2, 3} I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

¹vsa_21@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0003-3346-7347>

²e_a@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0257-9197>

³av77@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2780-1727>

Abstract. The problems of increasing the maneuverability and speed of a mechatronic profiler, as well as expanding the range of measurement of profiles of various surfaces, are considered. To solve these problems, a method of measuring the surface profile by a mechatronic profiler with parallel control of sensor drives along a given trajectory is proposed. The control system of a mechatronic profiler with distributed control of actuators is described, which effectively implements the program movements of the executive body (laser sensor) of the profiler. The use of this control system makes it possible to increase the accuracy, sensitivity, speed and reliability of the mechatronic profiler during operation, as well as to reduce the measurement and calibration time while significantly improving the accuracy of measurement results. An information and measuring system of a mechatronic profiler has been developed. Software for controlling the electric drives of a mechatronic profiler is proposed. The metrological characteristics of the mechatronic profiler were established and confirmed during verification: the measuring range of the distance from the sensor

to the surface is 100–500 mm; the limits of the permissible absolute measurement error $\pm 0.05\%$ of the range; the measuring range along the circumference is 0–360°; the limits of the permissible error of the angular encoder $\pm 30''$. Graphically, the results of measuring the profile of the surface of a corrugated sheet with a deflection in the cross section downwards in polar coordinates are presented and a deflection (13.8 ± 0.05) mm is found. The results of the research will be useful for various sectors of the national economy – mechanical engineering, agriculture, construction, etc.

Keywords: measurement method, profile, mechatronic profiler, control system, program motion, laser sensor, angle encoder

Введение. В связи с развитием цифровых технологий в различных практических областях возникает необходимость количественного определения морфологических характеристик разных поверхностей. Для измерений этих характеристик применяют разнообразные методы измерений: контактные (например, профилометрические [1]) и бесконтактные (например, реализуемые с помощью лазерной измерительной техники и математических методов обработки информации [2–5]). Ряд технологических параметров формы поверхности, к которым относят микрорельеф, волнистость и шероховатость, являются ключевыми для различных отраслей экономики – машиностроения (для определения морфологических характеристик металлических листов [6]), точного земледелия (для измерений микрорельефа, гребнистости и глыбистости почвы [7–8]). В экспериментальных исследованиях [9–11] широко используется известная конструкция профилографа С. А. Васильева, определяющая профиль почвенного покрова по окружности или по спирали.

Структура известных автоматизированных профилографов имеет вид кинематических пар последовательно связанных звеньев [12, 13]. Профилографы с последовательной структурой, несмотря на определённые достоинства, не позволяют реализовывать сложные (а не только по заданной траектории) движения рабочей точки. Механизм параллельной структуры [14, 15] достаточно широко реализован в виде исполнительного органа приборов и средств измерений в приборостроительной и машиностроительной промышленности, в агропромышленном комплексе и других отраслях народного хозяйства. Отличительным преимуществом параллельной структуры является низкая инерционность при относительно высоких быстроходности и жёсткости конструкции. Связанные выходные исполнительное и входное звенья мехатронного профилографа представляют собой определённую цепь кинематики, причём отмеченные преимущества достигаются только за счёт уменьшения кинематических связей в конструкции прибора [16]. Перспективность спирального подхода как быстрого способа сбора данных в топографии поверхности подтверждается научными исследованиями [17–21]. Таким образом, актуально и эффективно использование новых механизмов распределённой структуры в мехатронных профилографах, сочетающих

преимущества параллельной и последовательной структур, обладающих повышенными манёвренностью, быстродействием и измеряющих профили различных поверхностей.

Цель исследования – разработка метода измерения профиля поверхности мехатронным профилографом с параллельным управлением приводами датчиков. Для реализации поставленной цели формулируется метрологическая задача разработать метод и средство измерений и контроля профиля поверхности с подтверждением аналитических положений экспериментальными результатами.

Устройство и принцип работы мехатронного профилографа. Авторами [22] предложена параллельно-последовательная структура мехатронного профилографа и разработана система управления. Измерительные операции оператор реализует удалённо на ноутбуке, используя основную систему управления. Функции управления по нижнему уровню размещены в центральном контроллере профилографа.

