

УДК 531.717.81

doi:10.21685/2072-3059-2021-4-7

Измерение волнистости поверхностей мехатронным профилографом

А. А. Федорова¹, С. А. Васильев²

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

¹e_a_a@mail.ru, ²Vsa_21@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Определение волнистости различных поверхностей является важным фактором для оценки качества исследуемых объектов. Предметом исследования является процесс измерения волнистости различных поверхностей. Цель работы – расчет параметров волнистости лазерным датчиком методом кругового сканирования для повышения эффективности исследования различных поверхностей. *Материалы и методы.* Для измерения шероховатости профиля поверхности почвы предлагается использовать метод кругового сканирования мехатронным профилографом. Приведена схема сканирования профиля волнистости, определены направления профиля и параметров высоты и шага волнистости поверхностей. *Результаты.* Измерение параметров волнистости было проведено методом кругового сканирования мехатронным профилографом в учебной лаборатории Машиностроительного факультета Чувашского государственного университета имени И. Н. Ульянова. Получены графики измерения параметров прогиба металлического листа в полярных координатах и в виде развертки, определены параметры высоты и шага волнистости поверхности металлического листа. *Выводы.* Установлено, что для определения шероховатости почвы можно использовать круговой метод лазерного сканирования, а также автоматизировать процесс измерения для увеличения скорости измерения.

Ключевые слова: волнистость поверхности, шаг и высота волнистости, круговое сканирование, лазерный профилограф

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

Для цитирования: Федорова А. А., Васильев С. А. Измерение волнистости поверхностей мехатронным профилографом // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 4. С. 83–93. doi:10.21685/2072-3059-2021-4-7

Measurement of surface waviness with a mechatronic profilograph

A.A. Fedorova¹, S.A. Vasil'ev²

^{1,2}Chuvash State University named after I. N. Ulyanova, Cheboksary, Russia

¹e_a_a@mail.ru, ²Vsa_21@mail.ru

Abstract. *Background.* Determination of various surfaces' waviness is an important factor in assessing the quality of the objects under study. The subject of the research is the process of measuring the waviness of various surfaces. The purpose of this work is to calculate the waviness parameters by a laser sensor by the circular scanning method to increase the effi-

ciency of studying various surfaces. *Materials and methods.* To measure the roughness of the soil surface profile, it is proposed to use the method of circular scanning with a mechatronic profilograph. The article provides a scheme for scanning the profile of waviness, determining the direction of the profile and parameters of the height and step of waviness of surfaces. *Results.* The measurement of the waviness parameters was carried out by the method of circular scanning with a mechatronic profilograph, in the educational laboratory of the Mechanical Engineering Faculty of the Chuvash State University named after I. N. Ulyanov. The graphs of measuring the parameters of the deflection of a metal sheet in polar coordinates and in the form of a sweep were obtained, the parameters of the height and step of the waviness of the surface of the metal sheet were determined. *Conclusions.* In a scientific article, it was found that to determine the roughness of the soil to use the circular method of laser scanning, as well as to automate the measurement process to increase the measurement speed.

Keywords: surface waviness, waviness step and height, circular scanning, laser profilograph

Acknowledgments: the work was supported by the grant of the President of the Russian Federation for young scientists MD-1198.2020.8, agreement No. 075-15-2020-228

For citation: Fedorova A.A., Vasil'ev S.A. Measurement of surface waviness with a mechatronic profilograph. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;(4):83–93. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-4-7

Введение

Определение волнистости различных поверхностей является важным фактором для оценки качества исследуемых объектов. Согласно СЭВ РС3951 волнистость – совокупность периодически повторяющихся неровностей на поверхности. Как правило, волнистость характеризуется двумя параметрами: высотой волнистости поверхности W_Z и шагом волнистости поверхности S_W .

