

В. И. Бусурин, д-р техн. наук, проф., vbusurin@mai.ru, **Лю Чжэ**, аспирант, lzg599312@hotmail.com,
П. С. Кудрявцев, канд. техн. наук, доц., mpso121@mail.ru,
Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Управление бесконтактным профилометром при сканировании поверхностей сложного профиля

Рассматривается задача исследования профиля поверхности протяженной прецизионной детали сложной формы бесконтактным сканирующим профилометром с заданной точностью. Контакт измерительного блока с контролируемой поверхностью необходимо исключить из-за возможности повреждения изделия и, одновременно, обеспечить необходимую точность оценки его профиля. Для решения данной задачи в работе используется двухкантурная система, содержащая два датчика: преобразователь расстояния на основе оптического туннелирования для "точного" канала и преобразователь на основе хроматической аберрации для "грубого" канала сканирования. Показано, что на основе данных измерений "грубого" канала, обеспечивающего гарантируемое исключение контакта датчика "грубого" канала с поверхностью исследуемого изделия, можно прогнозировать положение и скорость перемещения датчика "точного" канала в целях исключения контакта с исследуемой поверхностью и обеспечения необходимой точности измерений. Разработана математическая модель динамической системы сканирования на основе априорной информации о входящих в нее элементах и блоках. Проведен анализ основных динамических свойств системы сканирования и построен закон ее управления, обеспечивающий требуемое качество переходных процессов на основе математического моделирования. Разработан алгоритм прогноза последующего положения датчика "точного" канала на основе данных измерений "грубого" канала, который обеспечивает требуемую скорость и точность сканирования в зависимости от прогнозируемой высоты профиля поверхности объекта. Разработана блок-схема алгоритма, определяющего значение перемещения датчика "точного" канала в вертикальном направлении в зависимости от полученной оценки измерений "грубого" канала. Проведенные исследования позволили разработать структурную схему двухкантурной измерительной системы. Было проведено моделирование данной системы в среде MATLAB/Simulink, которое позволило оценить эффективность ее функционирования для различных исследуемых профилей. Результаты моделирования показали эффективность предлагаемой схемы системы управления профилометром.

Ключевые слова: метод оптического туннельного эффекта, метод оценки положения чувствительного элемента, функция преобразования положения и скорости перемещения, прецизионный профилометр, бесконтактное сканирование поверхности

Введение

В настоящее время бесконтактные профилометры широко используются в промышленности для контроля точности изготовления сложных деталей в различных производственных направлениях [1–6]. Бесконтактные сканирующие профилометры, используемые для осуществления измерений без касания измерительного блока с исследуемой поверхностью объекта, могут использовать различные сенсоры [1–3, 5, 7–9], в том числе такие, как преобразователь расстояния на основе оптического туннелирования [5, 6] или преобразователь на основе хроматической аберрации [7–9]. Однако даже использование таких измерительных устройств не может исключить контакт сенсорного блока с поверхностью исследуемого объекта. Такое столкновение приводит не только к выходу из строя сенсора, но и может привести к порче исследуемого объекта, для конструирования которого были затрачены значительные материальные и временные ресурсы. Поэтому

возникает задача разработки такого измерительного устройства, которое бы обеспечивало, с одной стороны, исключение механического контакта сенсора с поверхностью объекта и его повреждения в процессе сканирования, а с другой стороны, гарантировало бы получение данных о профиле исследуемой поверхности объекта с заданной точностью [10–14].

Постановка задачи

Данные результатов измерений поверхности исследуемого объекта обычно представляются в виде раstra с равномерной сеткой с заданным до начала измерений шагом, определяющим расстояние между двумя последовательными точками. Однако, если поверхность объекта не является плоской, а имеет сложный профиль с участками различного наклона и высоты относительно некоторого заданного уровня, то тогда время для перехода от одной исследуемой точки поверхности к другой также должно быть различным. Это необходимо для построения

равномерной сетки сканирования поверхности объекта, учитывающей автоматически расстояние между точками различной высоты. Таким образом, скорость сканирования профилометра определяется не только заданным шагом сканирования, но и углом наклона исследуемой поверхности. Отсюда возникает задача управления значением шага перемещения бесконтактного профилометра в зависимости от значения угла наклона поверхности исследуемого объекта. Поэтому система управления перемещениями измерительного блока по вертикальной оси должна уметь прогнозировать высоту его положения на следующем шаге с учетом сохранения заданного промежутка между сенсором и исследуемой поверхностью, так как это определяет точность получаемых данных измерений. Трудность решения данной задачи также обусловлена тем, что перемещения измерительного блока осуществляются с помощью исполнительных устройств, обладающих определенными динамическими свойствами, которые не позволяют мгновенно перемещать сенсор в требуемое положение. При этом ставится условие исключения механического контакта сенсорного блока с поверхностью исследуемого объекта.

