

Поиск диагностических признаков для системы распознавания загрязнений контролируемых поверхностей изделий при оптико-электронном контроле

Лебедев А.С.^{1*}, Добролюбов А.Н.^{1}, Михайленко А.В.^{1***}, Безруков А.В.^{2*}**

*¹Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

*²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени
Д.Ф. Устинова, ул. 1-я Красноармейская, 1, Санкт-Петербург, 190005, Россия*

**e-mail: alexey2360@mail.ru*

***e-mail: alexdobr-spb@ya.ru*

****e-mail: tihaxis@mail.ru*

Статья поступила 28.05.2020

Аннотация

В данной статье рассматривается возможность использования теории распознавания образов применительно к оптико-электронному контролю качества поверхностей изделий авиационной и ракетно-космической техники для определения уровня их дефектов различного рода. Описаны основные этапы работы системы распознавания образов. Предложены классы нарушения и загрязнения контролируемых поверхностей, которые подлежат распознаванию. Приведены результаты измерений интенсивности отраженного света цифровых изображений контролируемых поверхностей. Предложено использовать в качестве признакового пространства признаки, основанные на статистиках первого порядка. Представлены полученные результаты расчетов для различных классов нарушения поверхностей.

Обоснован рабочий словарь признаков, который позволяет однозначно различать поверхности с шероховатостью и окислением от чистых и загрязненных смазочными материалами поверхностей.

Ключевые слова: контроль качества, искусственный интеллект, распознавание образов, словарь признаков, контролируемая поверхность, интенсивность света.

Введение

С начала XXI века произошли значительные изменения в вопросах обеспечения качества в различных отраслях машиностроения [1-3]. Невозможно обеспечить высокое качество продукции без обеспечения непрерывного контроля состояния рабочих поверхностей на протяжении жизненного цикла элементов изделий различного назначения, в особенности при их производстве и эксплуатации. На сегодняшний день при определении качественных параметров рабочих поверхностей изделий широкое применение находят оптико-электронные средства и методы неразрушающего контроля [4-7], работа которых во многом неразрывно связана с современными прогрессирующими технологиями искусственного интеллекта.

В настоящее время можно с уверенностью сказать, что роль искусственного интеллекта в совершенствовании и модернизации существующих на сегодняшний день методов, процедур и способов диагностирования сложных технических систем [8], обладает таким потенциалом, которого нет ни в одной другой технологии. При

этом из разряда интеллектуальных задач исключаются задачи, для которых существуют стандартные методы решения (например, все вычислительные задачи).

Одним из направлений искусственного интеллекта является задача распознавания образов [9]. В данной статье рассматривается возможность использования методов теории распознавания образов для определения различного рода дефектов.

Постановка задачи

Известно, что одним из важнейших (если не определяющим) этапов распознавания образов является определение рабочего словаря признаков. Очевидно, что если удастся разбить алфавит распознаваемых классов на непересекающиеся в пространстве словаря признаков области, то задача распознавания считается полностью решенной и не требует выработки в дальнейшем так называемого «решающего правила» для пересекающихся областей [10-17].

Выбор рабочего словаря признаков всегда является непростой задачей, поскольку требуется найти определенный компромисс между простотой, эффективностью и общностью (универсальностью) его применения.

Таким образом, описанное выше позволяет сделать вывод, что важной частью построения системы распознавания является поиск для данного алфавита классов словаря признаков, обеспечивающего в условиях ограниченных ресурсов системы распознавания максимальную эффективность (вероятность) распознавания.

Учитывая вышесказанное, рассмотрим задачу распознавания и классификации дефектов поверхностей, например, элементов ракетно-космической и авиационной техники при их производстве и эксплуатации, для которых качество рабочих поверхностей (чистота, шероховатость) зачастую бывает определяющей [18]. Дефекты, которые необходимо распознать представляют собой различные загрязнения (масло, следы окисления), а также различную шероховатость поверхности. Кроме того, важное значение имеет степень указанных загрязнений, которая оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства исследуемого элемента конструкции [19].

