

В. И. Бусурин, д-р техн. наук, проф., vbusurin@mai.ru,

П. С. Кудрявцев, канд. техн. наук, доцент, mpso121@mail.ru, Лю Чжэ, слушатель, lzg599312@hotmail.com,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Исследование системы стабилизации сенсора бесконтактного сканирующего профилометра на основе метода оптического туннелирования

Исследуется система стабилизации положения сенсора бесконтактного сканирующего профилометра относительно исследуемой поверхности на основе оптического туннелирования. Решается задача подбора элементной базы, с помощью которой возможно реализовать необходимые требования по точности и качеству регулирования процесса перемещения сенсора. Также рассматривается и решается задача построения регулятора, компенсирующего нежелательные временные свойства контура измерений, который базируется на динамических звеньях, имеющих большие коэффициенты усиления и малые постоянные времени.

Ключевые слова: оптическое туннелирование, стабилизация, функция преобразования, профилометр, динамическая система, корректирующее звено

Введение

В профилометрах часто используют способ бесконтактного сканирования для получения данных о форме поверхности тел на основе оптических методов, например, на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ) или на основе хроматической аберрации [1, 2]. В процессе работы подобного сканирующего профилометра оптический сенсор движется вдоль тестируемой поверхности, не касаясь ее. При этом для обеспечения корректного считывания результатов измерений необходимо поддерживать зазор между оптическим сенсором и тестируемым телом постоянным и с высокой точностью, что возможно обеспечить только с помощью следящей системы. Если профиль исследуемой поверхности характеризуется перепадами высот в несколько нанометров, то для построения следящей системы можно использовать техническое решение, которое широко применяется в ближнепольной оптической микроскопии и основано на параметрической резонансной обратной связи с использованием дополнительного измерительного устройства [3]. Однако если профиль исследуемой поверхности характеризуется перепадами высот в десятки и сотни нанометров, то для построения следящей системы приходится брать информацию, получаемую непосредственно с оптического сенсора [4]. Сложности проектирования такой системы обусловлены нелинейной характеристикой сенсора, большими коэффициентами усиления преобразующих элементов и высокими требованиями к точности исполнительного устройства перемещения сенсора [1, 5]. Поэтому важными факторами успешного проектирования подобной следящей системы являются правильный выбор ее элементной базы, выбор структуры и параметров регулятора, обеспечива-

ющего требуемую динамику системы стабилизации при появления значительного перепада высот в профиле исследуемого тела.

Особенности системы стабилизации сенсора бесконтактного сканирующего профилометра

В общем виде система стабилизации субмикронного зазора на основе бесконтактного преобразователя приближения с оптическим туннелированием приведена на рис. 1.

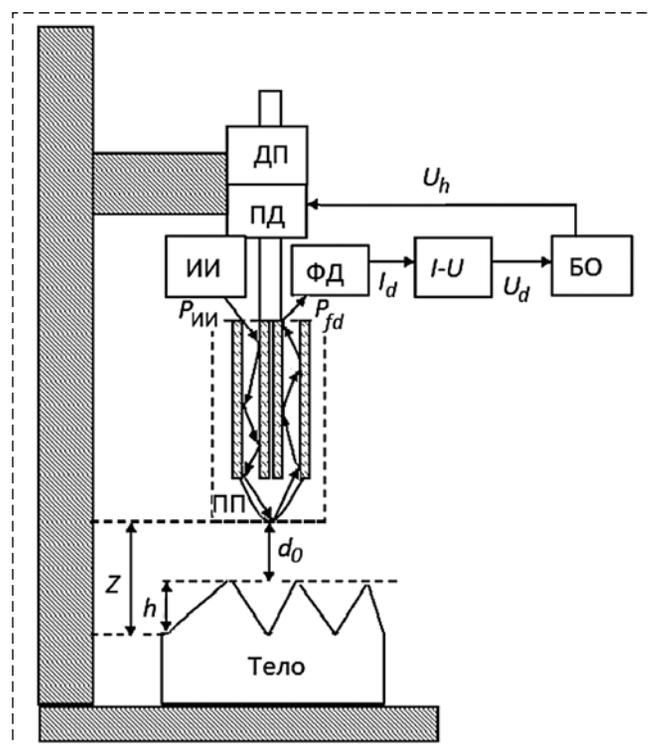


Рис. 1. Схема системы стабилизации зазора для бесконтактного сканирующего профилометра

