

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КОМПАКТНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ

Федорова А.А., Орлов Д.С., Марков С.В.

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары

Ключевые слова: профилограф, цилиндрическая система координат, лазерный датчик, планетарная передача, винтовой привод, микрорельеф поверхности.

Аннотация. В статье рассматривается разработка конструкции компактного мехатронного профилографа с цилиндрической системой координат, предназначенного для измерения геометрических параметров и микрорельефа поверхности при испытаниях сельскохозяйственных и наземных транспортных машин. Целью работы является создание измерительного устройства с уменьшенными габаритами и массой при сохранении протяжённой зоны сканирования и требуемой точности. Рассмотрены конструктивные и кинематические особенности линейных и порталных профилографов, показаны их ограничения, связанные с ростом длины направляющих, массы подвижных элементов и инерционных нагрузок при увеличении зоны измерений. Предложена осесимметричная конструктивно-кинематическая схема, реализующая перемещение лазерного датчика в цилиндрической системе координат за счёт сочетания вращательного движения и радиального поступательного перемещения. Показано, что применение планетарной передачи и винтового радиального привода позволяет существенно сократить суммарную длину направляющих и металлоёмкость по сравнению с декартовыми схемами при сопоставимой площади контролируемой зоны. Приведены результаты сравнительного анализа двух типов траекторий сканирования – челночной (декартова схема) и спирали Архимеда (цилиндрическая схема). Обосновано, что использование спиральной траектории сокращает длину измерительного пути, что ведёт к уменьшению времени измерения и снижению энергопотребления. Экспериментальные исследования опытного образца подтвердили возможность высокоточного измерения параметров микрорельефа поверхности при компактных габаритах установки.

DEVELOPMENT OF A COMPACT CYLINDRICAL PROFILOGRAPH FOR MEASURING SURFACE GEOMETRIC PARAMETERS

Fedorova A.A., Orlov D.S., Markov S.V.

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary

Keywords: profilograph, cylindrical coordinate system, laser sensor, planetary gear, screw drive, surface microrelief.

Abstract. This article discusses the development of a compact mechatronic profilograph with a cylindrical coordinate system, designed to measure geometric parameters and surface microrelief during testing of agricultural and ground-based vehicles. The objective of the study is to create a measuring device with reduced dimensions and weight while maintaining an extended scanning zone and the required accuracy. The design and kinematic features of linear and portal profilographs are examined, highlighting their limitations associated with the increased length of guides, the mass of moving elements, and inertial loads with an increased measurement zone. An axisymmetric design and kinematic scheme is proposed, implementing the movement of a laser sensor in a cylindrical coordinate system through a combination of rotational motion and radial translational movement. It is shown that the use of a planetary gear and a radial screw drive allows for a significant reduction in the total length of guides and metal consumption compared to Cartesian designs with a comparable monitoring zone area. The results of a comparative analysis of two types of scanning trajectories – a shuttle (Cartesian pattern) and an Archimedean spiral (cylindrical pattern)—are presented. It is demonstrated that using a spiral trajectory shortens the measurement path, leading to shorter measurement times and lower energy consumption. Experimental studies of a prototype confirmed the feasibility of high-precision measurement of surface microrelief parameters within a compact setup.

Введение

Оценка качества микрорельефа поверхности является важнейшим этапом при испытаниях почвообрабатывающих машин – культиваторов, плугов, фрезерных агрегатов. Согласно государственным стандартам, необходимо контролировать геометрические

параметры поверхности на участках заданных размеров с требуемой плотностью измерений. Повышение рабочих скоростей сельхозтехники ужесточает требования не только к точности, но и к производительности средств контроля [1, 2].

Большинство современных профилографов используют декартову систему координат с линейными или порталными кинематическими схемами. Игольчатые профилометры (например, разработка R. Hegazy) представляют собой жёсткую балку длиной около 1 м с вертикальными щупами. Такая конструкция требует высокой изгибной жёсткости, но даёт профиль лишь в одном поперечном сечении [3].

Лазерный профилограф ИП-284-01 содержит протяжённую линейную направляющую с кареткой и лазерным датчиком. Перемещение – винтовое или ремённое. Для охвата всей ширины участка необходимы многократные проходы или перемещение установки, что обусловлено одномерностью кинематики [4].

