

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 621.3049.77

В. И. Бусурин, д-р техн. наук, профессор, vibusurin@mega.ru, **Лю Чже**, аспирант,
П. С. Ахламов, инженер, pakhlamov@hotmail.com, **Н. А. Бердюгин**, инженер, ber.nikolaj2012@yandex.ru,
Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Исследование бесконтактного оптического преобразователя приближения мехатронной системы стабилизации зазора сканирующего профилометра

Рассмотрена структура системы стабилизации зазора сканирующего профилометра с бесконтактным оптическим преобразователем приближения на основе оптического туннелирования, который может быть дополнением к широко применяющимся сканирующим атомно-силовым и туннельным микроскопам, главным недостатком которых является малый рабочий зазор (расстояние от тела до сканирующей иглы), что может привести к повреждению поверхности тела или к поломке сканирующей иглы. Предложена математическая модель преобразователя приближения на основе оптического туннелирования с рабочим диапазоном в сотни нанометров и проведено исследование отражательной способности преобразователя при различных конструктивных параметрах.

Ключевые слова: первичный преобразователь, профилометр, система стабилизации, зазор, оптическое туннелирование, функция преобразования, фотоприемник

Введение

Сканирующие профилометры широко используются в технологических процессах изготовления прецизионных авиационных деталей сложной формы, оптических элементов систем технического зрения и т. п. Они предназначены для формирования модели профиля поверхности тел с помощью перемещаемой пробы и могут быть построены по методам контактного или бесконтактного измерения [1].

При контактном измерении проба сканирует по поверхности измеряемого тела по двум координатным осям, и определяется ее перемещение по третьей координатной оси, которое преобразуется в выходной электрический сигнал. Этот метод имеет ряд недостатков, а именно: нужно иметь высокочувствительные датчики; проба может оцарапать поверхность измеряемого тела; контактный метод не может быть использован для измерения профиля мягких и жидких тел.

Бесконтактные профилометры используют оптические или емкостные методы, а также методы сканирующей электронной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии. В процессе работы сканирующего зондового микроскопа проба движется вдоль тестируемой поверхности, и, например, туннельный ток поддерживается стабильным за счет действия обратной связи. При этом показания следящей системы меняются в зависимости от топографии поверхности. Такие изменения фиксиру-

ются, и на их основе строится карта высот. Одним из основных узлов мехатронной системы стабилизации зазора является бесконтактный преобразователь приближения.

В настоящее время широко используются так называемые сканирующие атомно-силовые микроскопы (САСМ). Главным недостатком САСМ является очень маленький рабочий зазор (около 10 нм) [1], что может привести к повреждению пробы, поломке сканирующей головки (иглы), а также к неточностям при построении модели. Зарубежными и отечественными учеными и исследователями предложены различные подходы для решения данной проблемы. В данной статье рассмотрен вариант построения модели с помощью сканирующего профилометра с увеличенным зазором за счет использования оптического туннелирования.

Структура системы стабилизации зазора бесконтактного оптического преобразователя приближения на основе оптического туннелирования

Обобщенная функциональная схема бесконтактного сканирующего профилометра содержит блок измерения, блок обработки и управления, датчик перемещения, исполнительные органы (рис. 1) [2].

Структурная схема мехатронной системы стабилизации зазора бесконтактного сканирующего профилометра приведена на рис. 2.