Схема содержит следующие блоки: ИИ — источник оптического излучения; ПП — преобразователь приближения; ФД — фотоприемник; $I-U$ — преобразователь "ток—напряжение"; БО — блок обработки и управления; ПД — пьезоэлектрический двигатель; ДП — датчик перемещения. Сенсор бесконтактного профилометра движется вдоль осей OX и OY , не показанных на рис. 1. При этом поддерживается постоянным зазор d_0 между блоком ПП и исследуемой поверхностью по оси OZ . Так как зазор зависит от высоты рельефа поверхности тела, то для поддержания его постоянного значения в профилометре используют пьезодвигатель перемещения блока ПП, который обеспечивает зазор на заданном уровне d_0 . В процессе работы системы стабилизации зазора бесконтактный ПП, использующий эффект оптического туннелирования, преобразует значение текущего зазора d в изменение оптического излучения P_{fd} . На основе изменения величины P_{fd} формируется напряжение обратной связи U_d , которое затем используется для управления пьезодвигателем с учетом задающего напряжения U_{d_0} , линейно пропорционального значению d_0 . Одновременно датчик перемещения определяет изменение координаты по оси OZ по разности измерения текущей координаты Z и начальной координаты Z_0 , которая соответствует заданному начальному зазору d_0 и текущей высоте исследуемого рельефа h . Результаты измерения отображаются в устройстве отображения БО.

Таким образом, схему системы стабилизации зазора бесконтактного сканирующего профилометра на основе ОТЭ можно представить в виде, приведенном на рис. 2.

Рассмотрим особенности функционирования приведенной системы стабилизации. Обычно в качестве преобразователя приближения используется кварцевый сферический элемент на основе оптического туннельного эффекта [2—4]. Зазор d между сенсором и поверхностью тестируемого тела может меняться при движении сенсора над поверхностью тела. Уменьшение зазора приводит ко все большему поглощению оптической энергии тестируемым телом, т. е. к уменьшению выходного сигнала фотоприемника сенсора. На рис. 3 показан типовой график изменения отра-

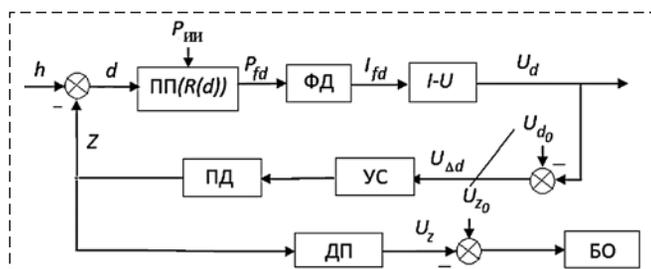


Рис. 2. Схема системы стабилизации зазора бесконтактного сканирующего профилометра на основе ОТЭ

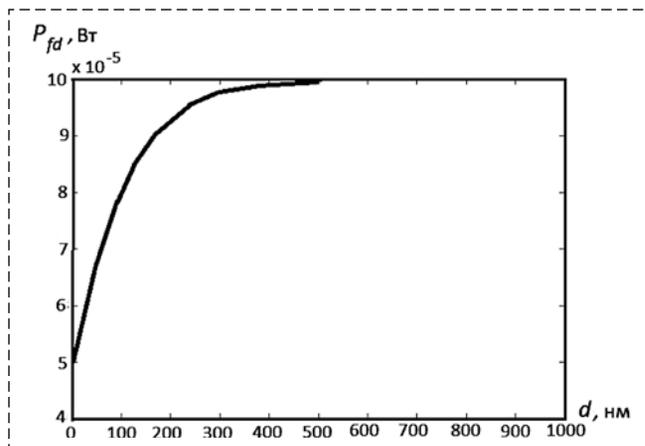


Рис. 3. Типовая зависимость отражательной способности P_{fd} от зазора d

жательной способности P_{fd} от зазора d . Подобную зависимость можно аппроксимировать с помощью следующей функции:

$$P_{fd,m} = (a - b \exp(-d/c)) \cdot 10^{-5},$$

где параметры a , b , c можно оценить по экспериментальным данным, например, с помощью метода наименьших квадратов [6].