Применительно к различным отраслям параметр волнистости определяется индивидуально. Так, в сельском хозяйстве согласно ГОСТ 33736 волнистость (гребнистость) определяется средней высотой гребня, которая измеряется в четырехкратной повторности (две по ходу движения агрегата и две обратно) с числом измерения в каждой повторности не менее 10. В древесной промышленности и металлургии волнистость, коробковатость и прогиб металлических листов и древесных плит согласно ГОСТ 26877 определяют по наибольшему значению между плоской поверхностью и нижней поверхностью (или между верхней поверхностью и прилегающей плоскостью или прямой, параллельной плоской поверхности). Известен профилограф для спиралевидного сканирования [1, 2], сканирующий исследуемую поверхность по окружности и замеряющий одновременно два параметра – угол поворота и расстояние до поверхности.

Существует множество методик определения волнистости различных поверхностей [3–11], однако большинство из них являются либо медленными, способными работать только в лабораторных условиях, либо способными оценить только определенные параметры волнистости и позволяющими проводить измерения только в одной плоскости. Также многие существующие устройства не имеют автоматизации измерения. Поэтому разработка и исследование универсального портативного устройства, позволяющего измерять трехмерную волнистую поверхность в автоматизированном режиме в различных сферах, является актуальной задачей.

Материалы и методы

Для измерения волнистости различных поверхностей предлагается использовать мехатронный профилограф [12], который можно применить как в сельском хозяйстве, так и в промышленности для измерения волнистости металлических листов и древесных плит.

Мехатронный профилограф показан на рис. 1.

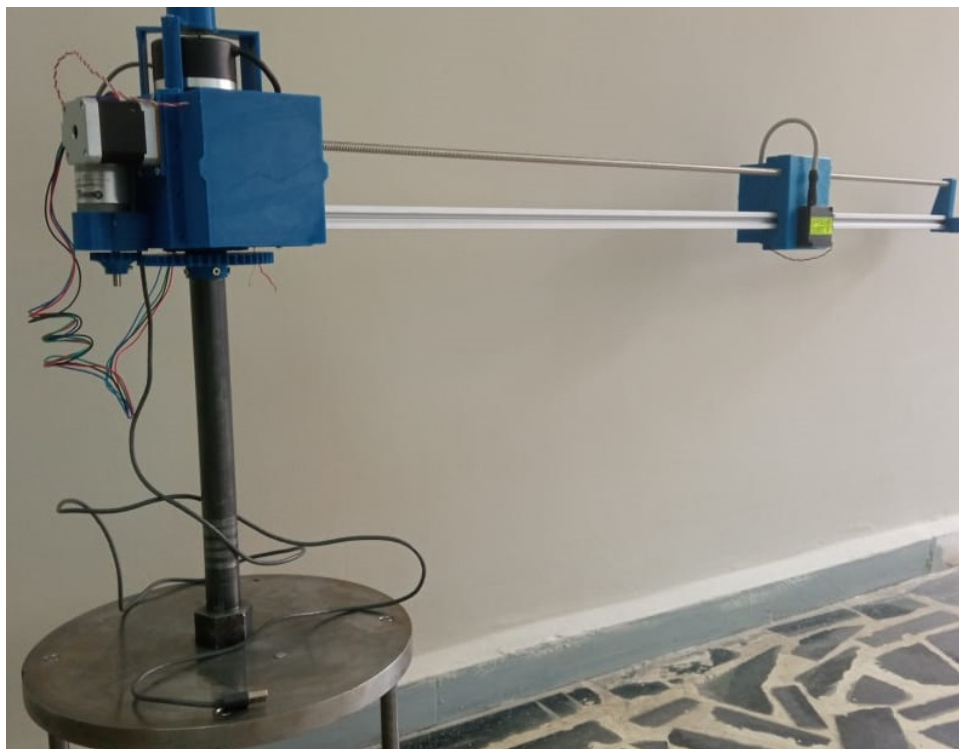


Рис. 1. Мехатронный профилограф

Мехатронный профилограф состоит из массивного основания с магнитами (для установки на металлическом листе) или штырями (для установки на почве), на которое устанавливается стержень, на его верхней части установлен угловой датчик, водило и цилиндрическое колесо, при обкатке по которым сателлитам происходит вращение водила. На водиле установлена направляющая, по нему движется каретка с лазерным датчиком, движение которой в радиальном направлении передается винтовым механизмом. Перемещение каретки и вращение водила задается двигателями, установленными на водиле. На водиле также установлен электронный блок обработки сигналов и питания, соединяемый кабелем с угловым датчиком и с помощью Bluetooth-соединения с ноутбуком и лазерным датчиком на каретке.