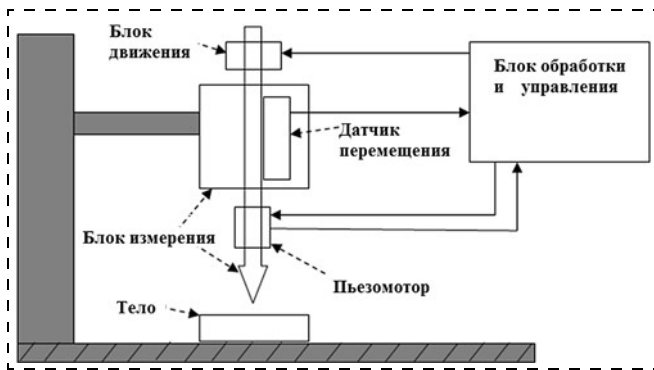


Рис. 1. Функциональная схема бесконтактного сканирующего профилометра

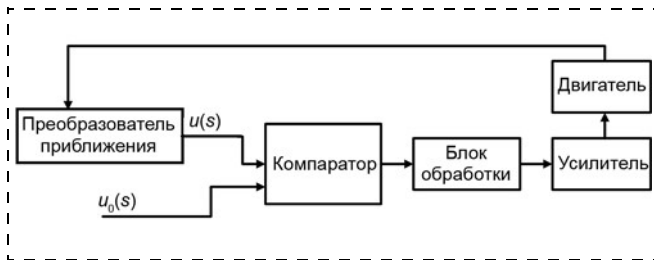


Рис. 2. Схема управления профилометра бесконтактного измерения

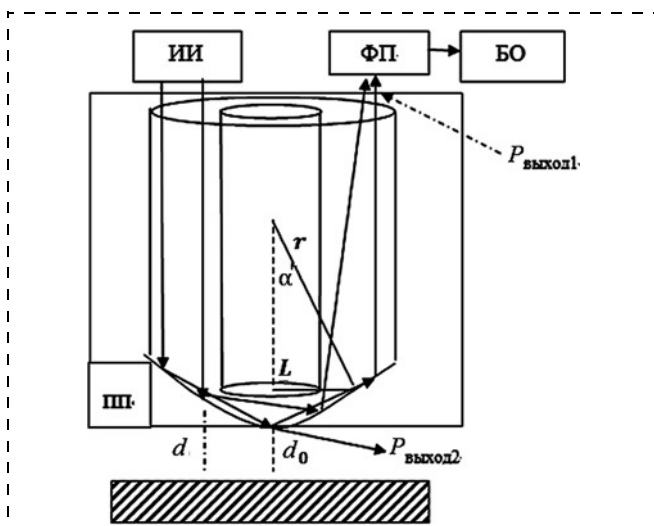


Рис. 3. Структура преобразователя приближения на основе оптического туннельного эффекта

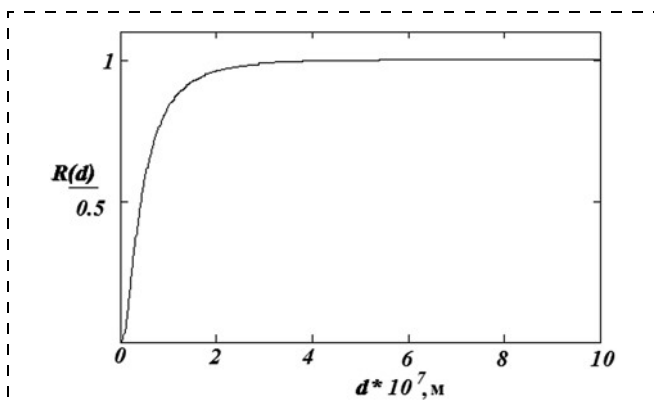


Рис. 4. Зависимость отражательной способности \$R(d)\$ от зазора \$d\$

Для бесконтактного измерения субмикронных зазоров можно использовать оптический туннельный эффект, который обеспечивает регистрацию изменения взаимного положения тел в диапазоне до сотен нанометров.

На рис. 3 показана структура бесконтактного оптического преобразователя приближения на основе оптического туннелирования. Он состоит из источника излучения (ИИ), первичного преобразователя (ПП), фотоприемника (ФП) и блока обработки (БО). Оптический туннельный эффект в волновой оптике заключается в проникновении световой волны внутрь отражающей среды (на расстояния порядка длины световой волны) в условиях, когда, с точки зрения геометрической оптики, происходит полное внутреннее отражение.