В частности, для конкретной зависимости, приведенной на рис. 3, были получены следующие оценки:

$$a = 10, b = 5, c = 120.$$

Выбор базовых элементов системы стабилизации профилометра

Основным требованием при выборе фотоприемника является соответствие его спектральной чувствительности спектральной характеристике излучателя. Для преобразователя приближения зазора на основе ОТЭ целесообразно использовать кремниевые фотодиоды, имеющие линейную зависимость фототока от мощности падающего излучения, высокую термостабильность и малый нижний предел минимально детектируемой мощности [7]. Связь между изображением по Лапласу переменной U_d и изображением переменной d может быть записана в следующем виде:

$$U_d(s) = W_{iu}(s)W_{fd}(s)d(s),$$

где $U_d(s)$, $d(s)$ — изображения по Лапласу от переменных U_d , d ; s — комплексная переменная;

$W_{iu}(s) = \frac{k_{iu}}{T_{iu}s + 1}$ — передаточная функция преобразователя тока, измеряемого в амперах (А), фотоприемника к выходу преобразователя напряжения,

измеряемого в вольтах (В); K_{iu} — коэффициент усиления; T_{iu} — постоянная времени преобразователя; $W_{fd}(s) = \frac{k_{fd}}{T_{fd}s + 1}$ — передаточная функция фотоприемника, преобразующего входной поток излучения (Вт) в ток (А); k_{fd} — коэффициент усиления; T_{fd} — постоянная времени фотоприемника, причем коэффициент k_{fd} зависит от типа фотоприемника, от интенсивности $P_{ии}$ и типа светового излучателя.

Было проведено исследование динамических характеристик различных схем построения преобразователя на основе применения ряда известных фотоприемников и операционных усилителей. Для исследуемой установки был выбран фотодиод ФД324 с чувствительностью $S_{fd} = 0,4$ А/Вт, темновым током $I_T = 0,005$ мкА и постоянной времени $T_{fd} = 10$ нс [7], а для схемы преобразователя "ток—напряжение" на основе экспериментального анализа — быстродействующий операционный усилитель ОУ-154УД4.

На рис. 4 показаны переходные процессы в блоке преобразования энергии излучения в напряжение для различных типов операционных усилителей: 1 — ОУ-SL2541В, 2 — ОУ-154УД4 и 3 — ОУ-140УД6 [8, 9].

Из анализа данных переходных процессов видно, что:

- для усилителя ОУ-SL2541В характерно наличие значительных осцилляций выходного сигнала;
- для усилителя ОУ-154УД4 выходной сигнал имеет более ослабленные осцилляции;
- для усилителя ОУ-140УД6, наблюдается небольшое увеличение инерционности канала прямого преобразования при полном отсутствии осцилляций выходного сигнала.

В качестве исполнительного органа был выбран пьезоэлектрический двигатель на основе

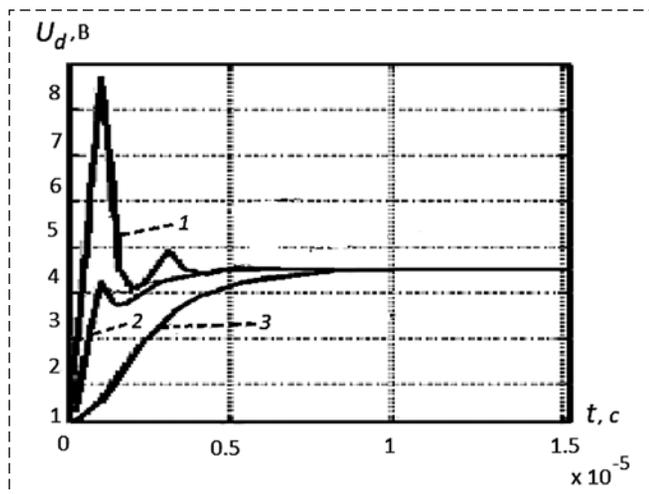


Рис. 4. Переходные процессы в блоке преобразования энергии излучения в напряжение

обратного пьезоэлектрического эффекта [10]. Выбранная модель пьезодвигателя обеспечивает максимальную скорость 10 мм/с, максимальное толкающее усилие $F_{pd} = 20$ Н и максимальное удерживающее усилие $N_{pd} = 22$ Н [11].