Экспериментальные исследования

В качестве распознаваемых классов (загрязнений) исследовались 4 типа поверхностей элементов изделий: чистая, окисленная (выдержкой под воздействием 90% раствора HCl от 1 до 3 часов), замасленная (нанесением на образец площадью $0,0024 \text{ м}^2$ 20, 40 и 60 мг) и имеющая шероховатости (повышенные параметры: высота неровностей профиля по десяти основным точкам R_z и среднее арифметическое отклонение профиля R_a). В свою очередь, замасленные, окисленные и шероховатые поверхности также разделялись по степени их загрязнения (таблица 1).

Таблица 1

Исходные данные (алфавит классов повреждения (загрязнения поверхности))

№ класса	Тип дефекта	Степень повреждения (загрязнения)
1	Чистая	соответствует ГОСТ
2	Масло	20 мг на площади 0,0024 м ²
3	Масло	40 мг на площади 0,0024 м ²
4	Масло	60 мг на площади 0,0024 м ²
5	Окисление	выдержка в 90% HCl 1 час
6	Окисление	выдержка в 90% HCl 2 часа
7	Окисление	выдержка в 90% HCl 3 часа
8	Шероховатость	$R_z = 6,3-10$ мкм, $R_a = 1,25-2,5$ мкм
9	Шероховатость	$R_z = 3,2-6,3$ мкм, $R_a = 0,63-1,26$ мкм
10	Шероховатость	$R_z = 2,6-3,2$ мкм, $R_a = 0,32-0,63$ мкм

Таблица 1 представляет собой ни что иное, как априорный алфавит классов, где каждому классу соответствует определенное повреждение или неисправность.

В качестве признакового пространства использовались отраженные от поверхности электромагнитные колебания оптического диапазона, трехмерные графики которых изображены на рисунке 1, где по оси Z откладывается интенсивность отраженного сигнала от поверхности исследуемого элемента изделия. Различным уровням интенсивности соответствует свой цвет.

Таким образом, в качестве признакового пространства для распознавания дефекта используются значения интенсивностей отраженных сигналов, которые формируются при оптико-электронной диагностике, например, при использовании цифровых видеокамер с оптическим увеличением (достаточно до 100 крат), оснащенных подсветкой. Отраженный от контролируемой поверхности свет фиксируется ПЗС-матрицей цифровой камеры [20, 21].

Обработанные результаты интенсивностей полученных цифровых изображений контролируемых поверхностей показаны на рисунке 1.