При проектировании системы управления мехатронного профилографа требовалось исследовать созданный блок управления исполнительными механизмами – электроприводами измерительных датчиков. Кроме того, для точного определения горизонтальной поверхности, по которой перемещается лазерный датчик, мехатронный профилограф дополнен акселерометром и гироскопом. Согласованная работа этих датчиков позволяет блоку управления получать необходимую информацию и учитывать погрешности горизонта в процессе измерения. Для использования в области точного

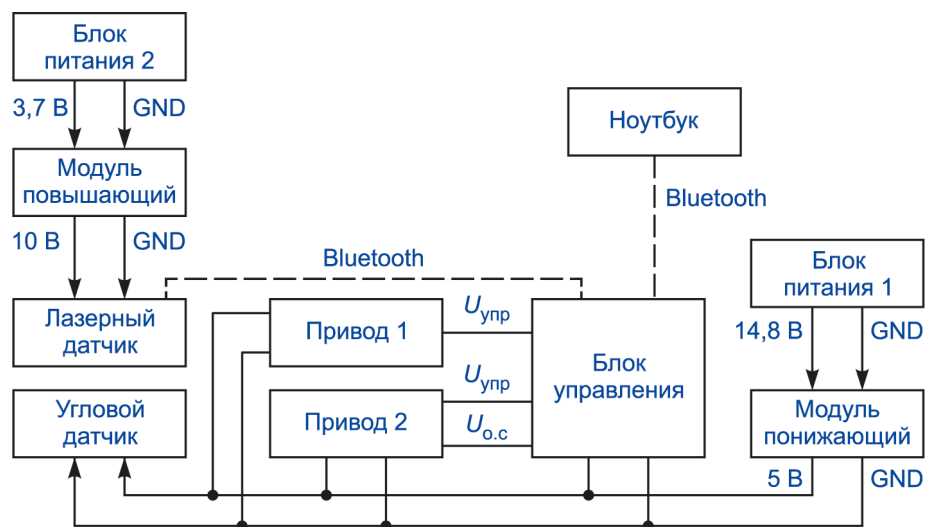


Рис. 1. Структурная схема распределенной системы управления приводами профилографа

Fig. 1. Block diagram of a distributed control system for profiler drives

землепользования и установления координат геопозиции мехатронный профилограф оснащается GPS-приёмником, а для ориентирования на местности – компасом, обеспечивающим возможность использования системы при управлении различными средствами контроля в реальном времени.

На рис. 1 приведена параллельная структура системы управления мехатронным профилографом, построенная на типовых модулях управления мехатронного устройства с двумя степенями свободы и отдельными электроприводами. Параллельная структура системы управления позволяет направлять датчик расстояния по заданной траектории измерений с помощью нескольких электроприводов одновременно. На рис. 1 указаны следующие параметры: $U_{\text{упр}} = 0 \dots 14,8 \text{ В}$, $U_{\text{о.с}} = 0 \dots 5 \text{ В}$ – импульсно изменяющиеся управляемое напряжение и напряжение обратной связи соответственно; GND – мнемоническое обозначение цифрового заземления.

Мехатронный профилограф (рис. 2) состоит из следующих элементов: основания 1; стойки 2, на которой с помощью подшипников качения установлены угловой датчик (энкодер) 5 и корпус 3 с размещёнными в нём блоками управления 6 и питания 7; неподвижное опорное колесо, взаимодействующий с ним сателлит (на рис. 2 не показаны); ноутбук 12, оснащённый информационной системой измерения и компьютерным управлением для согласованной работы электродвигателей 4 в процессе измерения, а также