В машиностроении широко применяются порталные лазерные системы и координатно-измерительные машины, где датчик движется по осям X и Y . Они включают две продольные направляющие и поперечную балку с кареткой. Портальная схема отличается значительной суммарной длиной направляющих, увеличенной массой подвижных звеньев [5].

Профилограф П. Шаржеца также основан на линейном перемещении измерительного модуля вдоль направляющей, что типично для декартовых схем и сопровождается ростом габаритов при расширении зоны измерений [6].

В работе X. Li и C. Song представлен профилометр на подвижной платформе, где сканирование выполняется поступательным движением модуля. Пространственное покрытие достигается перемещением всей установки, а не компактным координатным механизмом [7].

Анализ аналогов показывает, что преобладают конструкции с протяжёнными линейными направляющими и порталными рамами. Увеличение зоны измерений ведёт к росту массы подвижных элементов, инерционных нагрузок и сложности обеспечения жёсткости. Это особенно критично для мобильных систем испытания почвообрабатывающих машин, где компактность и снижение металлоёмкости являются приоритетными требованиями.

В качестве альтернативы предлагается конструктивно-кинематическая схема профилографа на основе цилиндрической системы координат [8, 9]. Цель работы – разработка и исследование кинематической схемы компактного цилиндрического профилографа, обоснование её преимуществ для контроля микрорельефа поверхности при испытаниях сельскохозяйственных машин.

Материалы и методы исследований

В качестве альтернативы линейным и порталным измерительным системам [1-3] предложена кинематическая схема профилографа в цилиндрической системе координат. Положение измерительного датчика в плоскости задаётся обобщёнными координатами r и φ , где r – радиальная координата (поступательное перемещение каретки), а φ – угловая координата (вращение модуля вокруг вертикальной оси) [8].

Устройство имеет две степени свободы:

- вращение вокруг стойки через планетарный зубчатый редуктор;
- радиальное поступательное движение измерительной головки с помощью винтовой пары и линейной направляющей [9].

Планетарная передача обеспечивает соосность двигателя и выходного звена, высокий крутящий момент при малых габаритах и повышенную крутильную жёсткость. В отличие от ремённых или зубчато-реечных приводов порталных систем, планетарный механизм позволяет компактно разместить двигатель в оси вращения и уменьшить радиальные размеры установки.

Радиальное перемещение реализовано ходовым винтом, преобразующим вращение шагового двигателя в поступательное движение каретки с лазерным датчиком. Винтовая пара даёт высокую точность позиционирования, осевую жёсткость и возможность малого шага перемещения без дополнительных редукторов. Направляющая с подшипниковыми опорами воспринимает поперечные нагрузки, разгружая винт и повышая долговечность.

Предложенная конструкция образует кинематически замкнутую систему с одной радиальной направляющей и одной вращательной осью, что принципиально отличается от декартовых схем, требующих двух и более протяжённых линейных осей. Сокращение суммарной длины направляющих и числа подвижных звеньев уменьшает массу при формировании рабочей зоны большого радиуса. Разработанная кинематическая схема и полученные уравнения положений и скоростей подробно представлены в работе [10].

На рисунке 1 показана схема устройства. Несущая часть – основание со стойкой 1, обеспечивающее соосность вращающегося корпуса 2.



Рис. 1. Конструктивно-кинематическая схема профилографа

Каретка 3 с лазерным датчиком 4 и платой питания/обработки 5 перемещается по направляющей 6. Привод – ходовой винт 7 с трапецеидальной резьбой и шаговый двигатель NEMA17 8. Вращение корпуса – двигателем TorqueNADO 10 через планетарную передачу 9. Угловое положение фиксирует датчик 12, наклон компенсируется инерциальным модулем MPU6050 13. Управление – на микроконтроллере STM32F103 (плата 11), питание – от литий-ионного аккумулятора 18650 14.

Внутри корпуса размещены также DC-DC-преобразователи (5 В; 3,3 В) и модуль Bluetooth HC-06 для беспроводной связи с ноутбуком. Программирование и отладка выполнены с использованием ST-Link V2.

Для количественного сопоставления предлагаемой цилиндрической схемы с традиционными линейной и портальной декартовыми схемами использованы два критерия: суммарная длина направляющих (прямо пропорциональная металлоёмкости и массе) и полная длина измерительной траектории при сканировании рабочей зоны.