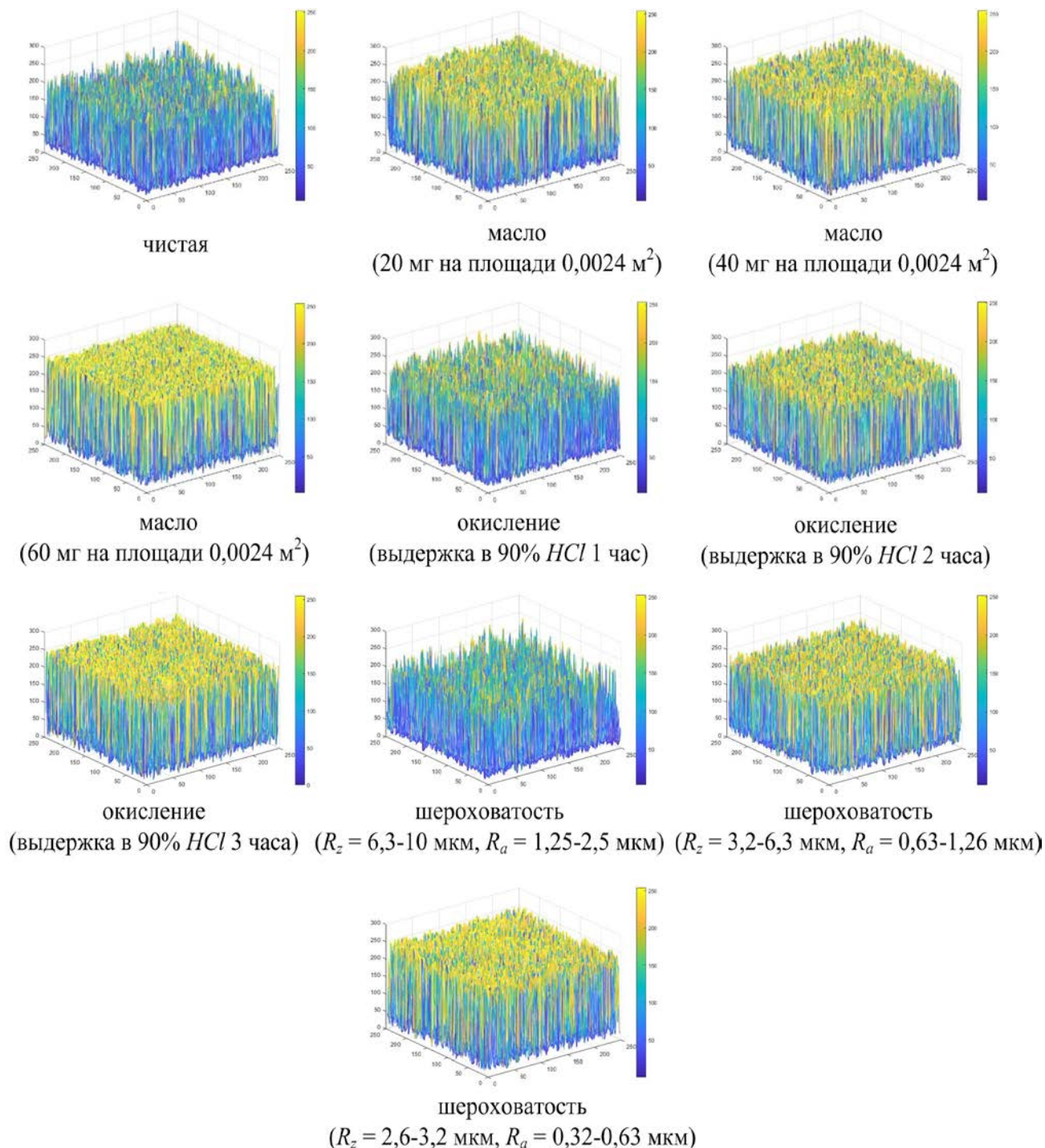


Рисунок 1. Трехмерные диаграммы результатов измерений интенсивностей отраженного света от контролируемых поверхностей, зафиксированные ПЗС-матрицей оптической системы для различных классов повреждений

Поиск диагностических признаков

Визуальный анализ представленных графиков не позволяет найти какие-либо детерминированные или структурные признаки, различающие эти сигналы. Более того, чисто визуально они выглядят как реализация каких-то случайных процессов.

Поскольку наиболее полной характеристикой случайного процесса является его функция распределения, были построены гистограммы, представляющие собой одномерные законы распределения вероятностей амплитуд, отраженных от контролируемых поверхностей сигналов, которые (в отличие от самих реализаций сигналов) уже имеют некоторые структурные отличия (рисунок 2).

Для того, чтобы формализовать процедуру различения (распознавания) предлагается использовать в качестве признакового пространства признаки, основанные на статистиках первого порядка (1-5):

Математическое ожидание (момент 1-го порядка):

$$m_1 = \sum_{j=0}^{N-1} I_j P(I_j), \quad (1)$$

где I_j – интенсивность отраженного сигнала; $P(I)$ – вероятность появления отраженного сигнала, N – количество точек (пикселей) цифрового изображения поверхности.

Центральный момент:

$$\mu_k = \sum_{j=0}^{N-1} (I_j - m_1)^k P(I_j), \quad (2)$$

где k – номер порядка момента.