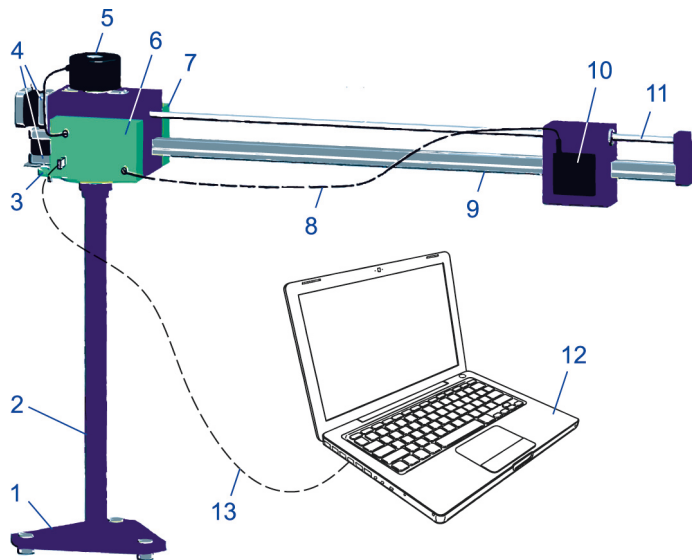


Рис. 2. Мехатронный профилограф с параллельно-последовательной структурой:

1 – основание; 2 – стойка; 3 – корпус; 4 – электродвигатели; 5 – угловой датчик (энкодер); 6, 7 – блоки управления и питания соответственно; 8, 13 – беспроводные Bluetooth-соединения блока управления с ноутбуком и лазерным датчиком положения соответственно; 9 – направляющая; 10 – лазерный датчик положения; 11 – каретка; 12 – ноутбук

Fig. 2. Mechatronic profiler with parallel-sequential structure:
1 – base; 2 – rack; 3 – housing; 4 – electric motors; 5 – angle sensor (encoder); 6, 7 – control and power units, respectively; 8, 13 – wireless Bluetooth connections of the control unit with a laptop and a laser position sensor, respectively; 9 – guide; 10 – laser position sensor; 11 – carriage; 12 – laptop

программой приёма и обработки показателей датчиков и приборов; направляющей 9, лазерного датчика положения 10, каретки 11 и электродвигателей. Для привода вращения корпуса используется неподвижное опорное колесо, сателлит и двигатель, расположенный на подвижном корпусе. Ноутбук связывается с блоком управления, датчиками и электродвигателями через Bluetooth-соединение 8 при помощи встроенных Bluetooth-радиомодулей. Принципиальной особенностью системы управления является применение Bluetooth-связи для передачи информации между системой управления, лазерным датчиком, ноутбуком и угловым энкодером (соединения 8, 13), в том числе для предотвращения наматывания электропроводов при значительном количестве оборотов датчика профилографа.

Использование ноутбука в качестве главного блока обработки измеренных данных позволяет автоматически выполнять ряд наиболее ресурсоёмких задач, в том числе управление профилографом. В перспективе возможно полностью автоматизировать работу мехатронного профилографа.

Блок управления приводами профилографа. Блок выполнен на основе 32-разрядной микросхемы управления STM32F103 (ST Microelectronics, Швейцария). В блок управления входят драйверы VN3SP30, TMC2209 (ST Microelectronics, Швейцария) соответственно коллекторного и шагового двигателей, набор различных микросхем, преобразователь интерфейса RS-42S и набор соединителей, используемых при стандартных цифровых и аналоговых интерфейсах. В блоке управления с помощью разработанной программы запрограммированы основные методы для обработки полученных данных измерительных датчиков. Реализованы алгоритмы для управления электроприводами, включая следующие элементы: пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор управления коллекторным двигателем; устройство для обработки и расчёта данных энкодера углового положения; устройство для формирования сигналов управления по заданной траектории перемещения каретки исполнительного звена; генератор широтно-импульсно-модулированных сигналов.

В блоке управления элементы системы управления выстроены в следующей последовательности: лазерный датчик расстояния РФ-605 (Riftek, Республика Беларусь) по интерфейсу RS-485 → драйвер электродвигателей и драйвер энкодера → GPIO линии контроллера. С помощью Bluetooth-модуля HC-06 осуществляется связь с головным контроллером. К порту UART микроконтроллера STM32F103 подключается модуль HC-06. Ответная часть с ведомым Bluetooth подключается через преобразователь USB-UART в свободный USB-порт ноутбука.