Схема решения поставленной задачи

Для решения поставленной задачи используется двухконтурная измерительная система, состоящая из туннельного оптического преобразователя (ОПП) и преобразователя на основе хроматической aberrации (ППХА).

Блок-схема бесконтактного сканирующего профилометра содержит следующие элементы (рис. 1): источник излучения (ИИ); оптический преобразователь приближения (ОПП) на осно-

ве оптического туннельного эффекта (ОТЭ); фотоприемник (ФП); преобразователь "ток—напряжение" ($I-U$); блок обработки (БО); усилитель (УС); пропорционально-дифференциальный регулятор (ПДР), который реализован в блоке обработки блока датчиков (БД); датчик положения ДП, измеряющий переменную z ; линейный двигатель перемещений вдоль оси OZ , например, линейный пьезоэлектрический двигатель *Piezolegs* (PL); подвижные моторизованные столики для осей OX и OY (ПСМ(OX) и ПСМ(OY)); датчик перемещения вдоль оси OZ (ДП) и преобразователь перемещения на основе хроматической aberrации (ППХА) [6, 8].

Оптический преобразователь приближения (ОПП) имеет следующие параметры: угол падения $\theta = 51^\circ$, показатель преломления преобразователя ОПП $n_1 = 1,53$; показатель преломления воздуха $n_2 = 1,0$, входная мощность излучения $P_{\text{ИИ}} = 100$ мкВт, длина волны излучения $\lambda = 1,31 \cdot 10^{-6}$ м, радиус измерительной части преобразователя ОПП $r_m = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м.

При перемещении бесконтактного профилометра от текущей точки h_0 к следующей точке h_1 расстояние движения ПСМ(OX) по оси OX будет равно диаметру измерительной части преобразователя ОПП. В этом случае угол наклона сканирования $\alpha_{\text{нак}}$ можно определить как

$$\alpha_{\text{нак}} = \text{arctg} \left(\frac{\Delta h}{\Phi_{\text{ш}}} \right),$$

где Δh — разница высоты между точки h_0 и точки h_1 ; $\Phi_{\text{ш}}$ — расстояние при движении ПСМ(OX) из точки h_0 в точку h_1 .

На основе информации о скорости V_Z перемещения преобразователя ОПП по оси OZ и скорости V_X перемещения ПСМ(OX) угол наклона исследуемой поверхности можно также определить как