Первичный преобразователь использует кварцевый сферический элемент и метод измерения на основе оптического туннельного эффекта [3]. Расстояние между пробой и тестируемой поверхностью составляет менее длины волны используемого оптического излучения. Зазор между пробой и поверхностью тестируемого тела может меняться под действием перемещения тела, что приводит к изменению отраженной части оптического излучения. Уменьшение зазора \$d\$ приводит ко все большему проникновению оптического излучения через оптический сферический элемент и поглощению оптической энергии тестируемым телом, т. е. к уменьшению выходного сигнала фотоприемника преобразователя приближения.

Математическая модель бесконтактного преобразователя приближения

Функция преобразования первичного преобразователя определяется зависимостью $P = f(d)$ мощности оптического излучения \$P\$ от зазора \$d\$.

Изменение мощности выходного излучения можно оценить по отражательной способности модулируемой границы сред, т. е. по отношению мощности отраженного излучения к мощности падающего. На рис. 4 показана зависимость отражательной способности \$R(d)\$ одного оптического луча от зазора \$d\$.

Интегральные изменения отражательной способности с одним отражением от модулируемой границы для неполяризованной оптической волны могут быть определены с учетом формы чувствительного элемента первичного преобразователя. Схема бесконтактного первичного преобразователя на основе оптического туннельного эффекта со сферическим чувствительным элементом показана на рис. 5. Зазор \$d\$ можно определить как

$$d = d_0 + \Delta d, \quad (1)$$

где $\Delta d = r - \sqrt{r^2 - \rho^2}$.

Изменения приращений зазора от координаты на чувствительном элементе показаны на рис. 6.

С учетом отражательной способности R , зависящей от зазора d , мощность оптического излучения $P_{\text{ФП}}$ на фотоприемнике определяется как

$$P_{\text{вых}} = \frac{P_{\text{ии}}}{S_{\text{сумм}}} \int_0^{2\pi} \int_0^L R(d_0 + \Delta d) \rho d\rho d\varphi. \quad (2)$$

С учетом уравнения (1) можно получить выражение для суммарной выходной мощности оптического излучения:

$$P_{\text{вых.сум1}} = \frac{P_{\text{ии}}}{S_{\text{сумм}}} \int_0^{2\pi} \int_0^L R(d_0 + r - \sqrt{r^2 - \rho^2}) \rho d\rho d\varphi, \quad (3)$$

где $P_{\text{ии}}$ — оптическая мощность источника излучения; $S_{\text{сумм}}$ — суммарная площадь поверхности тела, $S_{\text{сумм}} = \pi L^2$; r — радиус сферы, $r = \frac{L}{\sin \alpha}$; ρ, φ — полярные координаты; L — максимальный размер радиуса ρ ; d_0 — начальный зазор; Δd — приращение зазора; α — центральный угол сферы.

Поглощенную мощность оптического излучения $P_{\text{вых.сум2}}$ можно определить как

$$P_{\text{вых.сум2}} = P_{\text{ии}} - P_{\text{вых.сум1}}. \quad (4)$$

Результаты моделирования зависимости интегральной выходной и поглощенной оптической мощности от значения зазора показаны на рис. 7 и рис. 8 соответственно. Функции преобразования рассчитывали при следующих параметрах: $n_1 = 1,53$ (световод); $n_{11} = 1,45$ (оболочка); $n_2 = 1,0$ (воздушный зазор); $\lambda = 1,31 \cdot 10^{-6}$ м, $L = 1,2 \cdot 10^{-4}$ м (максимальный размер радиуса).

Исследование влияния конструктивных параметров преобразователя приближения на функцию преобразования

Изменяя значения конструктивных параметров преобразователя приближения, определим их влияние на функцию преобразования.