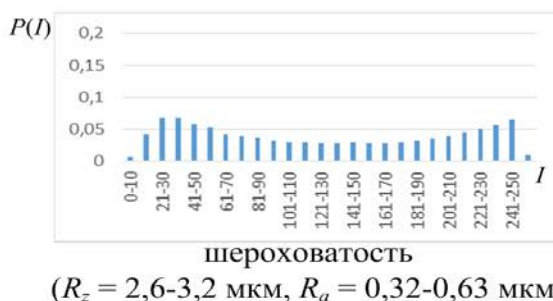
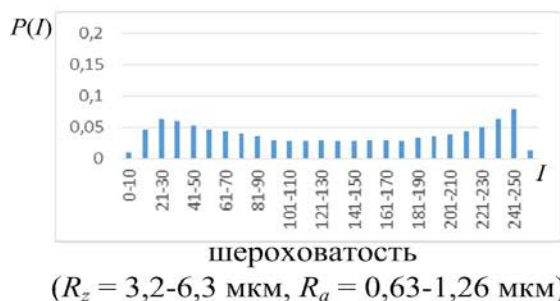
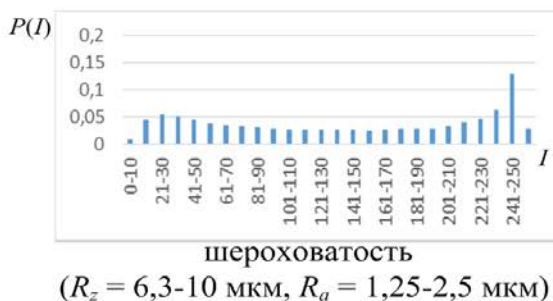
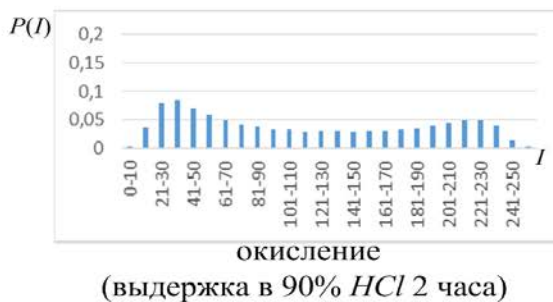
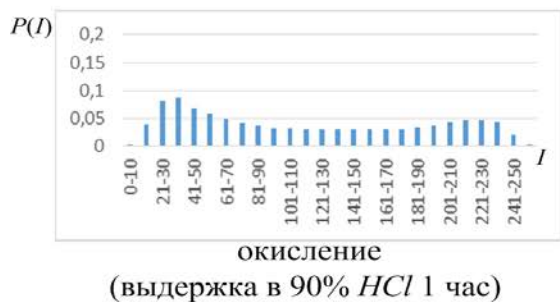
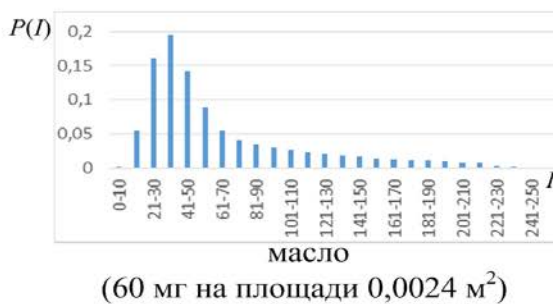
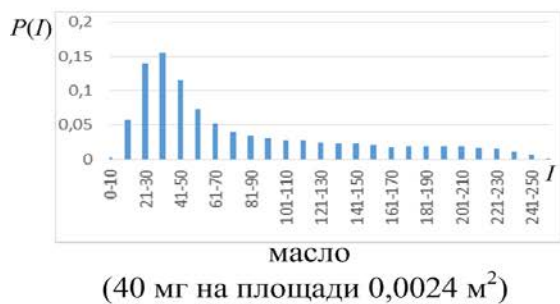
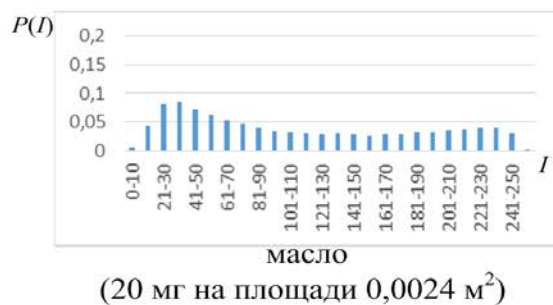
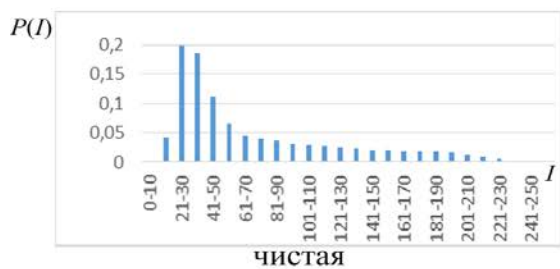