При вращении лазерный датчик замеряет расстояние до поверхности измеряемого объекта H_i и мгновенные значения угла поворота датчика φ_i , которые после обработки в электронном блоке сигналов передаются на ноутбук.

После проведения сканирования некоторой волнистой поверхности предложенным профилографом за один оборот плеча профилографа на ради-

усе сканирования R_i получаем данные в виде попеременных значений расстояний до неровностей и соответствующих им углов поворота датчика (табл. 1) которые условно можно представить в виде предложенных обозначений.

Таблица 1

Условные данные сканирования

$H_i, \text{мм}$	$\Phi_i, ^\circ$	$H_i, \text{мм}$	$\Phi_i, ^\circ$
$H_{\text{выступ } 0}$	$\Phi_{\text{выступ } 0}$	$H'_{\text{впадин } (n+1)}$	$\Phi'_{\text{впадин } (n+1)}$
...	...	$H'_{\text{выступ } (n+1)}$	$\Phi'_{\text{выступ } (n+1)}$
$H_{\text{выступ } n}$	Φ_i	$H'_{\text{впадин } n}$	$\Phi'_{\text{впадин } n}$
$H_{\text{впадин } n}$	$\Phi_{\text{впадин } n}$	$H'_{\text{выступ } n}$	$\Phi'_{\text{впадин } n}$
$H_{\text{выступ } (n+1)}$	$\Phi_{\text{выступ } (n+1)}$
$H_{\text{впадин } (n+1)}$	$\Phi_{\text{впадин } (n+1)}$	$H'_{\text{выступ } 0}$	$\Phi'_{\text{выступ } 0}$
...
H_l	Φ_l	H_r	Φ_r
...	...		

Примечание. $H_{\text{выступ } 0}$, $H'_{\text{выступ } 0}$ – расстояния до выступа поверхности, расположенного вблизи центра вращения профилографа на угле $\Phi_{\text{выступ } 0}$ при $\Phi_i \in (\Phi_r, \Phi_l)$ и угле $\Phi'_{\text{выступ } 0}$ при $\Phi_i \in (\Phi_l, \Phi_r)$; $H_{\text{выступ } n}$, $H_{\text{выступ } (n+1)}$ – расстояния до n -го, $(n + 1)$ -го выступов поверхности на углах Φ_i , $\Phi_{\text{выступ } (n+1)}$ соответственно при $\Phi_i \in (\Phi_r, \Phi_l)$; $H_{\text{впадин } n}$, $H_{\text{впадин } (n+1)}$ – расстояния до n -й, $(n + 1)$ -й впадин поверхности на углах $\Phi_{\text{впадин } n}$, $\Phi_{\text{впадин } (n+1)}$ соответственно при $\Phi_i \in (\Phi_r, \Phi_l)$; $H'_{\text{выступ } n}$, $H'_{\text{выступ } (n+1)}$ – расстояния до n -го, $(n + 1)$ -го выступов поверхности на углах $\Phi'_{\text{выступ } n}$, $\Phi'_{\text{выступ } (n+1)}$ соответственно при $\Phi_i \in (\Phi_l, \Phi_r)$; $H'_{\text{впадин } n}$, $H'_{\text{впадин } (n+1)}$ – расстояния до n -й, $(n + 1)$ -й впадин поверхности на углах $\Phi'_{\text{впадин } n}$, $\Phi'_{\text{впадин } (n+1)}$ соответственно при $\Phi_i \in (\Phi_l, \Phi_r)$; H_l , H_r – расстояние до поверхности при крайних левом и правом положениях на углах Φ_l , Φ_r соответственно; r – количество выступов.

Схема сканирования профиля волнистости поверхности при измерении мехатронным профилографом представлена на рис. 2.