$$\alpha_{\text{нак}} = \text{arctg} \left(\frac{V_Z}{V_X} \right).$$

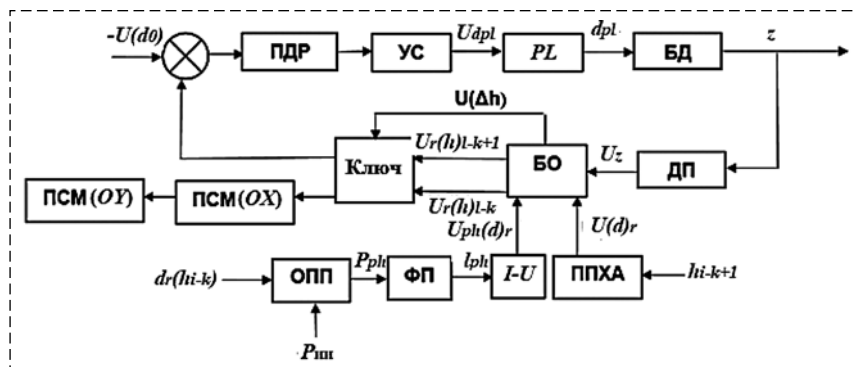


Рис. 1. Блок-схема системы сканирования бесконтактного сканирующего профилометра

Fig. 1. Flowchart of contactless scanning profiler's system

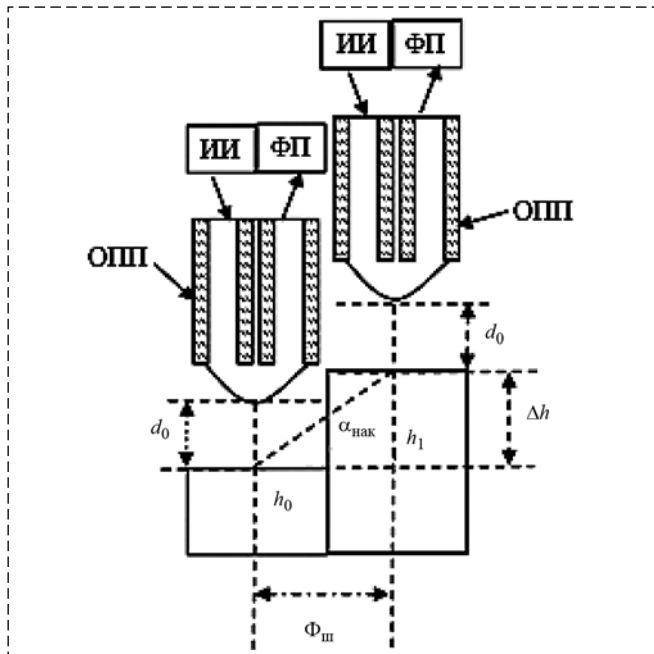


Рис. 2. Зависимость скорости движения оптического преобразователя от угла наклона поверхности

Fig. 2. Dependence of motion speed of optical converter on a surface slope angle

максимальная скорость движения равна 10 мм/с. В качестве канала грубого измерения был выбран преобразователь, максимальный диапазон измерения которого равен 100 мкм.

При значении смещения $\Phi_{ш} = 30$ мкм по оси OX максимально определяемый наклон исследуемой поверхности будет равен

$$\alpha_{нак, max} = \arctg\left(\frac{h_{max}}{\Phi_{ш}}\right) = 1,279.$$

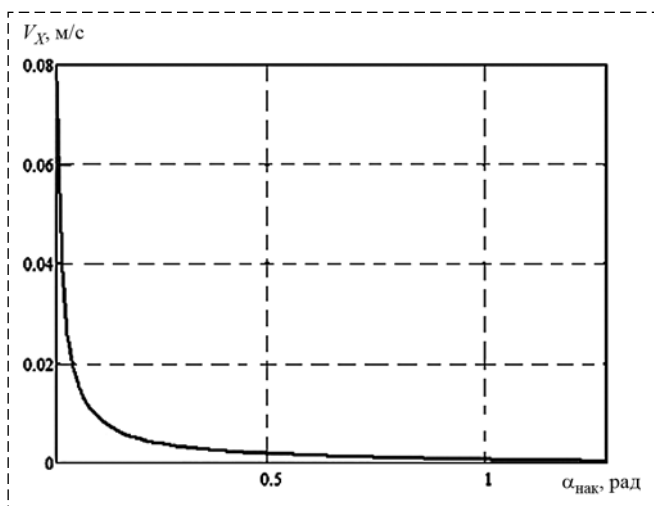


Рис. 3. Зависимость скорости V_X движения по оси OX от угла $\alpha_{нак}$ наклона сканируемой поверхности

Fig. 3. Dependence of axis OX movement speed V_X from a slope angle $\alpha_{нак}$ of the scanned surface

В этом случае максимальная скорость движения по оси OX будет равна

$$V_{X, max} = \frac{V_{Z, max}}{\arctg(\alpha_{нак, max})} = 3,004 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Если скорость двигателя PL равна $V_Z = 1$ мм/с, а наклон сканирования изменяется от 0,01 до 1,279 радиан, то зависимость скорости движения V_X по оси OX от угла наклона исследуемой поверхности сканирования имеет вид, приведенный на рис. 3.

Зависимость скорости V_Z движения по оси OZ от угла наклона исследуемой поверхности при скорости перемещения ПСМ(OX) показана на рис. 4.

Из графиков (рис. 3 и рис. 4) можно понять, что скорость сканирования по оси OX обратно пропорциональна углу наклона поверхности объекта и пропорциональна скорости перемещения пьезоэлектрического двигателя по оси OZ . Поскольку бесконтактный профилометр использует преобразователь приближения на основе ОТЭ для точного измерения высоты поверхности объекта, а преобразователь ППХА — для прогнозирования высоты следующей точки, то с помощью пьезоэлектрического двигателя можно компенсировать разницу в значении зазора между преобразователем приближения и поверхностью объекта. Это исключает контакт ОТЭ с поверхностью объекта.