Программное обеспечение. Для управления электроприводами мехатронного профилографа разработано двухуровневое программное обеспечение. Верхний уровень функционирует на удалённом ноутбуке и обеспечивает реализацию ряда операций при расчёте морфологических параметров и показателей по данным различных датчиков, осуществляет алгоритмы управления электроприводами с учётом заданных режимов измерений. Нижний уровень регулирует работу

блока управления на микроконтроллере бортовой системы для управления исполнительными механизмами мехатронного профилографа. Оператор задаёт алгоритм измерения профиля поверхности профилографу на удалённом ноутбуке, а встроенная бортовая система управляет измерительными операциями с помощью исполнительных механизмов.

Необходимую операцию измерения оператор выбирает на ноутбуке или задаёт с помощью программного обеспечения системы управления профилографа. Оператор, например, задаёт параметры траектории движения лазерного датчика профилографа; программирует графический интерфейс; формирует команды для управления лазерным датчиком профилографа по заданным законам перемещения; получает и передает информацию по Bluetooth-соединению.

В интерфейсных окнах отображаются задаваемые параметры и формируются команды управления для элементов нижнего уровня. Измеренные данные, включающие данные перемещения рабочей точки по осям x , y и расстояния в этих координатах, экспортируются в табличный файл, а также используются для построения 2D- и 3D-графиков.

Основные метрологические характеристики профилографа

Диапазон измерения расстояния от датчика до поверхности	100–500 мм
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений (от диапазона)	$\pm 0,05$ %
Диапазон измерения по окружности	0–360°
Пределы допускаемой погрешности углового энкодера	$\pm 30''$

Эксперимент и результаты. Экспериментальное исследование мехатронного профилографа для спирального сканирования проведено в учебной лаборатории машиностроительного факультета Чувашского государственного университета им. И. Н. Ульянова. Цель исследования – измерение геометрических характеристик поверхности гофрированного листа. Мехатронный профилограф имеет два исполнительных механизма, задействующих два датчика измерения (см. рис. 2). На рис. 3 показан пример схемы профилирования по спирали Ферма. Разработанная информационно-измерительная система профилографа представляет собой совокупность технических средств, объединённых функционально: измерительных (датчики); контрольных (контроль и сравнение с моделями различных профилей); управляющих (ноутбук, двигатели); вычислительных, регистрирующих, отображающих, телекоммуникационных (ноутбук) и других вспомогательных средств. С помощью этой системы извлекается, преобразуется, обрабатывается и передаётся по назначению измерительная информация, которая представляет собой полученные значения расстояния между лазерным датчиком и поверхностью измерения и угла поворота лазерного датчика от нулевой отметки в полярной системе координат. Причём расстояние от заданной точки до начала координат (значение радиус-вектора ρ) соответствует расстоянию между лазерным датчиком и поверхностью

измерения, а угол γ между радиус-вектором и положительной полуосью – измеренному энкодером углу поворота лазерного датчика от нулевой отметки.

Полученную информацию представляют в виде полярного уравнения спирали для спирали Ферма, заложенном в информационную систему измерения:

$$\rho = \sqrt{a^2 \gamma}, \quad (1)$$

где a – коэффициент спирали; γ – угол положения радиус-вектора, отсчитываемый от нулевой отметки.

В декартовой системе координат спираль Ферма описывается системой уравнений

$$\begin{cases} x = \rho \cos \gamma; \\ y = \rho \sin \gamma; \\ z = z, \end{cases} \quad (2)$$

где x , y , z – продольная, поперечная и вертикальная (высота неровностей поверхности измерения в заданной точке) координаты соответственно.

Высота неровностей поверхности в заданной точке определяется как

$$z = z_{\max} - z', \quad (3)$$

где $z_{\max}$ – максимальное расстояние между датчиком положения и измеряемой поверхностью; z' – действительное расстояние между датчиком положения и измеряемой поверхностью.