Для того чтобы определить значение угла направления профиля волнистости β , первоначально необходимо определить минимальные углы размаха неровностей Ψ_{min} и Ψ'_{min} (рис. 3), которые позволяют определить выступ поверхности расположенного вблизи центра вращения профилографа, где Ψ_{min} – минимальный угол размаха при $\Phi_i \in (\Phi_r, \Phi_l)$; Ψ'_{min} – минимальный угол размаха при $\Phi_i \in (\Phi_r, \Phi_l)$.

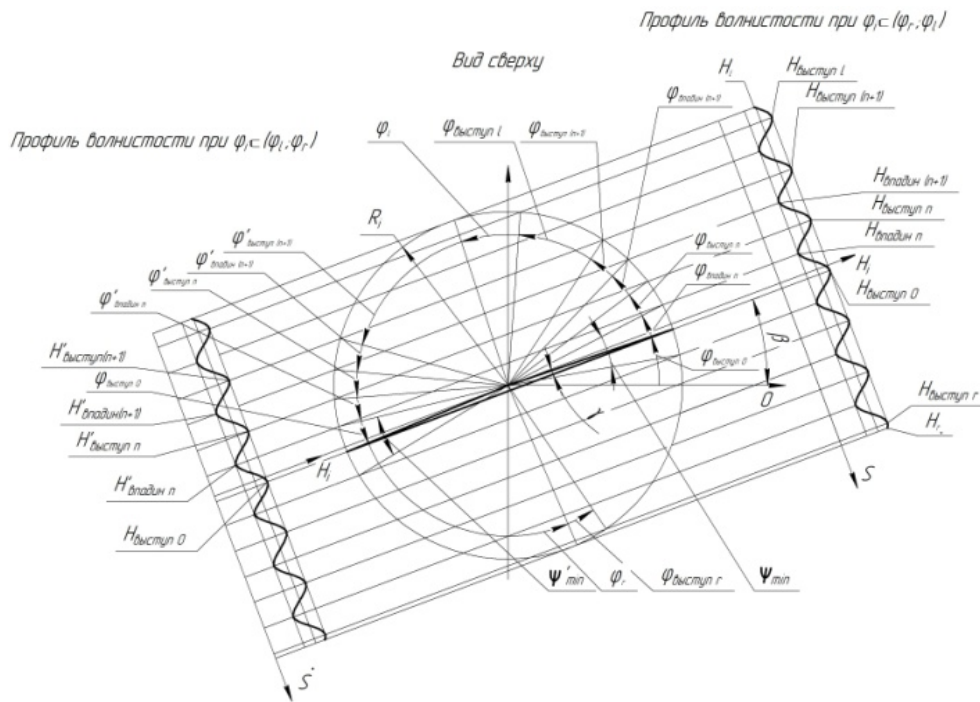


Рис. 2. Схема сканирования профиля волнистости мехатронным профилографом

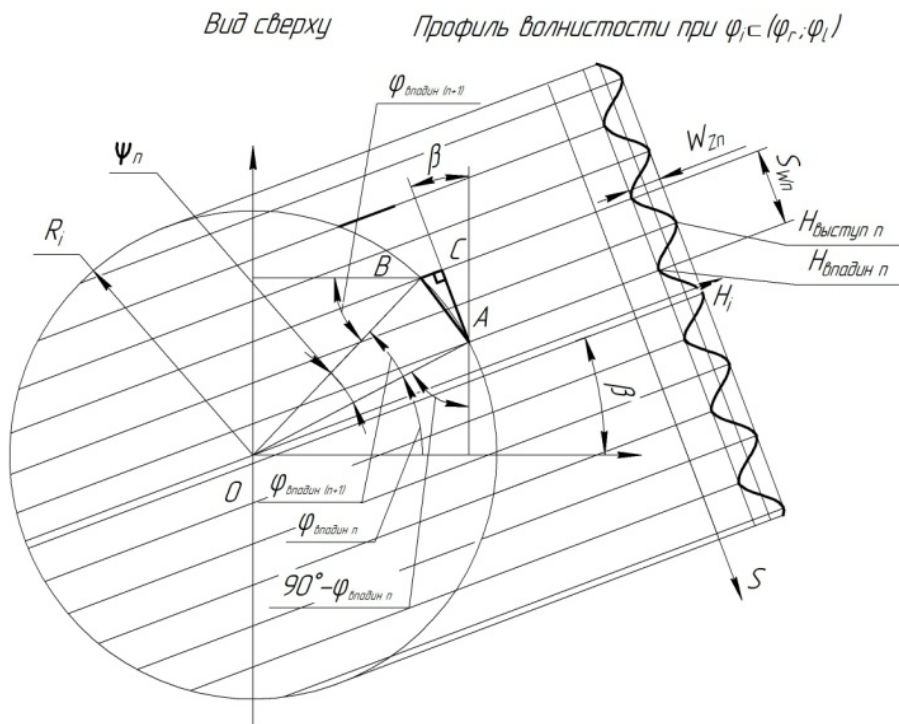


Рис. 3. Схема определения высоты и шага волнистости мехатронным профилографом

Угол размаха n -й неровности можно определить как угол между значениями углов поворота датчика соседних впадин:

$$\Psi_n = \Phi_{\text{впадин } (n+1)} - \Phi_{\text{впадин } n}. \quad (1)$$

После нахождения выступа, расположенного вблизи центра вращения профилографа, определяется угол направления профиля волнистости β как угол между линией, проходящей через вершины выступа с минимальными углами размаха и линией начала отсчета сканирования ($\varphi_i = 0^\circ$), который определим согласно рис. 3:

$$\beta = \Phi_{\text{выступ } o} + \gamma, \quad (2)$$

где

$$\gamma = \frac{180^\circ - (360^\circ - \Phi'_{\text{выступ } o} + \Phi_{\text{выступ } o})}{2}. \quad (3)$$

Подставив значения из формулы (3) в (2) и выполнив преобразования, получим

$$\beta = \frac{\Phi'_{\text{выступ } o} + \Phi_{\text{выступ } o} - 180^\circ}{2}. \quad (4)$$

Параметр максимальной высоты волнистости n -й неровности W_{Zn} определяется по формуле

$$W_{Zn} = H_{\text{выступ } n} - H_{\text{впадин } n}. \quad (5)$$