Рассмотрим алгоритм работы бесконтактного профилометра с системой прогноза высоты. Перед началом сканирования происходит самотестирование профилометра, и датчик

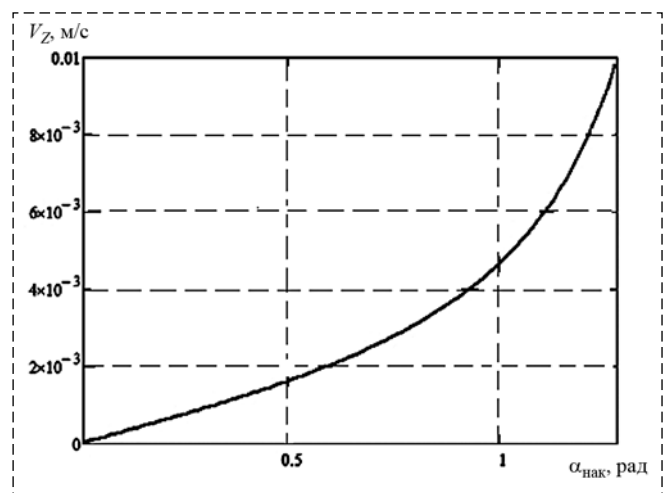


Рис. 4. Зависимость скорости V_Z движения по оси OZ от угла $\alpha_{нак}$ наклона поверхности сканирования

Fig. 4. Dependence of axis OZ movement speed V_Z from a slope angle $\alpha_{нак}$ of the scanned surface

системы устанавливается на начальную точку поверхности тела. Так как расстояние между датчиками ОПП и ППХА превышает шаг горизонтального сканирования в k раз, то первые k шагов сканирования работает канал "грубого" измерения зазора, информация об измеренных данных которого поступает в БО (блок обработки данных). Через k шагов сканирования начинает поступать информация от канала "точного" измерения зазора (переменная ZT). Таким образом, к моменту появления первого точного значения зазора в памяти БО имеется упреждающая информация о $k + 1$ значениях грубого зазора, и система прогноза высоты начинает свою работу. Используя информацию датчика положения (ДП) о высоте ОПП и ППХА в соответствующих точках, БО вычисляет точное значение высоты в точке сканирования № 1 и грубое значение высоты в точке сканирования № 2. Далее вычисляется прогнозируемое значение перепада высот.

Если прогнозируемое значение превышает заданную максимальную разницу высоты поверхности, то система сканирования не может компенсировать разницу высоты поверхности. В этом случае система сканирования принимает решение: следует ли остановить скани-

рование. Если "Да", система остановится; если "Нет", то уменьшается коэффициент ПСМ(OX), и повторно происходит этап вычисления.

В случае, если значение перепада высот не превышает максимальную разницу высоты, система сравнивает значение перепада высот со значением начального зазора d_0 . Если его значение превышает d_0 , то следящая система поднимает блок датчиков на величину Δz , при котором прогнозируемое значение перепада высот будет равно d_0 . Далее подается команда на привод ПСМ(OX), и блок датчиков перемещается в точку № 2.

В случае, если прогнозируемое значение перепада высот не превышает d_0 , сразу подается команда на привод ПСМ(OX), и блок датчиков перемещается в точку № 2. В точке сканирования № 2 запускается следящая система системы прогноза, которая устанавливает номинальное значение зазора dT , равное d_0 .

Данная процедура повторяется до тех пор, пока блок датчиков не достигнет последней точки сканирования, после чего сканирующий блок возвращается в исходное положение, и подается команда на привод ПСМ(OY). Соответственно, происходит перемещение блока датчиков на один шаг вдоль координаты OY , и работа системы сканирования повторяется.

На рис. 5 приведена блок-схема работы бесконтактного сканирующего профилометра, использующего алгоритм прогноза перемещения оптического преобразователя.

Моделирование процесса функционирования бесконтактного профилометра

Моделирование работы системы сканирования при различных значениях высоты h в среде *MATLAB/Simulink* осуществлялось для заданных параметров звеньев исследуемой пьезоэлектрического двигателя PL и подвижного моторизованного столики ПСМ(OX), приведенных ниже:

k_{yc}	60...240
k_{pl} , (нм/с)/В	$4,42 \cdot 10^4$
T_{yc} , с.	$1,5 \cdot 10^{-6}$
T_{pl} , с.	$9,9 \cdot 10^{-5}$
$k_{псм}$, (нм/с)/В	100...200
$T_{псм}$, с.	$1 \cdot 10^{-6}$

В качестве исполнительного элемента PL , как уже указывалось в данной работе, был выбран пьезоэлектрический двигатель на основе