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

$$W_{pd}(s) = \frac{k_{pd}}{(T_{pd}s + 1)s}$$

В качестве датчика перемещения применяли компактную бесконтактную инкрементальную энкодерную систему, обеспечивающую работу со скоростью до 10 м/с и с разрешением до 1 нм как для линейных, так и для поворотных систем (система Tonic компании Renishaw) [12]. Передаточная функция датчика положения сенсора может быть записана в виде

$$W_{dp}(s) = \frac{k_{dp}}{T_{dp}s + 1}$$

Математическое моделирование системы стабилизации профилометра без корректирующего звена

На рис. 5 показана структурная схема системы стабилизации с передаточными функциями отдельных звеньев.

Численные значения параметров звеньев исследуемой системы стабилизации приведены в таблице.

k_{fd} , Вт/А	k_{iu} , А/В	k_y , В/В	k_{pd} , Нм/В	T_{fd} , с ⁻¹	T_{iu} , с ⁻¹	T_y , с ⁻¹	T_{pd} , с ⁻¹
0,4	$10 \cdot 10^4$	10	$4,42 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$

Анализ приведенной схемы системы показывает, что она имеет статический нелинейный

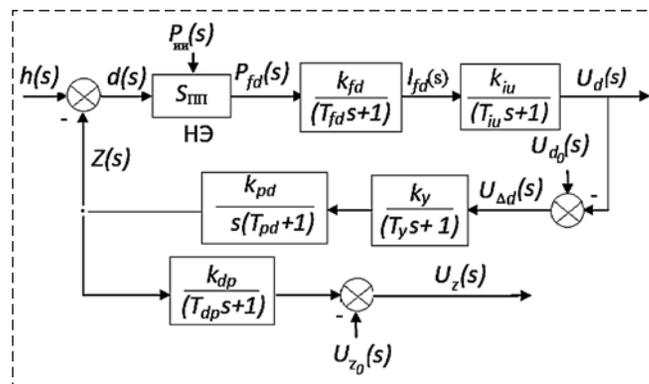


Рис. 5. Структурная схема системы стабилизации зазора для профилометра на основе ОТЭ

элемент и динамическую линейную часть, которая описывается передаточной функцией

$$W_{\text{лч}}(s) = \frac{k_{fd}k_{iu}k_yk_{pd}}{(T_{fd}s + 1)(T_{iu}s + 1)(T_y s + 1)s(T_{pd}s + 1)}$$

Уравнения состояния нелинейной системы стабилизации можно записать в матричной форме:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, d_0, h_0) \quad (1)$$

или в скалярной форме:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{x_1}{T_{fd}} + \frac{k_{fd}}{T_{fd}} P_{fd}(x_5, h); \\ \dot{x}_2 &= -\frac{x_2}{T_{i_u}} + \frac{k_{iu}}{T_{i_u}} x_1; \\ \dot{x}_3 &= -\frac{x_3}{T_y} + \frac{k_y}{T_y} (x_2 - U_d(d_0)); \\ \dot{x}_4 &= -\frac{x_4}{T_{pd}} + \frac{k_{pd}}{T_{pd}} x_3; \\ \dot{x}_5 &= x_4; \\ \dot{x}_6 &= -\frac{x_6}{T_{dp}} + \frac{k_{dp}}{T_{dp}} x_5, \end{aligned}$$