Согласно рис. 3 шаг волнистости S_{Wn} определяется по формуле

$$S_{Wn} = AC = AB \cdot \cos(\angle CAB). \quad (6)$$

Из рис. 3 видно, что

$$AB = 2R_i \cdot \sin \frac{\Psi_n}{2} = 2R_i \cdot \sin \left(\frac{\Phi_{\text{впадин } (n+1)} - \Phi_{\text{впадин } n}}{2} \right), \quad (7)$$

а угол

$$\angle CAB = 180^\circ - \beta - 90^\circ + \Phi_{\text{впадин } n} - 90^\circ + \frac{\Psi_n}{2}. \quad (8)$$

Подставив значения из формулы (1) в (8) и выполнив преобразования, получим

$$\angle CAB = \frac{\Phi_{\text{впадин } (n+1)} + \Phi_{\text{впадин } n}}{2} - \beta. \quad (9)$$

В результате получим формулу для определения параметра шага волнистости S_{Wn} одной неровности:

$$S_{Wn} = 2R_i \sin \left(\frac{\Phi_{\text{впадин } (n+1)} - \Phi_{\text{впадин } n}}{2} \right) \times \cos \left(\frac{\Phi_{\text{впадин } (n+1)} + \Phi_{\text{впадин } n}}{2} - \beta \right). \quad (10)$$

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования профилографа спирального сканирования были проведены в учебной лаборатории машиностроительного факультета Чувашского государственного университета имени И. Н. Ульянова.

Целью исследования было поставлено измерение прогиба поверхности металлического листа.

Для проведения эксперимента лист металла был размещен на плоскую поверхность, а на поверхность листа установлен профилограф строго вертикально во всех направлениях по уровню. Затем произведен запуск программы на ноутбуке.

Было проведено сканирование поверхности листа за один оборот плеча. Данные сканирования: расстояния до поверхности листа и соответствующие им угловые значения угла поворота после обработки электронным блоком обработки сигналов были получены на ноутбуке в электронной таблице Excel.