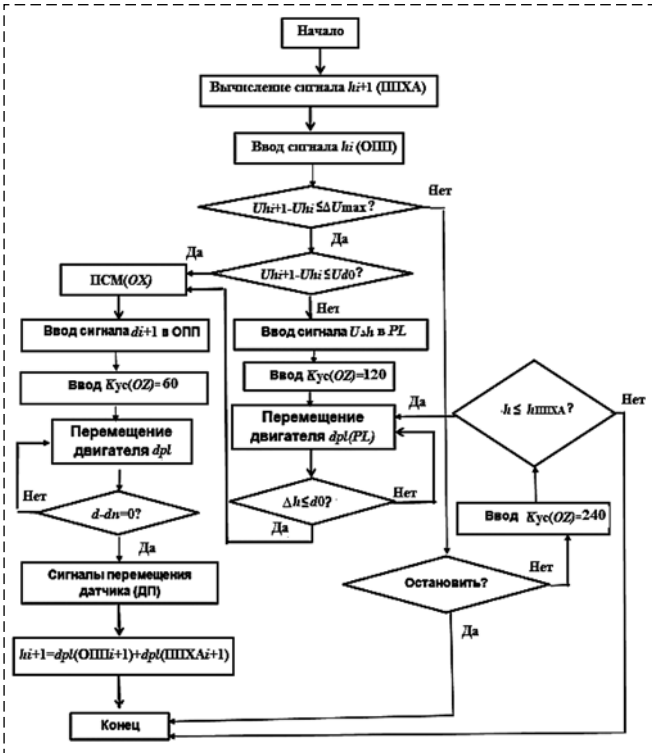


Рис. 5. Алгоритм функционирования системы сканирования бесконтактного сканирующего профилометра

Fig. 5. Algorithm of scanning system of the contactless profilometer

обратного пьезоэлектрического эффекта. Передаточная функция двигателя, отражающая динамическую зависимость перемещения от напряжения, определяется как

$$W_{pl}(s) = V_{pl}(s) \frac{1}{s} = \frac{k_{yc}k_{pl}}{(T_{pl}s + 1)s}.$$

Здесь k_{yc} — коэффициент усилителя напряжения; k_{pl} , (нм/с)/В — коэффициент передачи, определяющий скорость перемещения пьезоэлектрического двигателя в зависимости от величины, поданного на него напряжения; T_{pl} , с — постоянная времени пьезоэлектрического двигателя.

В качестве исполнительного элемента ПСМ (по осям OX и OY) были выбраны подвижные моторизованные столики. Передаточная функция исполнительных элементов, отражающая динамическую зависимость перемещения от напряжения, определяется как

$$W_{PCM}(s) = V_{PCM}(s) \frac{1}{s} = \frac{k_{PCM}}{(T_{PCM}s + 1)s},$$

где k_{PCM} , (нм/с)/В — коэффициент усиления подвижного моторизованного столика; T_{PCM} , с — постоянная времени.

Анализ данных моделирования показал, что:

- если коэффициент $k_{yc} = 240$, то при большой разнице высоты между двумя точками поверхности объекта система сканирования имеет самую быструю скорость измерения, а в диапазоне точности измерения система имеет значительные осцилляции выходного сигнала;

- если коэффициент $k_{yc} = 60$, то при большой разнице высоты между двумя точками поверхности объекта система сканирования имеет самую низкую скорость измерения.

В промежуточном диапазоне у системы наблюдается небольшое увеличение инерционности канала прямого преобразования при полном отсутствии осцилляций выходного сигнала. При значи-

тельной разнице высоты между двумя точками поверхности объекта система сканирования будет иметь наибольшую скорость измерений при значении коэффициента $k_{yc} = 60$. В этом случае максимальные значения угла наклона $\alpha_{нак}$ и скорости движения V_X по оси OX имеют следующие значения: $V_X = 1$ мм/с, $\alpha_{нак} = 39,8^\circ$.

При этом бесконтактный профилометр позволяет измерять максимальную разницу высоты поверхности объекта, равную $\Delta h = 25$ мкм.

На рис. 6 показан пример сканирования поверхности тела в 10 точках при изменении высот h в следующей последовательности: 250 нм, 150 нм, 1500 нм, 3000 нм, -2000 нм, 1000 нм, -1000 нм, 24 000 нм, 74 000 нм и 44 000 нм.

На рис. 7 приведен график перепадов высот Δh , нм, исследуемой поверхности в точках измерений.