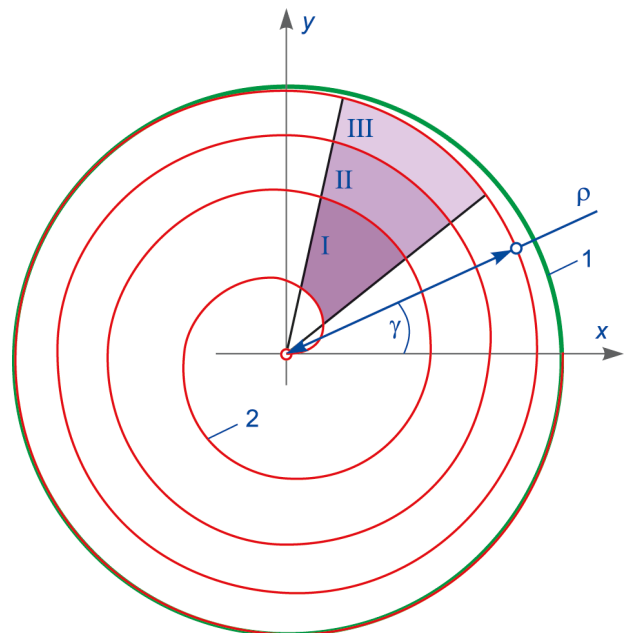


Рис. 3. Схема профилирования измеряемой поверхности по окружности (1) и спирали Ферма (2); цветом показаны равные площади исследуемых участков I, II, III

Fig. 3. The profiling scheme of the measured surface along the circumference (1) and the Fermat spiral (2); equal areas of the studied sections I, II, III are shown in color

Профиль поверхности измеряли мехатронным профилографом с параллельным управлением приводами датчиков при профилировании по спирали Ферма. Датчики работали при заданных температурах или определённом загрязнении. Лазерный датчик основан на принципе оптической триангуляции (максимальная частота обновления данных 2 кГц, разрешение 0,01 % диапазона). Характер работы лазерного датчика перемещения определяют его конфигурационные параметры, которые изменяются только по командам через последовательный порт RS-232 или RS-485. В угловом энкодере фиксируется цикл прохождения магнитного полюса вращающегося магнита, расположенного вблизи чувствительного элемента.

Технические характеристики углового энкодера серии E60H

Напряжение сети	5 В DC или 12–24 В DC
Потребляемый ток	не более 80 мА
Количество импульсов на один оборот	1024–8192
Диапазон рабочих температур	–10...+70 °C
Частота ответа	не более 300 кГц

При проверке мехатронного профилографа проводили внешний осмотр и опробование, подтверждали эффективность работы ПО и определяли метрологические характеристики.

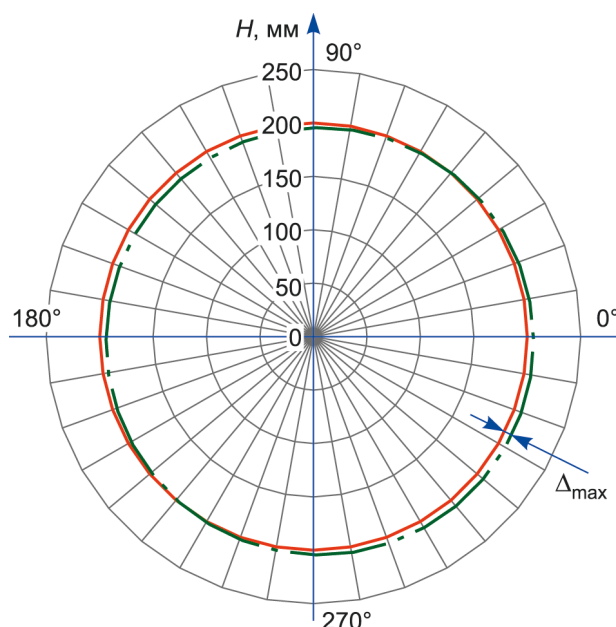


Рис. 4. Определение отклонения данных при проверке профилографа на поверочной плите (радиус сканирования 0,75 м, расстояние от датчика до плиты $H = 200$ мм, максимальное отклонение от плоскостности $\Delta_{\max} = \pm 1$ мм – в пределах 1 %): красная и зелёная окружности – соответственно теоретические и фактические (экспериментальные) значения