Рисунок 2. Гистограммы отраженных сигналов для различных классов повреждений: ($P(I)$ - вероятность появления отраженного сигнала, I - интенсивность отраженных сигналов)

Дисперсия:

$$\mu_2 = \sum_{j=0}^{N-1} (I_j - m_1)^2 P(I). \quad (3)$$

Коэффициент асимметрии:

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}}. \quad (4)$$

Коэффициент эксцесса:

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3. \quad (5)$$

Результаты расчетов представлены в таблицах 2-5 и на рисунках 3-6, откуда можно сделать следующие выводы.

Таблица 2

Полученные значения математического ожидания m_1 (момента 1-го порядка)

Значения m_1 для чистой поверхности	70.9078		
Значения m_1 при загрязнении маслом	111.8078 (20 мг на площади 0,0024 м ²)	80.5371 (40 мг на площади 0,0024 м ²)	64.8658 (60 мг на площади 0,0024 м ²)
Значения m_1 при окислении	117.6750 (выдержка в 90% HCl 1 час)	115.7151 (выдержка в 90% HCl 2 часа)	115.5736 (выдержка в 90% HCl 3 часа)
Значения m_1 при уровнях шероховатости	141.4629 ($R_z = 6,3-10$ мкм $R_a = 1,25-2,5$ мкм)	131.1654 ($R_z = 3,2-6,3$ мкм $R_a = 0,63-1,26$ мкм)	127.2359 ($R_z = 2,6-3,2$ мкм $R_a = 0,32-0,63$ мкм)

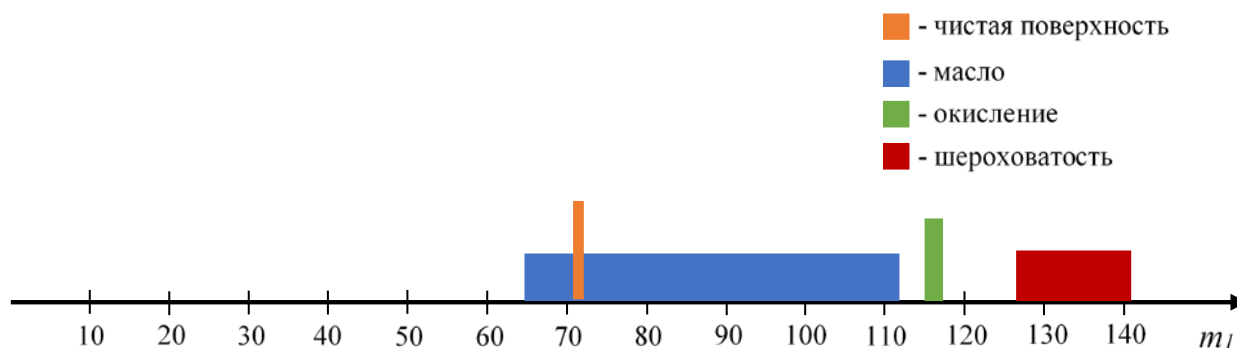


Рисунок 3. График распределения моментов 1-го порядка

Таблица 3

Полученные значения дисперсии μ_2 (момента 2-го порядка)

Значения μ_2 для чистой поверхности	53.8171		
Значения μ_2 при загрязнении маслом	73.,3596 (20 мг на площади 0,0024 м ²)	61.4928 (40 мг на площади 0,0024 м ²)	48.1894 (60 мг на площади 0,0024 м ²)
Значения μ_2 при окислении	73.5094 (выдержка в 90% HCl 1 час)	72.5308 (выдержка в 90% HCl 2 часа)	72.1744 (выдержка в 90% HCl 3 часа)
Значения μ_2 при уровнях шероховатости	82.0995 ($R_z = 6,3-10$ мкм $R_a = 1,25-2,5$ мкм)	79.4512 ($R_z = 3,2-6,3$ мкм $R_a = 0,63-1,26$ мкм)	78.1174 ($R_z = 2,6-3,2$ мкм $R_a = 0,32-0,63$ мкм)