После обработки полученных данных были получены графики сканирования устройством в полярных координатах (рис. 4) и декартовых координатах (рис. 5).

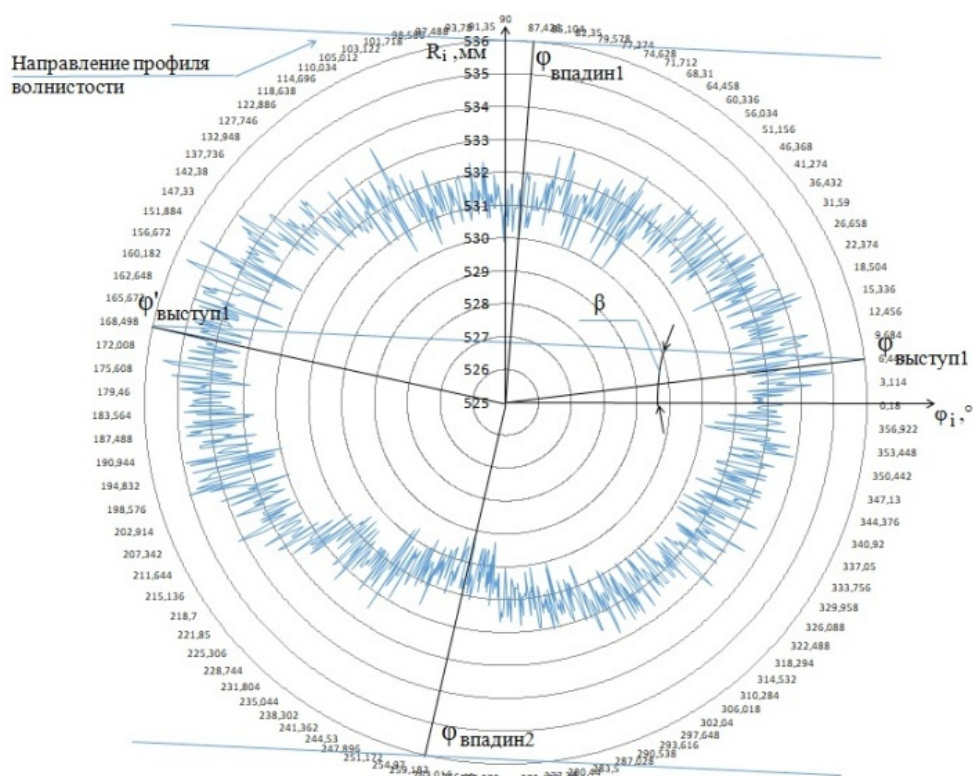


Рис. 4. График измерения волнистости поверхности в полярных координатах

Из полученных графиков видно, что имеется прогиб листа на радиусе сканирования R_i , равный 351 мм, представляющий собой одну неровность.