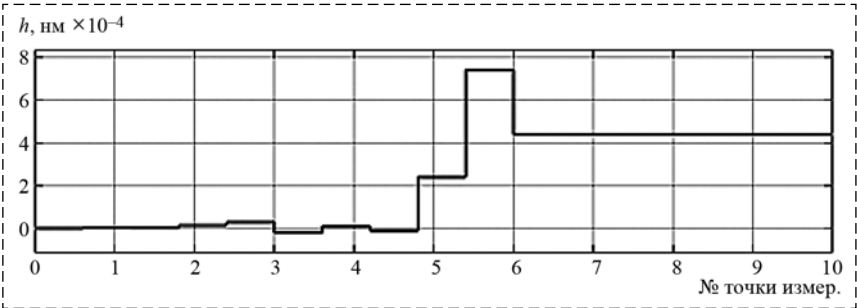


Рис. 6. Профиль высот исследуемой поверхности
Fig. 6. Profile of surface's heights under study

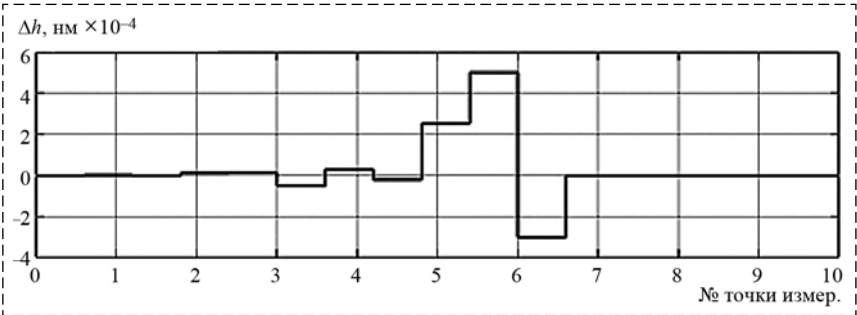


Рис. 7. График перепадов высот исследуемой поверхности
Fig. 7. Diagram of height differences of the studied surface

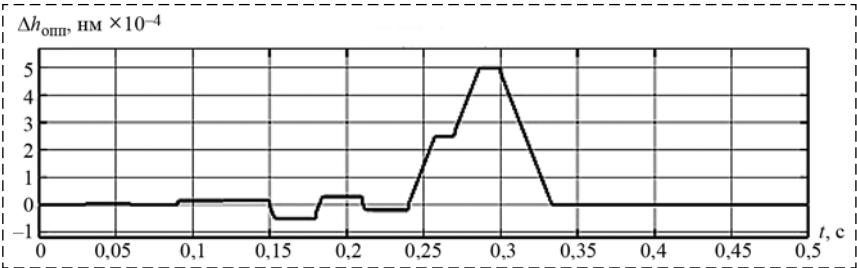


Рис. 8. Траектория перемещения оптоэлектронного блока датчиков вдоль оси OX при сканировании исследуемой поверхности
Fig. 8. Trajectory of optoelectronic block's movement along OX axis during scanning of studied surface

На рис. 8 приведена траектория перемещения блока датчиков пьезоэлектрическим двигателем вдоль оси OX при сканировании поверхности, профиль которой указан на рис. 6 и 7.

На рис. 8 показано, что в точке № 6, указанной на рис. 7, имеющей перепад высот от 54 000 нм до –24 000 нм, разница высот поверхности будет превышать максимальную разницу, а поэтому бесконтактный профилометр остановит сканирование и его выходной сигнал примет значение, равное 0.

Если разница высот поверхности превышает максимальную разницу (25 мкм) и не превышает максимальную диапазон измерения ППХА (50 мкм), то бесконтактный профилометр позволяет увеличивать коэффициент управления пьезоэлектрическим двигателем k_{yc} и продолжать сканирование. Таким образом, алгоритм управления бесконтактным профилометром может обеспечить точность сканирования путем изменения соответствующей скорости сканирования, а также исключить механический контакт из-за больших углов наклона поверхностей объекта.

Заключение

Исследована структурная схема системы сканирования бесконтактного профилометра, содержащая грубый и точный каналы измерения. В качестве грубого измерителя перемещения бесконтактного профилометра был выбран преобразователь на основе хроматической аберрации для прогнозирования высоты поверхности тела в процессе сканирования ("грубый" канал измерения). В "точном" канале измерения используется преобразователь приближения на основе ОТЭ.

Для системы сканирования был разработан алгоритм управления, обеспечивающий перемещение сенсора точного измерения при исследовании поверхности со сложным рельефом и большим перепадом высот. Показано, что сканирование останавливается, когда перепад высот слишком велик, чтобы исключить контакт датчика с поверхностью объекта.