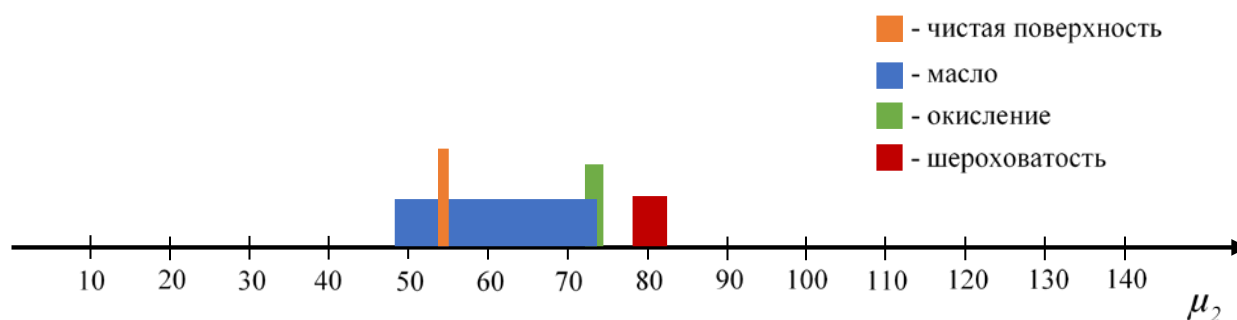


Рисунок 4. График распределения моментов 2-го порядка

Таблица 4

Полученные значения коэффициента асимметрии γ_1 (момента 3-го порядка)

Значения γ_1 для чистой поверхности	1.2176		
Значения γ_1 при загрязнении маслом	0.3805 (20 мг на площади 0,0024 м ²)	1.0502 (40 мг на площади 0,0024 м ²)	1.5090 (60 мг на площади 0,0024 м ²)
Значения γ_1 при окислении	0.2720 (выдержка в 90% <i>HCl</i> 1 час)	0.2582 (выдержка в 90% <i>HCl</i> 2 часа)	0.2274 (выдержка в 90% <i>HCl</i> 3 часа)
Значения γ_1 при уровнях шероховатости	-0.1031 ($R_z = 6,3-10$ мкм $R_a = 1,25-2,5$ мкм)	0.0423 ($R_z = 3,2-6,3$ мкм $R_a = 0,63-1,26$ мкм)	0.1158 ($R_z = 2,6-3,2$ мкм $R_a = 0,32-0,63$ мкм)

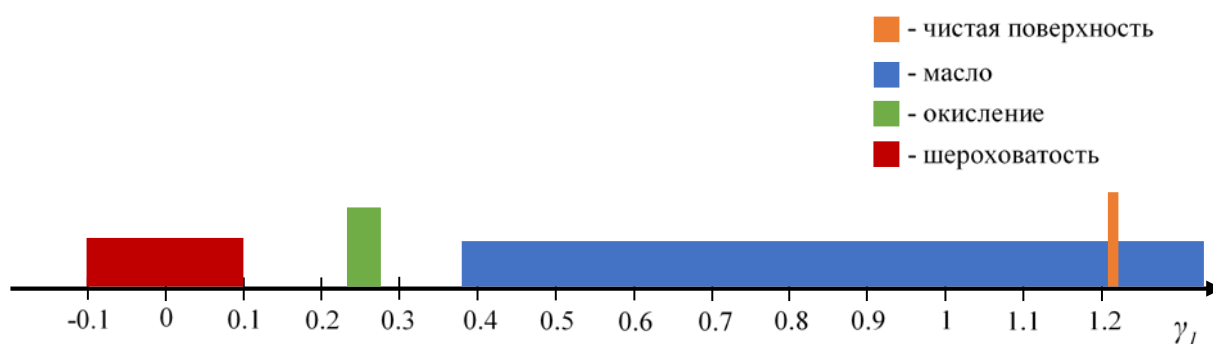


Рисунок 5. График распределения моментов 3-го порядка

Таблица 5

Полученные значения коэффициента эксцесса γ_2 (момента 4-го порядка)