Fig. 4. Determination of the deviation of the data when checking the profiler on the calibration plate (scanning radius 0.75 m, distance from the sensor to the plate $H = 200$ mm, maximum deviation from flatness $\Delta_{\max} = \pm 1$ mm – within 1 %): red circle – the results of theoretical values; green circle – the results of actual (experimental) values

Профилограф опробовали с помощью поверочной плиты: устанавливали на плиту, задавали радиус сканирования, регистрировали и статистически обрабатывали данные профиля по окружности. Определённая при проверке погрешность профилографа в виде максимального отклонения от плоскостности для заданных условий составила ± 1 мм, т. е. в пределах 0,05 % (рис. 4).

Основные требования к внешним условиям разработанной информационно-измерительной системы	
Температура окружающей среды	–10...+60 °C
Класс защиты	IP67
Уровень вибраций	10–1000 Гц
Ударные нагрузки	30g/6 мс
Освещённость	7000 лк
Относительная влажность	35–85 %

Профилограф нельзя использовать вблизи мощных источников света. В областях падения излучения на объект и отражения от него не должны находиться посторонние. При контроле объектов сложной формы и текстуры необходимо минимизировать попадание зеркальной составляющей отражённого излучения во входное окно датчика.

Для определения формы и положения поверхностей авторы настоящей статьи разработали методику, состоящую из двух этапов. На первом этапе для калибровки выбирали образцы различных простых форм с заведомо известными характеристиками поверхности, а также образцы с пренебрежимо малыми искажениями формы, на втором этапе – выполняли многократное сканирование известной поверхности с последующей обработкой данных методом

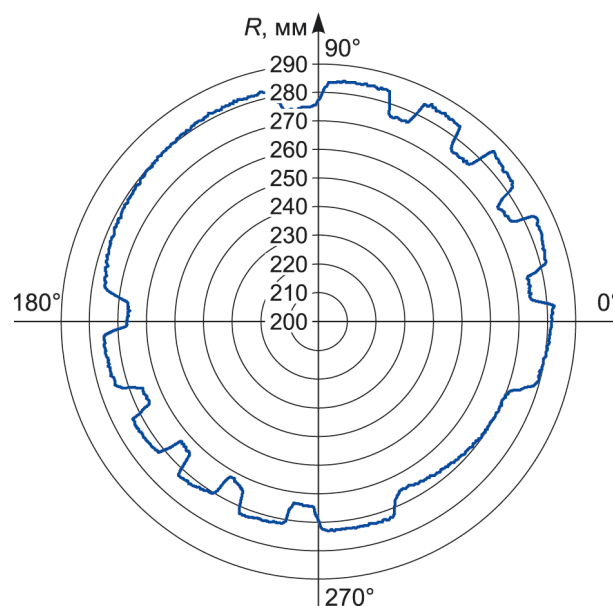


Рис. 5. Результаты измерения профиля поверхности гофрированного листа с прогибом в поперечном сечении вниз в полярных координатах

Fig. 5. The results of measuring the profile of the surface of a corrugated sheet with a deflection in the cross section downwards in polar coordinates

скользящего среднего. Для эталонного образца использовали гофрированный металлический лист С-9 заводского производства. Полученные данные о профиле поверхности гофрированного листа по спирали Ферма формировались в программе MS Excel в форме таблицы. На рис. 5 представлены измеренные значения профиля в полярной системе координат для первого витка спирали при прогибе гофрированного листа в поперечном сечении вниз, где R – расстояние между лазерным датчиком и поверхностью измерения в миллиметрах.

В результате статистической обработки данных инструментальные погрешности сканирования, воспринимаемые как кажущиеся или фантомные отклонения поверхностей от номинальных значений, квалифицировали как погрешности представления поверхностей по результатам сканирования.