Пусть R – максимальный радиус зоны измерений (для цилиндрической схемы) или половина стороны квадратной зоны (для декартовых схем). Шаг пространственной дискретизации обозначим Δ .

Суммарная длина направляющих для каждой схемы и соответствующая относительная металлоёмкость приведены в таблице 1.

Для равномерного анализа выбраны две траектории, обеспечивающие сплошное покрытие заданной площади при одинаковой плотности измерений:

- челночная траектория – характерна для линейных и портальных декартовых профилографов;

- спираль Архимеда – реализуется в предлагаемом цилиндрическом профилографе.

Длина измерительной траектории L при полном покрытии круговой зоны радиусом R (для цилиндрической схемы) и квадратной зоны со стороной $2R$ (для декартовых схем) определяется по формулам, представленным в таблице 2.

Табл. 1. Сравнение кинематических схем по $L_{напр}$ и металлоёмкости

Кинематическая схема	Суммарная длина направляющих $L_{напр}$	Относительная металлоёмкость (к цилиндрической)
Линейная (одна координата X)	$2R$	в 2 раза больше
Портальная декартова (X – Y)	$6R$	в 6 раз больше
Цилиндрическая (предлагаемая)	R	1

Табл. 2. Сравнение кинематических схем по длине измерительной траектории

Кинематическая схема	Тип траектории	Длина траектории L	Относительная длина (к челночной)
Портальная (декартова)	Челночная (построчная)	$L_{челн} = \frac{4R^2}{\Delta}$	1
Цилиндрическая (предлагаемая)	Спираль Архимеда	$L_{спир} = \frac{\pi R^2}{\Delta}$	$\frac{\pi}{4} = 0,785$

Отношение длин приводит к сокращению длины траектории на 21,5% при любых значениях R и Δ . Таким образом, предлагаемая цилиндрическая схема обеспечивает не зависящий от масштаба выигрыш как по металлоёмкости (в 2-6 раза), так и по длине сканирования ($\approx 21,5\%$).

Результаты

Для количественной оценки преимуществ разработанного цилиндрического профилографа выбрана типичная рабочая зона радиусом $R = 1,1$ м (площадь около $3,8$ м²) и шаг дискретизации $\Delta = 10$ мм, что соответствует требованиям контроля микрорельефа почвы [4]. На рисунке 2 представлена компоновка устройства с основными габаритными размерами, а в таблице 3 приведены его технические характеристики.

При одинаковой зоне $R = 1,1$ м измерений суммарная длина направляющих и относительная металлоёмкость приведены в таблице 4.

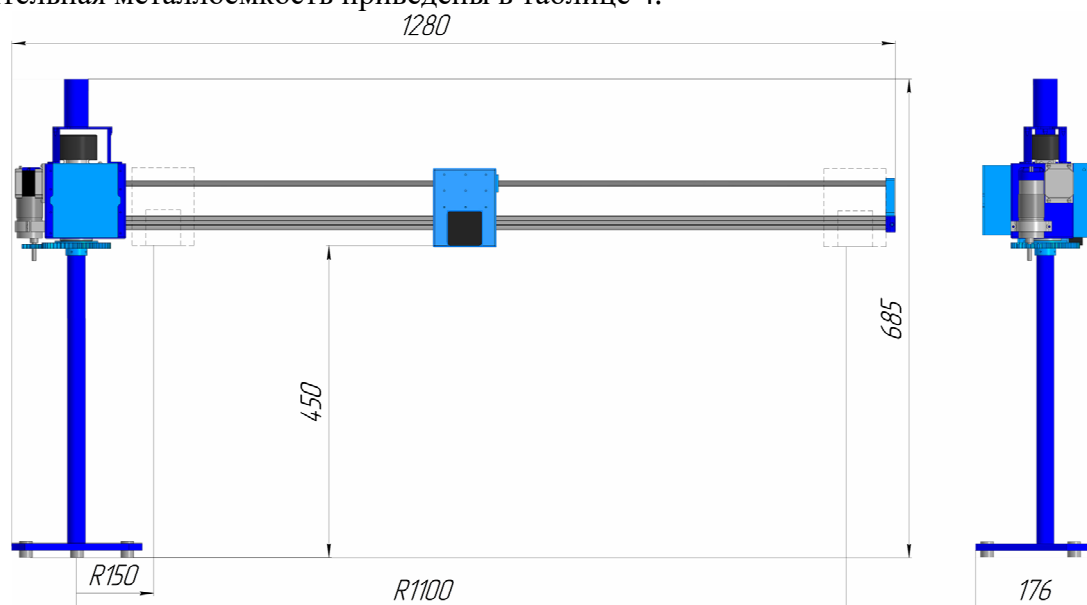


Рис. 2. Компоновка профилографа

Для полного покрытия выбранной зоны при $\Delta = 10$ мм получены длины траекторий, представленные в таблице 5.