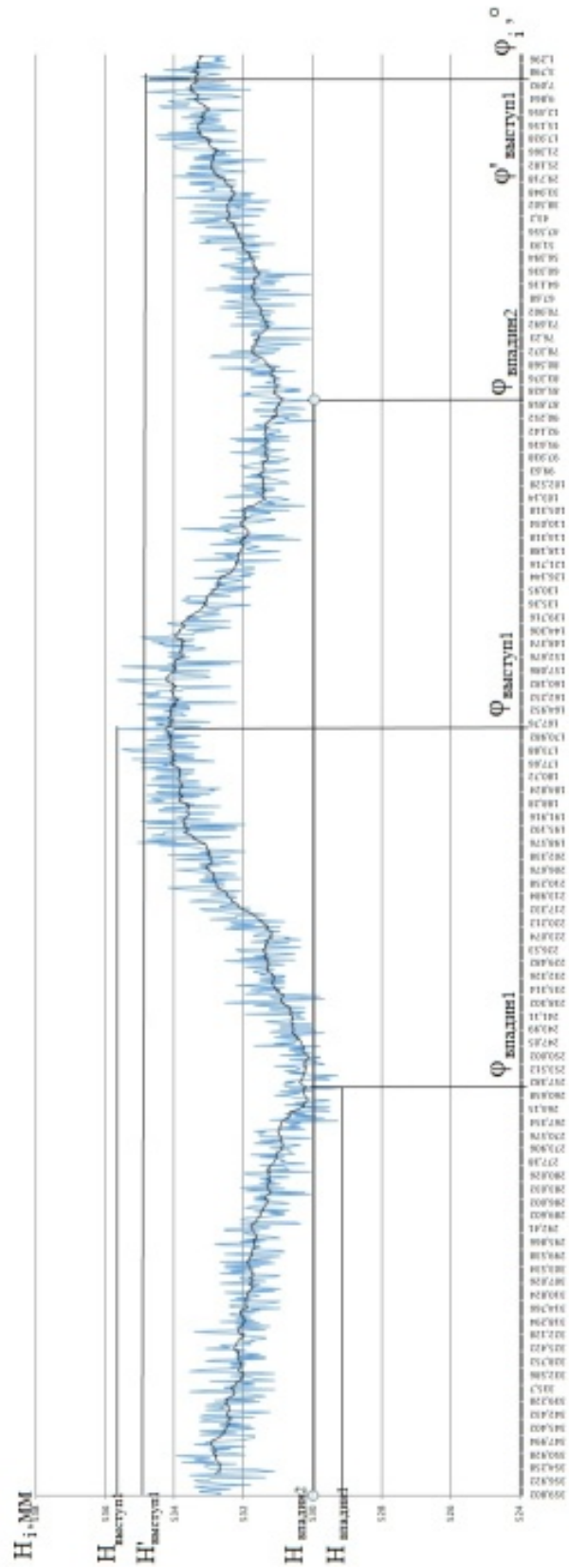


Рис. 5. График измерения данных и линия тренда с линейной фильтрацией за один оборот в виде развертки

Значит, параметр высоты волнистости определяется согласно формуле (5):

$$W_Z = W_{Z1} = 535,511 - 529,133 = 6,378 \text{ мм};$$

угол направления профиля волнистости β – согласно формуле (4):

$$\beta = \frac{\varphi'_{\text{выступ } o} + \varphi_{\text{выступ } o} + 180^\circ}{2} = \frac{168,912 + 7,092 + 180^\circ}{2} = -1,998^\circ.$$

Параметр шага волнистости поверхности при одной неровности определяется по формуле (10):

$$\begin{aligned} S_W = S_{W1} &= 2R_i \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{\text{впадин } 2} - \varphi_{\text{впадин } 1}}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{\text{впадин } 2} + \varphi_{\text{впадин } 1}}{2} - \beta\right) = \\ &= 2 \cdot 350 \cdot \sin\left(\frac{258,57 - 87,012}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{258,57 + 87,012}{2} + 1,998\right) = 695,806 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Таким образом, применение мехатронного профилографа позволяет автоматизировать процесс определения высоты и шага волнистости (прогиба, коробковатости) поверхности металлических листов.

Заключение

Установлено, что для определения волнистости поверхностей почвы в сельском хозяйстве и металлических и древесных листов можно использовать круговые методы лазерного сканирования, а также автоматизировать процесс измерения для сокращения времени обработки данных. Анализ представленных графиков поверхности металлического листа показывает, что можно определить высоту и шаг волнистости поверхности металлических листов, а значит, определить волнистость, прогиб и коробковатость листа.

Список литературы

1. Патент 2707907 Российская Федерация. Полевой бесконтактный профилограф для спиралевидного сканирования / Васильев С. А., Федорова А. А. № 2019113180 ; заявл. 29.04.2019 ; опубл. 02.12.2019, Бюл. № 34.
2. Федорова А. А., Васильев, С. А., Иванов И. Н. Анализ профилографа для определения геометрических характеристик изделий спиральным сканированием лазерным профилографом // Вестник современных технологий. 2020. № 2. С. 27–32.
3. 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
4. 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
5. Васильев С. А., Максимов И. И., Алексеев В. В. Методика и устройство для профилирования поверхности почвы и определения направления стока атмосферных осадков в полевых условиях // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № 3. С. 22–26.
6. 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.