При исследовании разработанного метода рассчитали бюджет погрешностей (неопределённостей) измерений информационно-измерительной системы. Определили стандартную неопределённость измерения расстояния между лазерным датчиком и поверхностью измерения. С учётом погрешности профилографа расширенная неопределённость составила 0,06 мм.

В результате анализа полученных данных установили значение $(13,8 \pm 0,05)$ мм прогиба гофрированного листа в поперечном сечении вниз. Высота гофр листа С-9 составила $(8,9 \pm 0,06)$ мм, что допустимо по требованиям контроля качества изделия. Таким образом, методом лазерного спиралевидного сканирования с использованием профилографа возможно определить различные отклонения формы поверхности изделий.

Заключение. Описанный метод измерения профиля поверхности мехатронным профилографом с параллельным управлением приводами датчиков по заданной траектории многократно реализован в лабораторных условиях. Реализацию синтезированных законов изменения обобщённых координат мехатронного профилографа выполняет спроектированная система управления по изменению управляющих сигналов. Специальное программное обеспечение позволяет оператору позиционировать лазерный датчик при задании различных траекторий движения, получать данные о перемещении рабочей точки по осям и об измеренном расстоянии до поверхности в этих координатах, а также выводить в табличном виде данные о профиле поверхности гофрированного листа при профилировании по спирали Ферма. Установленное значение прогиба исследуемого гофрированного листа в поперечном сечении вниз составило $(13,8 \pm 0,05)$ мм. Несколько повысить точность измерений мехатронным профилографом можно за счёт уменьшения скорости профилирования или путём подбора датчика перемещения.

Список источников

1. Lushnikov N., Lushnikov P., *Transportation Research Procedia*, 2017, vol. 20, pp. 425–429. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.069>

2. Alexander V. V., Deng H., Islam M. N., Terry F. L., *Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, 2010. https://doi.org/10.1364/CLEO_APPS.2010.AFA3
3. Abidin F. Z., Hung J., Zahid M. N., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 469, 012074. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/469/1/012074>
4. Shih F. Y., *Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques*, Wiley-IEEE Press, 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470590416>
5. Lee B. Y., Tarnig Y. S., *International Journal of Machine tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, pp. 1251–1263. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00023-2)
6. Stoudt M., Hubbard J. B., *Acta Materialia*, 2005, vol. 53 (16), pp. 4293–4304. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.05.038>
7. 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.
8. Hockauf R., Grove T., Denkena B., *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3 (2), 40. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020040>
9. Vasiliev S., Kirillov A., Afanasieva I., *Proceedings of 17th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*, May 23–25, 2018, Jelgava, Latvia, vol. 17, pp. 537–542. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N126>
10. 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.
11. 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.
12. Polyakov V. M., Nearing A., *Soil Science Society of America Journal*, 2019, vol. 83, iss. 2, pp. 327–331. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.10.0378>
13. Патент РФ № 2707907. Полевой бесконтактный профилограф для спиралевидного сканирования / Васильев С. А., Федорова А. А., Александров Р. И. // *Изобретения. Полезные модели*. 2019 (34).
14. Merlet J. P., *Parallel robots*, Kluwer Academic Publishers, 2000, 372 p.
15. Хейло С. В., Глазунов В. А., Палочкин С. В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Структурный синтез. Кинематический и силовой анализ. М.: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2011. 153 с.
16. Хейло С. В., Глазунов В. А., Ширинкин М. А., Календарев А. В. Возможные применения механизмов параллельной структуры // *Проблемы машиностроения и надёжности машин*. 2013. № 5. С. 19–24.
17. Zhou B., Zhao J., Li L., *Computer-Aided Design*, 2015, vol. 67–68, pp. 87–106. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.06.005>
18. Huang N., Jin Y., Lu Y., Yi B., Li X., Wu S., *Computers & Industrial Engineering*, 2020, no. 139, 106142. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106142>

19. Wiczorowski M., *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, no. 41, pp. 2017–2022.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00066-9)

20. Zhuang J., Wang Z., Liao X., Gao B., Cheng L., *Micron*, 2019, no. 123, 102683. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2019.102683>

21. Dresscher M., Jayawardhana B., Kooi B. J., Scherpen J. M. A., *Mechatronics*, 2020, no. 71, 102427.
<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102427>

22. Мехатронный профилограф: Пат. РФ № 2724386 / С. А. Васильев, Р. И. Александров, А. А. Федорова // Изобретения. Полезные модели. 2020 (18).