Таким образом, цилиндрическая схема требует в 2 раза меньшую массу направляющих по сравнению с линейной и в 6 раз меньшую – по сравнению с портальной. Это прямо соответствует снижению металлоёмкости и массы подвижных элементов, что особенно важно для мобильных полевых профилографов [8].

Табл. 3. Основные технические характеристики профилографа

Параметр	Значение
Диапазон радиальных измерений r , мм	150...1100
Диапазон углового поворота φ , град	0...360
Диапазон измерений по высоте z , мм	100...450
Погрешность измерения по высоте, мм	не более $\pm 0,7$
Габаритные размеры, мм	1280x176x685
Масса профилографа, кг	11,5
Тип привода вращения	TorqueNADO + планетарная передача
Тип радиального привода	NEMA 17 + винт Tr8x2
Тип датчика перемещения	РФ-605
Контроллер системы управления	STM32F103
Интерфейсы связи	Bluetooth HC-06, USB (CH340G)
Время автономной работы, мин	не менее 95

Табл. 4. Сравнение кинематических схем по $L_{нар}$ и металлоёмкости при $R = 1,1$ м

Кинематическая схема	Суммарная длина направляющих, м	Относительная металлоёмкость
Линейная (одна координата X)	2,2	в 2 раза больше
Портальная декартова (X – Y)	6,6	в 6 раз больше
Цилиндрическая (предлагаемая)	1,1	1 (база)

Табл. 5. Сравнение по длине измерительной траектории при $R = 1,1$ м, $\Delta = 10$ мм

Кинематическая схема	Тип траектории	Длина траектории, м	Относительная длина
Портальная (декартова)	Челночная (построчная)	484	1,00
Цилиндрическая (предлагаемая)	Спираль Архимеда	380	0,785

Сокращение длины траектории составляет 21,5% и ведёт к пропорциональному уменьшению времени измерения, снижению энергопотребления и, что важно для полевых условий, к уменьшению накопленных погрешностей позиционирования за счёт отсутствия остановок и реверсов привода [5, 9].

Относительный выигрыш цилиндрической схемы не зависит от R и Δ , следовательно абсолютная экономия в метрах растёт пропорционально квадрату радиуса и обратно пропорциональна шагу дискретизации.

Заключение

Разработана конструктивно-кинематическая схема компактного цилиндрического профилографа, реализующая перемещение лазерного датчика в цилиндрической системе координат за счёт сочетания вращательного и радиального поступательного движений. Проведённое сравнение с традиционными линейной и портальной декартовыми схемами показало, что предложенное решение обеспечивает снижение металлоёмкости в 2-6 раз (за счёт сокращения суммарной длины направляющих) и уменьшение длины измерительной траектории на 21,5% (за счёт использования спирали Архимеда вместо челночного сканирования). Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанный профилограф для бесконтактного контроля микрорельефа почвы при испытаниях сельскохозяйственных машин, а также для измерения геометрических параметров листовых материалов и других изделий. Дальнейшие работы направлены на повышение автономности устройства и внедрение алгоритмов адаптивного сканирования.

Список литературы

1. Хейфец М.Л. Средства измерения и контроля для метрологического и технологического обеспечения качества продукции // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении:

Научные труды VIII Международной научной конференции, Москва, 19-20 ноября 2024 года. – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024. – С. 226-228.