где d_0 — расстояние между сенсором и рельефом поверхности исследуемого тела в заданный момент времени; h_0 — подъем или спуск рельефа поверхности тела в заданный момент времени; $x_1 = x_1(t)$ — выход фотоприемника; $x_2 = x_2(t)$ — выход преобразователя ток—напряжение; $x_3 = x_3(t)$ — выход усилительного корректирующего звена; $x_4 = x_4(t)$ — скорость перемещения сенсора пьезодвигателем; $x_5 = x_5(t)$ — перемещение сенсора пьезодвигателем по оси OZ (с точностью до знака); $x_6 = x_6(t)$ — выход датчика перемещения;

$$\begin{aligned} P_{fd}(x_5, h) &= \left(a - b \exp\left(\frac{x_5 + h_0}{c}\right) \right) \cdot 10^{-5}; \\ U_d(d_0) &= k_{fd}k_{iu} \left(a - b \exp\left(\frac{-d_0}{c}\right) \right) \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

Следует отметить сложности интегрирования нелинейной системы уравнений (1). Данная система является, по сути, сингулярной, так как динамика отдельных ее звеньев описывается процессами с постоянными времени порядка $10^{-5} \dots 10^{-6}$ с, а динамика замкнутого контура имеет постоянную времени $10^{-4} \dots 10^{-2}$ с в зависимости от заданных величин d_0 и h_0 [13]. Поэтому в качестве основного средства интегрирования (решателя) при моделировании системы использовались методы, предназначенные для исследования "жестких" дифференциальных уравнений и имеющиеся в распоряжении пользователей среды MATLAB (функции ode15s и ode23s) [14].

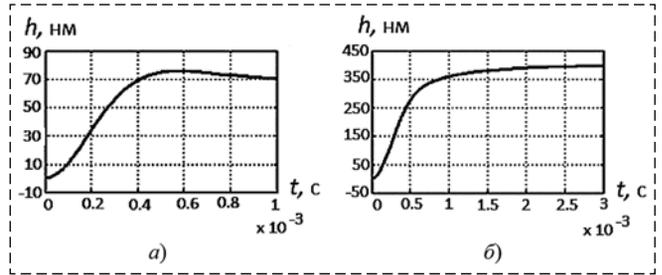


Рис. 6. Результаты моделирования нескорректированной нелинейной системы стабилизации:

а) $d_0 = 50$ нм, $h_0 = 20$ нм; б) $d_0 = 250$ нм, $h_0 = 150$ нм

Результаты моделирования работы системы стабилизации для различных значений d_0 и h_0 в среде Simulink/MATLAB при заданных параметрах модели, указанных в таблице, приведены на рис. 6.

Несложно заметить, что нелинейная система стабилизации является астатической, хотя пере-регулирование переходных процессов изменяется от 0...30 %, а время затухания переходных процессов $(0,8 \dots 5) \cdot 10^{-3}$ с при изменении значений $d_0 \in (10 \dots 350)$ нм.

Решение задачи построения корректирующего устройства

Построим класс линеаризованных моделей в диапазоне изменения задающего воздействия $d_0 \in (0 \dots 500)$ нм и возмущающего воздействия $h_0 \in (0 \dots 300)$ нм. Для построения линеаризованной модели при известном задающем воздействии d_0 и возмущении h_0 необходимо вычислить решение уравнений, определяющих положение точки равновесия и соответствующие данной точке равновесия матрицы Якоби линеаризованной системы. Положение равновесия x_{st} системы уравнений (1) определяется с помощью решения алгебраического уравнения:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{st}, d_0, h_0) = 0.$$

Компоненты единственного решения равны:

$$\begin{aligned} x_{st,2} &= U_d(d_0), x_{st,1} = x_{st,2}/k_{iu}, x_{st,3} = 0, x_{st,4} = 0, \\ x_{st,5} &= \ln((a - x_{st,1} \cdot 10^5/k_{fd})/b) - h_0, x_{st,6} = x_{st,5}/k_{dp}. \end{aligned}$$

Тогда уравнения линеаризованной системы уравнений можно записать в общем виде:

$$\begin{aligned} \delta \dot{\mathbf{x}} &= \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}, d, h)}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{st} \\ d=d_0 \\ h=h_0}} \delta \mathbf{x} + \\ &+ \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}, d, h)}{\partial d} \Big|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{st} \\ d=d_0 \\ h=h_0}} \delta d + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}, d, h)}{\partial h} \Big|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{st} \\ d=d_0 \\ h=h_0}} \delta h, \end{aligned}$$

где $\delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{st}$, $\delta d = d - d_0$, $\delta h = h - h_0$; x_{st} — вектор состояния нелинейной системы, соответствующий положению равновесия при d_0 и h_0 .