References

1. Lushnikov N., Lushnikov P., *Transportation Research Procedia*, 2017, vol. 20, pp. 425–429.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.069>

2. Alexander V. V., Deng H., Islam M. N., Terry F. L., *Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, 2010.
https://doi.org/10.1364/CLEO_APPS.2010.AFA3

3. Abidin F. Z., Hung J., Zahid M. N., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 469, 012074.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/469/1/012074>

4. Shih F. Y., *Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques*, Wiley-IEEE Press, 2010.
<https://doi.org/10.1002/9780470590416>

5. Lee B. Y., Tarng Y. S., *International Journal of Machine tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, pp. 1251–1263.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00023-2)

6. Stoudt M., Hubbard J. B., *Acta Materialia*, 2005, vol. 53 (16), pp. 4293–4304. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.05.038>

7. Vasiliev S. A., Alekseev V. V., Rechnov A. V., *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*, 2015, no. 9, pp. 11–13. (In Russ.)

8. Hockauf R., Grove T., Denkena B., *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3 (2), 40.
<https://doi.org/10.3390/jmmp3020040>

9. Vasiliev S., Kirillov A., Afanasieva I., *Proceedings of 17th International Scientific Conference “Engineering for Rural*

Development”, May 23–25, 2018, Jelgava, Latvia, vol. 17, pp. 537–542. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N126>

10. Vasiliev S. A., *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2016, no. 3, pp. 220–226. (In Russ.)

11. Vasiliev S. A., *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii*, 2016, no. 4, pp. 40–54. (In Russ.)

12. Polyakov V. M., Nearing A., *Soil Science Society of America Journal*, 2019, vol. 83, iss. 2, pp. 327–331.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2018.10.0378>

13. Vasilev S. A., Fedorova A. A., Aleksandrov R. I., RF Patent no. 2707907, *Byull. Izobret.*, 2019 (34). (In Russ.)

14. Merlet J. P., *Parallel robots*, Kluwer Academic Publishers, 2000, 372 p.

15. Kheilo S. V., Glazunov B. A., Palochkin S. V., *Manipulyatsionnye mekhanizmy parallel'noi struktury. Strukturnyi sintez. Kinematicheskii i silovoi analiz [Manipulation mechanisms of a parallel structure. Structural synthesis. Kinematic and force analysis]*, Moscow, MGTO im. A. N. Kosygina, 2011, 153 p. (In Russ.)

16. Kheilo S. V., Glazunov V. A., Shirinkin M. A., Kalendarev A. V., *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2013, no. 5, pp. 19–24. (In Russ.)

17. Zhou B., Zhao J., Li L., *Computer-Aided Design*, 2015, vol. 67–68, pp. 87–106. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.06.005>

18. Huang N., Jin Y., Lu Y., Yi B., Li X., Wu S., *Computers & Industrial Engineering*, 2020, no. 139, 106142.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106142>

19. Wiczorowski M., *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, no. 41, pp. 2017–2022.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00066-9)

20. Zhuang J., Wang Z., Liao X., Gao B., Cheng L., *Micron*, 2019, no. 123, 102683.
<https://doi.org/10.1016/j.micron.2019.102683>

21. Dresscher M., Jayawardhana B., Kooi B. J., Scherpen J. M. A., *Mechatronics*, 2020, no. 71, 102427.
<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102427>

22. Vasilev S. A., Aleksandrov R. I., Fedorova A. A., RF Patent no. 2724386, *Byull. Izobret.*, 2020 (18). (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 11.05.2021; одобрена после рецензирования 22.09.2021; принята к публикации 29.09.2021.
 The article was submitted 11.05.2021; approved after reviewing 22.09.2021; accepted for publication 29.09.2021.