2. Шмидт А.Н., Овчинников Е.В., Шонов А.Е. Способы обработки почв, подверженных ветровой эрозии // Новая наука: История становления, современное состояние, перспективы развития. – Уфа: АМИ, 2018. – С. 86-88.
3. Hegazy B.R. Soil surface profile computation using portable profile meter with image processing and tracking technique // Global Journal of Researches in Engineering, General Engineering. 2013, vol. 13, iss. 3, pp. 1-6. DOI: 10.6084/M9.FIGSHARE.3189643.V1.
4. Киреев И.М., Коваль З.М. Метод и система контроля величины заглубления рабочих органов в почву // Наука в центральной России. – 2019. – №2(38). – С. 14-22.
5. Калинин А.Б., Устроев А.А. Теоретические предпосылки и практические приемы рациональной системы обработки почвы в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2016. – №90. – С. 70-78.
6. Šařec P., Šařec O., Prošek V., Čížková K. Laser profilometer testing by laboratory measurements // Research in Agricultural Engineering. 2007, vol. 53(1), pp. 1-7. DOI: 10.17221/2134-RAE.
7. Li X., Song C., López S., Li Y., López J.F. Fast computation of bare soil surface roughness on a Fermi GPU // Computers & Geosciences. 2015, vol. 82, pp. 38-44. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.05.013.
8. Патент № 2770800 РФ. Полевой мехатронный профилограф / С.А. Васильев, Р.И. Александров, А.А. Федорова, М.А. Васильев, С.А. Мишин, С.Е. Лимонов, В.В. Алексеев, И.Н. Иванов. – Заявка №2021113237 от 06.05.2021; опубл. 21.04.2022, Бюл. №12.
9. Федорова А.А., Васильев М.А., Васильев С.А. Измерение волнистости поверхности мехатронным профилографом // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2021. – №4(60). – С. 83-93. – doi.org/10.21685/2072-3059-2021-4-7.
10. Федорова А.А. Кинематический анализ мехатронного профилографа // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2022. – №10. – С. 11-13. – doi.org/10.26160/2541-8637-2022-10-11-13.

References

1. Kheifets M.L. Measuring and control means for metrological and technological assurance of product quality // Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering: Proceedings of the VIII International Scientific Conference, Moscow, November 19-20, 2024. – М.: Blagonravov Institute of Mechanical Engineering RAS, 2024. – P. 226-228.
2. Schmidt A.N., Ovchinnikov E.V., Shonov A.E. Methods of processing soils subject to wind erosion // New science: History of formation, current state, development prospects. – Ufa: AMI, 2018. – P. 86-88.
3. Hegazy B.R. Soil surface profile computation using portable profile meter with image processing and tracking technique // Global Journal of Researches in Engineering, General Engineering. 2013, vol. 13, iss. 3, pp. 1-6. DOI: 10.6084/M9.FIGSHARE.3189643.V1.
4. Kireev I.M., Koval Z.M. Method and system for controlling the depth of the working organs in the soil // Science in central Russia. 2019, no. 2(38), pp. 14-22.
5. Kalinin A.B., Ustrov A.A. Theoretical background and practices of rational soil tillage as a part of farm crops cultivation technologies // Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products. 2016, no. 90, pp. 70-78.
6. Šařec P., Šařec O., Prošek V., Čížková K. Laser profilometer testing by laboratory measurements // Research in Agricultural Engineering. 2007, vol. 53(1), pp. 1-7. DOI: 10.17221/2134-RAE.
7. Li X., Song C., López S., Li Y., López J.F. Fast computation of bare soil surface roughness on a Fermi GPU // Computers & Geosciences. 2015, vol. 82, pp. 38-44. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.05.013
8. Patent No. 2770800 RU. Field mechatronic profilograph / S.A. Vasiliev, R.I. Aleksandrov, A.A. Fedorova, M.A. Vasiliev, S.A. Mishin, S.E. Limonov, V.V. Alekseev, I.N. Ivanov. – Appl. No. 2021113237 from 06.05.2021; publ. 21.04.2022, Bul. No. 12.
9. Fedorova A.A., Vasiliev M.A., Vasiliev S.A. Measurement of surface waviness using a mechatronic profilograph // News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences. 2021, no. 4(60), pp. 83-93. doi.org/10.21685/2072-3059-2021-4-7.
10. Fedorova A.A. Kinematic analysis of a mechatronic profiler // Mechatronics, automation and robotics. 2022, no. 10, pp. 11-13. doi.org/10.26160/2541-8637-2022-10-11-13.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Федорова Алена Анатольевна – старший преподаватель кафедры прикладной механики и графики	Fedorova Alena Anatolyevna – senior lecturer of the Department of applied mechanics and graphics
Орлов Данила Сергеевич – студент	Orlov Danila Sergeevich – student
Марков Сергей Витальевич – студент	Markov Sergey Vitalievich – student
e_a_a@mail.ru	

Получена 10.04.2026