Уменьшение размера сегмента сферы L приводит к получению большей модуляции выходной оптического сигнала. Изменения интегральной выходной мощности оптического излучения $P_{\text{выход1}}$ при изменениях размера сегмента сферы L показаны на рис. 9.

Если неизменным оставить размер сегмента сферы L , то при увеличении радиуса сферы r интегральная выходная мощность оптического излучения падает, и коэффициент модуляции оптического излучения увеличивается (рис. 10).

Если изменять материал, из которого изготовлена сфера (например, использовать различные стекла), то интегральная выходная мощность оптического излучения $P_{\text{вых.сум13}}$ будет уменьшаться при увеличении показателя преломления материала сферы (рис. 11).

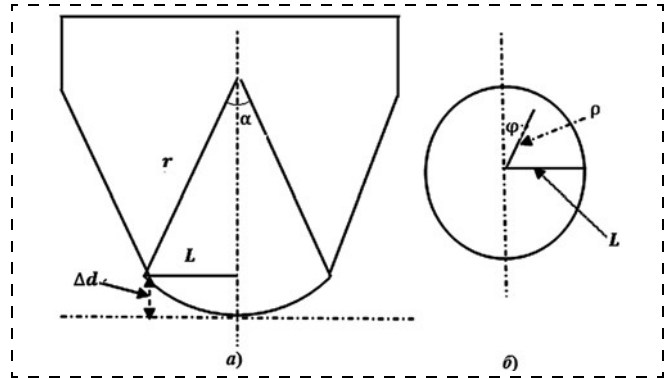


Рис. 5. Схема первичного преобразователя со сферическим чувствительным элементом: вид сбоку (а), вид сверху (б)

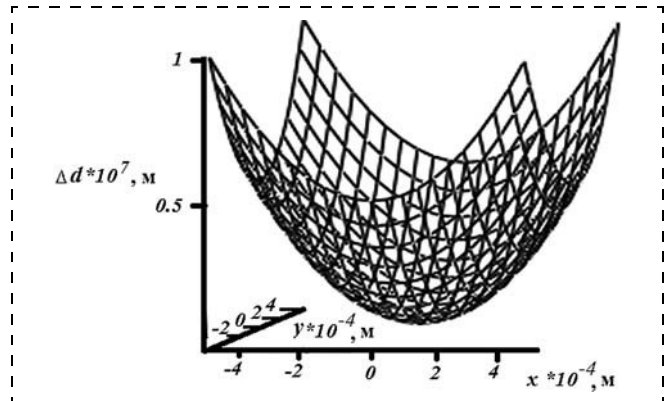


Рис. 6. Изменение приращения зазора d

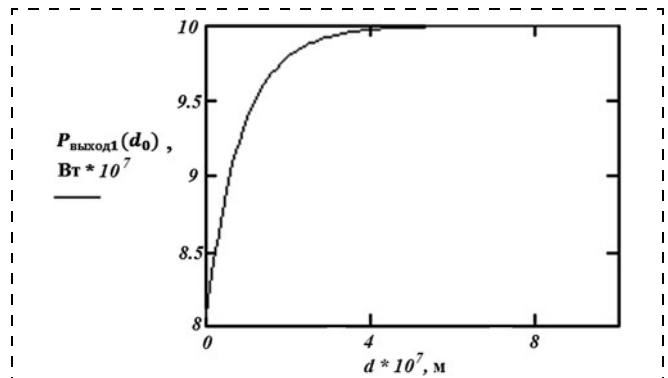


Рис. 7. Зависимость интегральной выходной мощности оптического излучения $P_{\text{вых.сум1}}$ от зазора d_0