Для численного вычисления соответствующих матриц Якоби был использован известный алгоритм, который не входит в состав стандартных функций среды MATLAB [15].

Проведенные исследования показали, что в исследуемом диапазоне изменения задающего воздействия $d_0 \in (0...500)$ нм и возмущающего воздействия $h_0 \in (0...300)$ нм все линеаризованные модели являются устойчивыми.

Проведенные исследования для линеаризованной модели системы стабилизации показали, что откорректированную передаточную функцию усилителя целесообразно реализовывать в виде

$$W_y(s) = \frac{k_y(T_d s + 1)}{(T_y s + 1)},$$

где $k_y = 8$, $T_d = 0,001$.

На рис. 7 приведены нормированные переходные процессы замкнутой линеаризованной системы при разных значениях d_0 и h_0 .

Переходные процессы в замкнутой нелинейной системе стабилизации при использовании выбранного корректирующего звена показаны на рис. 8.

Таким образом, полученные результаты показывают, что включение корректирующего звена позволяет избежать значительного перерегулирования в замкнутой системе при малых значениях d_0 при незначительном увеличении длительности переходных процессов, а также уменьшить длительность переходных процессов при больших значениях d_0 и h_0 .

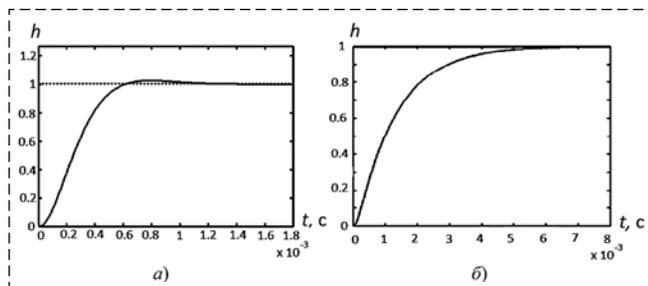


Рис. 7. Нормированные переходные процессы в линеаризованной системе стабилизации:

а) $d_0 = 50$ нм, $h_0 = 20$ нм; б) $d_0 = 250$ нм, $h_0 = 150$ нм

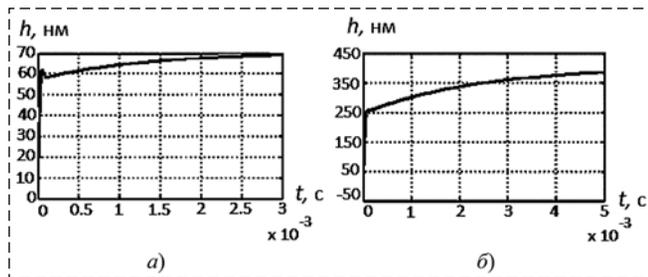


Рис. 8. Переходные процессы в нелинейной системе при включении в замкнутый контур управления корректирующего звена:

а) $d_0 = 50$ нм, $h_0 = 20$ нм; б) $d_0 = 250$ нм, $h_0 = 150$ нм

Полученные результаты исследования могут быть применены для проектирования нелинейных систем, содержащих в своем контуре несимметричные нелинейные статические элементы, в том числе для систем стабилизации оптических профилометров нанометрического диапазона на основе ОТЭ. В статье показано, что использование откорректированной замкнутой системы стабилизации с надлежащим выбором ее элементарной базы дает возможность на основе стандартных правил формирования структуры и параметров робастного регулятора для многорежимных линеаризованных моделей формировать замкнутую нелинейную систему, позволяющую получать информацию о высоте неровностей поверхности, без повышенного риска ударов оптического датчика об исследуемое тело.