На основе линеаризованной математической модели предложенного двухканального профилометра, с учетом экспериментально подтвержденных характеристик преобразователя с оптическим туннелированием было проведено моделирование функционирования

системы управления положением ОПП в среде *MATLAB/Simulink* для разных профилей высот поверхности.

Показано, что предлагаемая схема системы управления является работоспособной и обеспечивает сканирование высоты поверхности, а также исключает механический контакт датчика на основе ОТЭ с исследуемой поверхностью в процессе ее сканирования.

Список литературы

1. Двойнишников С. В., Аникин Ю. А., Кабардин И. К., Куликов Д. В., Меледин В. Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля поверхности трехмерных крупногабаритных объектов сложной формы // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 13–17.
2. Böckmann H., Liu S., Müller M., Hammud A., Wolf M., Kumagai T. Near-Field Manipulation in a Scanning Tunneling Microscope Junction with Plasmonic Fabry-Pot Tips // Nano Lett. 2019. Vol. 19, N. 6.
3. Chen C. Introduction to Scanning Tunneling Microscopy. Oxford University Press, 2021. 528 p.
4. Voigtländer B. Scanning Probe Microscopy (Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy). Springer, 2015. 382 p.
5. Xuan Z., Wu R., Tuan C., Chao D., Huixia G., Huanhuan L. Design of High-speed and High-precision Scanning Galvanometer Control System Based on FPGA + DSP Architecture // IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). 2021. P. 3455–3459. DOI: 10.1109/iSPEC53008.2021.9735706.
6. Оптический профилометр на базе микроинтерферометра МИИ-4М [Электронный ресурс]. Новосибирск: ЗАО "Дифракция". URL: <http://www.diffraction.ru/products-ru/mii-4>.
7. Palomer A., Ridao P., Forest J., Ribas D. Underwater laser scanner: ray-based model and calibration // IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2019. Vol. 24, N. 5. P. 1986–97.
8. Jin L., Li L. Optical driven electromechanical transistor based on tunneling effect // Optics Letters. Vol. 40, Iss. 8. 2015. P. 1798–1805.
9. An Y., Li B., Hu H., Zhou X. Building an omnidirectional 3-D color laser ranging system through a novel calibration method // IEEE Trans Ind Electron. Vol. 66, N. 11. 2019. P. 8821–8831.
10. Zheng Q., Chen L., Han Z. A non-contact swing-arm profilometer with the spectrally-resolved-interferometry distance sensor // Engineering Research Express. 2020. Vol. 2, N. 1.
11. Guo L., Wang H., Wang C., Lin Z. Optical Path Scanning Control System Based on Repetitive Control and PI Control // Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). 2018. P. 1071–1074. DOI: 10.1109/IMCCC.2018.00223.
12. Lei P., Zheng L. An automated in-situ alignment approach for finish machining assembly interfaces of large-scale components // Robot Comput Integr Manuf. 2017. Vol. 46. P. 130–43.
13. Li Y., Xu Q. Design and Robust Repetitive Control of a New Parallel-Kinematic XY Piezostage for Micro/Nanomanipulation // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Vol. 17, N. 6, 2012. P. 1120–1132. DOI: 10.1109/TMECH.2011.2160074.
14. Бусурин В. И., Лю Чжэ, Кудрявцев П. С., Шлеенкин Л. А. Исследование двухканальной системы управления положением оптического преобразователя прецизионного бесконтактного сканирующего профилометра // Датчики и системы. 2020. № 9–10. С. 25–32.

Control of Contactless Profilometer for Scanning Surfaces of Complex Profile

V. I. Busurin, vbusurin@mai.ru, Liu Zhe, lzg599312@hotmail.com, P. S. Kudryavtsev, mpso121@mail.ru, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

Corresponding author: Kudryavtsev P. S., PhD, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: mpso121@mail.ru