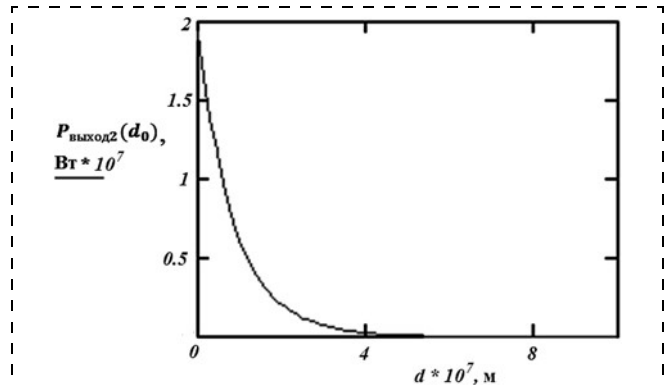


Рис. 8. Зависимость поглощенной мощности оптического излучения $P_{\text{вых.сум2}}$ от зазора d_0

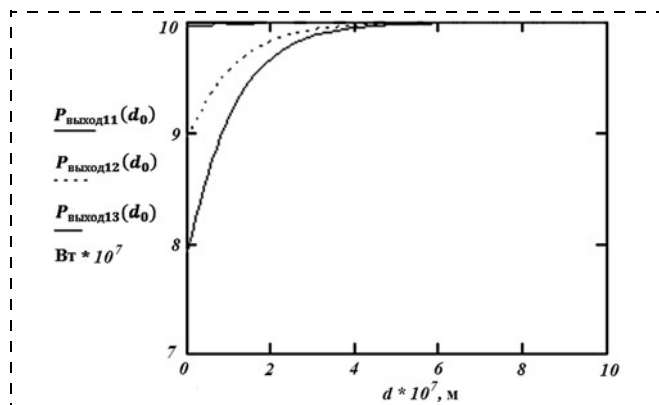


Рис. 9. Зависимость интегральной выходной мощности оптического излучения $P_{\text{выход1}}$ от зазора d_0 при различных размерах сегмента сферы:

$P_{\text{выход11}}(d_0)$ $L_1 = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м, $P_{\text{выход12}}(d_0)$ при $L_2 = 3 \cdot 10^{-4}$ м и $P_{\text{выход13}}(d_0)$ при $L_3 = 9 \cdot 10^{-3}$ м

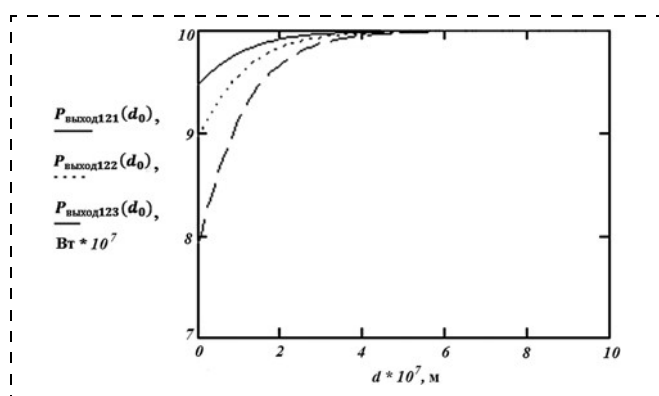


Рис. 10. Зависимость интегральной выходной мощности оптического излучения $P_{\text{выход1}}$ от зазора d_0 при различных радиусах сферы:

$P_{\text{выход121}}(d_0)$ при $r_{11} = 4,298 \cdot 10^{-3}$ м, $P_{\text{выход122}}(d_0)$ при $r_{12} = 8,595 \cdot 10^{-3}$ м и $P_{\text{выход123}}(d_0)$ при $r_{13} = 0,017$ м

Если изменяется числовая апертура, например, за счет изменения материала покрытия, то интегральная выходная мощность оптического излучения $P_{\text{вых.сум14}}$ будет уменьшаться при уменьшении числовой апертуры (рис. 12).

Рабочий диапазон преобразователя приближения на основе оптического туннелирования составляет несколько сотен нанометров и примерно на порядок больше, чем при использовании атомно-силового метода. Оценка сил межмолекулярного взаимодействия показывает, что они составляют порядка пиконьютонов, и вызываемые ими деформации преобразователя приближения могут не учитываться.