Список литературы

1. Рыжевич А. А., Солоневич С. В., Хило Н. А., Лепарский В. Е. Лазерный профилометр для определения качества поверхности // Матер. 9-й Междунар. конф. "Взаимодействие излучений с твердым телом", 20–22 сентября Минск, 2011 г. С. 448–450.
2. Nano-Optics and Near-Field Optical Microscopy / Ed. by Zayats A., Richards D. Boston: Artech House, 2009. 379 p.
3. Shubeita G. T., Sekatskii S. K., Riedo B., Dietler G. Scanning Near-Field Optical Microscopy based on the Heterodyne Phase-Controlled Oscillator Method // Journal of Applied Physics. 2000. Vol. 88, N. 5. P. 2921–2927.
4. Handbook of Nano-Optics and Nanophotonics. M. Springer, 2013. 1068 p.
5. Бусурин В. И., Лю Чжэ, Ахламов П. С., Бердюгин Н. А. Исследование бесконтактного оптического преобразователя приближения мехатронной системы стабилизации зазора сканирующего профилометра // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 1. С. 43–47.
6. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математическо-статистической теории обработки наблюдений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1958. 338 с.
7. Шуберт Ф. Светодиоды. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
8. Операционный усилитель ОУ-SL2541В. URL: http://www.datasheetlib.com/datasheet/1270687/sl2541b_plessey-semiconductors.html (дата обращения 28.01.2017).
9. Операционный усилитель ОУ-154УД4, ОУ-140УД6. URL: <http://www.chipinfo.ru>, (дата обращения 28.01.2017).
10. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2011. 134 с.
11. Пьезодвигатель "Piezolegs". URL: <http://www.piezomotor.com>, (дата обращения 28.01.2017).
12. Бесконтактная инкрементальная энкодерная система "Tonic". URL: <http://www.renishaw.ru> (дата обращения 28.01.2017).
13. Геращенко Е. И., Геращенко С. М. Метод разделения движений и оптимизация нелинейных систем. М.: Наука, 1975. 296 с.
14. Черных И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений / Под ред. В. Г. Потемкина М.: Диалог-МИФИ, 2004. 496 с.
15. D'Errico J. Numerical Differentiation: Function Jacobianest. URL: <http://www.mathworks.com> (дата обращения 28.01.2017).

Investigation of the Sensor Stabilization System for Non-Contact Scanning Profilometer Based on the Optical Tunneling Method

V. I. Busurin, Doctor of Engineering Science., professor, vbusurin@mai.ru✉,
P. S. Kudryavtsev, Technical sciences, associate professor, mpso121@mail.ru
Liu Zhe, Trainee, lzg599312@hotmail.com
Moscow Aviation Institute (National Research University)
Volokolamskoe shosse, d. 4, g. Moskva, A-80, GSP-3, 125993

Corresponding author: **Busurin Vladimir I.**, D. Sc.,
Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Russian Federation,
e-mail: vbusurin@mai.ru

Accepted on

Non-contact profilometer often use scanning method to obtain data about the shape of the surface of the body. In this paper, present investigation and modeling of stabilization gap for non-contact optical profilometer based on the optical tunneling effect (OTE) in the dynamic mode based on the characteristics of its constituent blocks. In operation of such a scanning optical profilometer transducer moves along the test surface, without touching it. To ensure a correct reading of the measurement results is necessary to maintain the gap between the optical module and the test approach permanent body with high accuracy. For this proposed use of tracking feedback system that provides the stabilization of nanometer gap. This allows you to receive signals, depending on the topography of the surface, and on this basis to build a height map. The system of non-contact profilometer stabilization gap comprises a converter approach based OTE, photodetector, the convertor "current — voltage", the height of the surface of the sensor and a piezomotor. In the process of stabilizing the converter system converts approximations gap d changes in the optical radiation P_{fd} , and formed a feedback voltage $U_{os,d}$. According to the difference of voltage $U_{os,d}$ and master voltage U_{d0} , increments are obtained voltage DU_d , which provides piezomotor control applied to traffic proximity transducer that provides stabilization of the gap d at a given initial level d_0 . System of this problems solve the task of selection circuitry, which managed to implement the necessary requirements for the quality of regulation and the task of building a regulator, by compensating unwanted temporal properties of the contour measurement, which is based on dynamic links with large gains and small time constants.