Accepted on June 28, 2022

Abstract

The research problem of a surface's profile with an extended precision detail of irregular shape with a given accuracy is considered by the contactless scanning profilometer. The contact of the measuring block with a controlled surface needs to be excluded because of a possibility of damage of a product and, at the same time, to provide the necessary accuracy of assessment of its profile. For the solution of this task in work the double-circuit system containing two sensors is used: the distance converter on the basis of optical tunneling for the "exact" channel and the converter on the basis of a chromatic aberration for "rough" channel of scanning. It is shown that based on these measurements of the "rough" channel providing the guaranteed exception of contact of "rough" channel's contact with a surface of the studied product. It is possible to predict situation and traverse speed of the sensor of the "exact" channel for the purpose of an exception of contact with the studied surface and ensuring necessary accuracy of measurements. The mathematical model of a dynamic system of scanning based on a prior information about entering it elements and blocks is developed. The analysis of the main dynamic properties of a system of scanning is carried out and the law of its management providing the required quality of transition processes based on mathematical modeling is constructed. The algorithm of the forecast of the subsequent position of the sensor of the "exact" channel based on these measurements of "rough" channel, which provides the required speed and accuracy of scanning depending on the predicted object's surface profile height is developed. The flowchart of the algorithm determining the value of movement of the sensor of the "exact" channel in the vertical direction depending on the received assessment of measurements of "rough" channel is developed. The conducted researches allowed developing the block diagram of a double-circuit measuring system. Modeling of this system in the environment of MATLAB/SIMULINK, which allowed evaluating efficiency of its functioning for the different studied profiles was carried out. Results of modeling showed efficiency of the offered scheme of a profilometer's control system.

Keywords: Optical tunnel effect method, sensor position scanning system, the conversion function, precision profilometer, non-contact surface scanning

For citation:

Busurin V. I., Zhe L., Kudryavtsev P. S. Control of Contactless Profilometer for Scanning Surfaces of Complex Profile, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 10, pp. 529—535.

DOI: 10.17587/mau.23.529-535

References

1. Dvoynishnikov S. V., Anikin Yu. A., Kabardin I. K., Kulikov D. V., Meledin V. G. Optoelectronic method of contactless measurement of a profile of a surface of three-dimensional large-size objects of irregular shape, *Measuring equipment*, 2016, no. 1, pp. 13—17.
2. Böckmann H., Liu S., Müller, M., Hammud A., Wolf M., Kumagai T. Near-Field Manipulation in a Scanning Tunneling Microscope Junction with Plasmonic Fabry-Pérot Tips., *Nano Lett.*, 2019, vol 19, no.6.
3. Chen C. Introduction to Scanning Tunneling Microscopy, Oxford University Press, 2021, 528 p.
4. Voigtländer B. Scanning Probe Microscopy (Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy), Springer, 2015, 382 p.
5. Xuan Z., Wu R., Tuan C., Chao D., Huixia G., Huanhuan L. Design of High-speed and High-precision Scanning Galvanometer Control System Based on FPGA + DSP Architecture, *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC)*, 2021, pp. 3455—3459, DOI: 10.1109/ISPEC53008.2021.9735706.
6. Optical profilometer based on microinterferometer MII-4M [Electronic resource], CJSC Diffraktion, Novosibirsk, available at: <http://www.diffraktion.ru/products-ru/mii-4>.
7. Palomer A., Ridao P., Forest J., Ribas D. Underwater laser scanner: ray-based model and calibration, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 24, no. 5, 2019, pp. 1986—97.
8. Jin L., Li L. Optical driven electromechanical transistor based on tunneling effect, *Optics Letters*, 2015, vol. 40, iss. 8, pp. 1798—1805.
9. An Y., Li B., Hu H., Zhou X. Building an omnidirectional 3-D color laser ranging system through a novel calibration method, *IEEE Trans Ind Electron*, vol. 66, no. 11, 2019, pp. 8821—8831.
10. Zheng Q., Chen L., Han Z. A non-contact swing-arm profilometer with the spectrally-resolved-interferometry distance sensor, *Engineering Research Express*, 2020, vol. 2, no. 1.
11. Guo L., Wang H., Wang C., Lin Z. Optical Path Scanning Control System Based on Repetitive Control and PI Control, *Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, 2018, pp. 1071—1074, DOI: 10.1109/IMCCC.2018.00223.
12. Lei P., Zheng L. An automated in-situ alignment approach for finish machining assembly interfaces of large-scale components, *Robot Comput Integr Manuf.*, 2017, vol. 46, pp. 130—43.
13. Li Y., Xu Q. Design and Robust Repetitive Control of a New Parallel-Kinematic XY Piezostage for Micro/Nanomanipulation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, vol. 17, no. 6, pp. 1120—1132, DOI: 10.1109/TMECH.2011.2160074.
14. Busurin V. I., Zhe L., Kudryavtsev P. S., Shleenkin L. A. A research of double-circuit control system's position of optical converter precision contactless scanning profilometers, *Sensors and systems*, 2020, no. 9—10, pp. 25—32.