Заключение

В статье исследованы характеристики бесконтактного оптического преобразователя приближения системы стабилизации зазора сканирующего профилометра, оценено влияние конструктивных параметров на выходную мощность преобразователя. Показано, что при увеличении радиуса сферы,

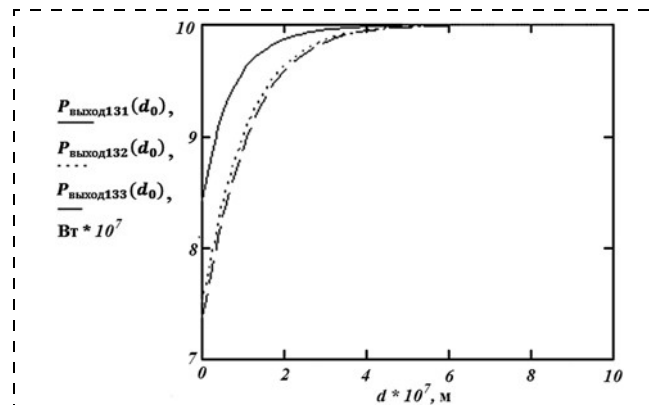


Рис. 11. Зависимость интегральной выходной мощности оптического излучения $P_{\text{выход13}}$ от зазора d_0 :

$P_{\text{выход131}}(d_0)$ при $n_{11} = 1,47$, $P_{\text{выход132}}(d_0)$ при $n_{12} = 1,53$ и $P_{\text{выход133}}(d_0)$ при $n_{13} = 1,55$

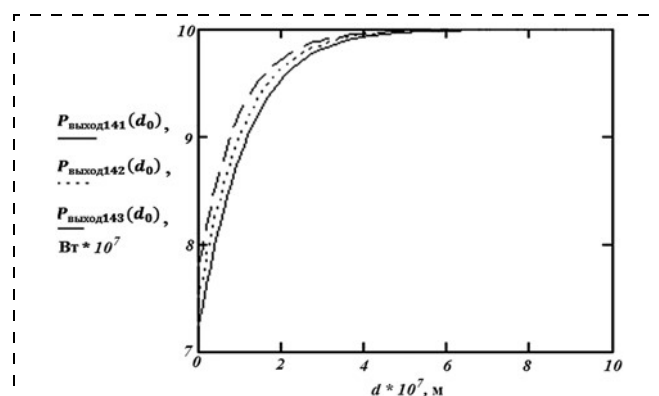


Рис. 12. Зависимость интегральной выходной мощности оптического излучения $P_{\text{выход14}}$ от зазора d_0 при разных числовых апертурах:

$P_{\text{выход141}}(d_0)$ при $n_{\text{покp1}} = 1,43$, $P_{\text{выход142}}(d_0)$ при $n_{\text{покp1}} = 1,45$ и $P_{\text{выход143}}(d_0)$ при $n_{\text{покp1}} = 1,47$

показателя преломления материала, из которого изготовлена сфера, при уменьшении размера сегмента сферы и числовых апертур уменьшается интегральная выходная мощность. Оценка сил межмолекулярного взаимодействия, возникающих при работе преобразователя приближения, показала, что их влиянием можно пренебречь. Предложенный преобразователь приближения может быть эффективно использован в тех случаях, где применение САСМ затруднено из-за их малого рабочего зазора, а также для измерения других механических величин, приводимых к наноперемещениям (ускорений, скоростей, сил и др.).

Список литературы

1. Gross L., Mohn F., Moll N., Liljeroth P., Meyer G. The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy // Science. 2009. № 325 (5944). P. 1110–1114.
2. Бусурин В. И., Князь В. А., Ходин М. М., Скрипник Н. П. Сканирующий профилометр для измерения профиля цилиндрических тел. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 2 (107). С. 36–42.
3. Бори М., Вольф Э. Основы оптики. 2-е изд. М.: Наука, 1972.