Keywords: Optical tunneling, stabilization, conversion function, profilometer, dynamic system

For citation:

Busurin V. I., Kudryavtsev P. S., Liu Zhe. Investigation of the Sensor Stabilization System for Non-Contact Scanning Profilometer Based on the Optical Tunneling Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 80—85.

DOI: 10.17587/mau.19.80-85

References

1. Ryzhevich A. A., Solonevich S. V., Hilo N. A., Leparskij V. E. *Lazernyj profilometr dlya opredeleniya kachestva poverhnosti* (Laser profilometer for determination of surface quality), 9th International Conference "Interaction of Radiations with a Solid", September 20—22 Minsk, 2011, pp. 448—450 (in Russian).
2. Zayats A., Richards D. ed. *Nano-Optics and Near-Field Optical Microscopy*, Boston: Artech House, 2009, 379 p.
3. Shubeita G. T., Sekatskii S. K., Riedo B., Dietler G. Scanning Near-Field Optical Microscopy based on the Heterodyne Phase-Controlled Oscillator Method, *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 88, no. 5, pp. 2921—2927.
4. Ohtsu M. ed. *Handbook of Nano-Optics and Nanophotonics*, Springer, 2013, 1068 p.
5. Busurin V. I., Liu Zhe, Akhlamov P. S., Berdyugin N. A. *Issledovanie beskontaktnogo opticheskogo preobrazovatelya priblizheniya mekhatronnoj sistemy stabilizatsii zazopa skaniruyushchego profilometra* (Investigation of the contactless optical converter of the approximation of the mechatronic system for the stabilization of the clearance of the scanning profilometer), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 43—47 (in Russian).
6. Linnik Yu. V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematicheskostatisticheskoy teorii obrabotki nablyudenij* (The method

of least squares and the foundations of the mathematical-statistical theory of processing observations), Moscow, FIZMATLIT, 1958, 338 p. (in Russian).

7. Schubert F. *Svetodiody* (Light-emitting diodes), Moscow, FIZMATLIT, 2008. 496 p. (in Russian).

8. **Operational** amplifier OY-SL2541B (Operacionnyj usilitel' OU-SL2541B), available at: http://www.datasheetlib.com/datasheet/1270687/sl2541b_plessey-semiconductors.html (date of access January 28, 2017).

9. **Operational** amplifier OY-154UD4, OY-140UD6 (Operacionnyj usilitel' OU-154UD4, OU-140UD6), available at: <http://www.chipinfo.ru>, (date of access 01/28/2017).

10. Bobtsov A. A., Boykov V. I., Bystrov S. V., Grigoryev V. V. *Ispolnitel'nye ustrojstva i sistemy dlya mikroperemeshchenij* (Implementing devices and systems for micro spaces), S. Peterburg, SPB GU ITMO, 2011, 134 p. (in Russian).

11. *P'ezodvigatel' "Piezolegs"* (Piezo motor "Piezolegs"), available at: <http://www.piezomotor.com> (date of access January 28, 2017).

12. *Beskontaktnaya inkremental'naya ehkodernaya sistema "Tonic"* (Non-contact incremental encoder system "Tonic"), available at: <http://www.renishaw.ru> (date of access on 01/28/2017).

13. Gerashchenko E. I., Gerashchenko S. M. *Metod razdeleniya dvizhenij i optimizatsiya nelinejnyh system* (The method of separation of motions and optimization of nonlinear systems), Moscow, Nauka, 1975, 296 p.

14. Chernykh I. V. *Simulink: sreda sozdaniya inzhenernyh prilozhenij* (Simulink: the environment for creating engineering applications), Moscow, Dialog-MIFI, 2004, 496 p. (in Russian).

15. D'Errico J. Numerical Differentiation: Function Jacobianest, available at: <http://www.mathworks.com> (date of access January 28, 2017).