7. 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
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Ravimal D., Kim H., Koh D., Hong J. H., Lee S. K. Image-based inspection technique of a machined metal surface for an unmanned lapping process // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*. 2019. doi:10.1007/s40684-019-00181-7
12. Патент 2724386 Российская Федерация. Мехатронный профилограф / Васильев С. А., Александров Р. И., Федорова А. А., Васильев М. А., Мишин С. А., Лимонов С. А. № 2020107081 ; заявл. 14.02.2020 ; опубл. 23.06.2020, Бюл. № 34.

References

1. Patent 2707907 Russian Federation. Field non-contact profiler for spiral scanning. Vasil'ev S.A., Fedorova A.A. No. 2019113180; appl. 29.04.2019; publ. 02.12.2019, bull. No. 34. (In Russ.)
2. Fedorova A.A., Vasil'ev S.A., Ivanov I.N. Analysis of a profiler to determine the geometric characteristics of products by spiral scanning with a laser profiler. *Vestnik sovremennykh tekhnologiy = Bulletin of modern technologies*. 2020;(2):27–32. (In Russ.)
3. Wang T., Groche P. Sheet metal profiles with variable height: numerical analyses on flexible roller beading. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019;3(1):19. doi:10.3390/jmmp3010019
4. Stoudt M., Hubbard J.B. Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet. *Acta Materialia*. 2005;53(16):4293–4304. doi:10.1016/j.actamat.2005.05.038
5. Vasil'ev S.A., Maksimov I.I., Alekseev V.V. Method and device for profiling the soil surface and determining the direction of precipitation runoff in the field. *Vestnik APK Stavropol'ya = Bulletin of Stavropol Agricultural Complex*. 2015;(3):22–26. (In Russ.)
6. Vasil'ev S.A., Alekseev V.V., Rechnov A.V. Express method for quantitative assessment of crop residues on the soil surface. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian scientific journal*. 2015;(9):11–13. (In Russ.)
7. Hockauf R., Grove T., Denkena B. Prediction of ground surfaces by using the actual tool topography. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019;3(2):40. doi:10.3390/jmmp3020040
8. 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;17:537–542.
9. Vasil'ev S.A. Development of a method and profiler for the assessment of reclamation technologies on slope agricultural landscapes. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of Nizhnevolzhsky agro-university complex: science and higher professional education*. 2016;(3):220–226. (In Russ.)
10. Vasil'ev S.A. Substantiation of structural and technological parameters of profilers for the control of reclamation technologies on slope agricultural landscapes. *Nauchnyy*

zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii = Proceedings of the Russian Research Institute of land reclamation problems. 2016;(4):40–54. (In Russ.)

11. Ravimal D., Kim H., Koh D., Hong J.H., Lee S.K. Image-based inspection technique of a machined metal surface for an unmanned lapping process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*. 2019. doi: 10.1007/s40684-019-00181-7
12. Patent 2724386 Russian Federation. Mechatronic profilograph. Vasil'ev S.A., Aleksandrov R.I., Fedorova A.A., Vasil'ev M.A., Mishin S.A., Limonov S.A. No. 2020107081; appl. 14.02.2020; publ. 23.06.2020, bull. No. 34. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алена Анатольевна Федорова

ассистент кафедры технологии машиностроения, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова (Россия, г. Чебоксары, Московский проспект, 15)

E-mail: e_a_a@mail.ru

Alena A. Fedorova

Assistant of the sub-department mechanical engineering technology, Chuvash State University named after I. N. Ulyanov (15 Moskovskiy avenue, Cheboksary, Russia)

Сергей Анатольевич Васильев

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной механики и графики, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова (Россия, г. Чебоксары, Московский проспект, 15)

E-mail: Vsa_21@mail.ru

Sergey A. Vasil'ev

Doctor of engineering sciences, associate professor, head of the sub-department applied mechanics and graphics, Chuvash State University named after I. N. Ulyanov (15 Moskovskiy avenue, Cheboksary, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 21.09.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 19.10.2021

Принята к публикации / Accepted 03.11.2021