V. I. Busurin, Professor, vibusurin@mega.ru, Liu Zhe, Postgraduate
P. S. Akhlamov, Engineer, pakhlamov@hotmail.com,
N. A. Berdjugin, Engineer, ber.nikolaj2012@yandex.ru,
Moscow Aviation Institute (National Research University)

Research of Gap Mechatronic Stabilization System of Scanning Profilometer of Optical Non contact Approximation Transducer

The article describes the structure of the mechatronic system stabilization gap and mathematical model of non-contact optical approximation transducer based on optical tunneling effect.

Today so-called scanning atomic force microscopes (AFM) are widely used. The main disadvantage of AFM is very small working gap (about 10 nm to several picometers), that could cause damage to the object of measurement, breakage of the scanning head (needle), but also to inaccuracies in the model. Foreign and domestic scientists and researchers have proposed different approaches to solve this problem. In this paper we considered the option of constructing a model with a scanning profilometer with a larger gap.

Reflectivity of the transducer depending upon various design factors such as initial gap, radius of the sphere, size of the sphere is calculated and described. It is shown, that the dependence increase the radius of the sphere and the refractive index of the material of it, in case of reducing the size of a segment of the sphere and numerical apertures, leads to reduction of integral output power. Estimation of intermolecular interaction forces occurred with inverter operation approximation showed that their influence effect can be neglected. The proposed approximation transducer can be effectively used for other measurement of mechanical values, driven to nanoparameters, such as accelerations, speeds, forces etc.

Keywords: transducer, profilometer, mechatronic system, optical tunneling, conversion function

References

1. Gross L., Mohn F., Moll N., Liljeroth P., Meyer G. The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy. *Science*. 2009. N. 325 (5944). P. 1110—1114.

2. Busurin V. I., Knjaz V. A., Hodin M. M., Skripnik N. P. Skanirujushhij profilometr dlja izmerenija profilja cilindricheskih tel. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*. 2010. N. 2 (107). P. 36—42.
3. Born M., Volf E. *Osnovy optiki*. 2-e izd. M.: Nauka, 1972.

УДК 621.791; 519.6

А. И. Абрамов, канд. техн. наук, зав кафедрой, x1015@mail.ru,

Т. А. Мазитов, магистрант, gymit1991@yandex.ru,

Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова

Сравнительный анализ эффективности методов поиска стыка деталей при автоматической сварке

Проведен сравнительный анализ эффективности методов поиска стыка деталей при автоматической сварке двух типов: труба — пластина и пластина — пластина. Предложено четыре метода: корреляционный метод; использование нейросетей; аппроксимация прямыми; аппроксимация прямыми и окружностями после сегментации. Отмечаются достоинства и недостатки каждого метода, условия их адекватной работы.

Ключевые слова: MIG/MAG сварка, система слежения, триангуляция, метод наименьших квадратов, аппроксимация, нейроны, RANSAC

Введение

Для автоматического управления положением сварочной горелки (электрода) относительно свариваемого изделия или наплавляемой поверхности предложено большое число разнообразных следящих систем, однако в промышленности они применяются недостаточно широко. Это объясняется главным образом отсутствием или малой надежностью датчиков, пригодных для условий сварочного производства. Автоматизация сварочных операций с помощью следящих систем связана с разработкой способов и средств измерения фактического положения стыка или наплавляемой поверхности для

каждого экземпляра изделия. Выбор метода и состава технических средств автоматизации перемещения сварочного инструмента по линии шва зависит, прежде всего, от характера и объема информации, которая должна обрабатываться при управлении. В последнее время большое распространение получили оптические системы слежения триангуляционного типа [1, 2]. Они характеризуются высокой точностью, информативностью и надежностью.

Для решения задач технологической и геометрической адаптации не существует универсальной модели, подходящей для всех видов свариваемых стыков. Для автоматизации процесса сварки в ка-