Значения γ_2 для чистой поверхности	0.4174		
Значения γ_2 при загрязнении маслом	-1.2606 (20 мг на площади 0,0024 м ²)	-0.0673 (40 мг на площади 0,0024 м ²)	1.62 (60 мг на площади 0,0024 м ²)
Значения γ_2 при окислении	-1.3696 (выдержка в 90% <i>HCl</i> 1 час)	-1.3797 (выдержка в 90% <i>HCl</i> 2 часа)	-1.4058 (выдержка в 90% <i>HCl</i> 3 часа)
Значения γ_2 при уровнях шероховатости	-1.4844 ($R_z = 6,3-10$ мкм $R_a = 1,25-2,5$ мкм)	-1.469 ($R_z = 3,2-6,3$ мкм $R_a = 0,63-1,26$ мкм)	-1.4504 ($R_z = 2,6-3,2$ мкм $R_a = 0,32-0,63$ мкм)

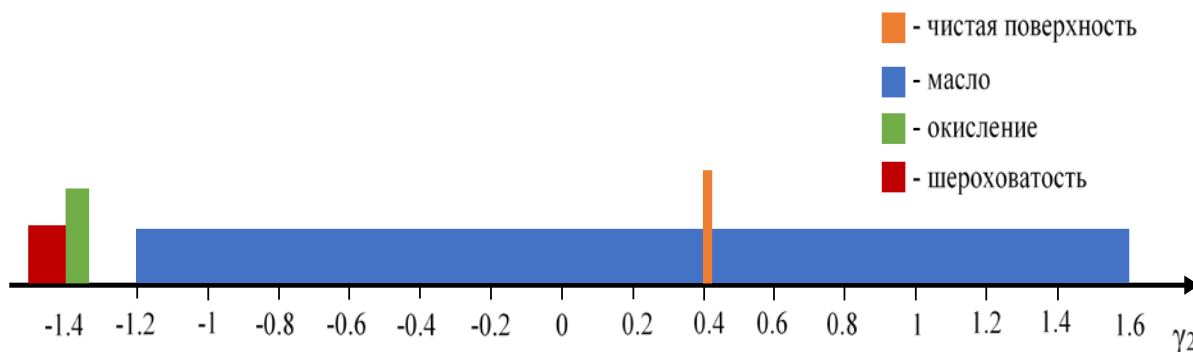


Рисунок 6. График распределения моментов 4-го порядка

Данный рабочий словарь признаков позволяет однозначно различать поверхности с шероховатостью и окислением от чистых и промасленных поверхностей. Это, очевидно, объясняется различной природой отражения для различных поверхностей. Однако, промасленные и чистые поверхности образуют пересекающиеся области [22]. Так, чистая и промасленная поверхности, обладают, скорее всего, зеркальным характером отражения, а окисленная и шероховатая – диффузным. Данное обстоятельство требует для их разделения поиска дополнительных признаков распознавания, либо выработки решающего правила, позволяющего по заданному критерию провести разделение этих классов. Тем не менее, при применении технологии распознавания образов, основанной на теории статистических решений, данные признаки позволят различать указанные дефекты с высокой вероятностью.

Заключение

В результате проведенного поиска и исследования диагностических признаков можно утверждать, что даже такой «скромный» словарь признаков, который был рассмотрен в статье, обладает определенными классифицирующими свойствами для распознавания типа загрязнения поверхности. Дальнейшее совершенствование (расширение) признакового пространства без предъявления дополнительных требований к аппаратной части аппаратуры диагностики неисправностей целесообразно проводить с использованием признаков, основанных на статистиках более высокого порядка (например, матриц сочетания (пространственной зависимости)).

Библиографический список

1. Денискин Ю.И., Дубровин А.В., Подколзин В.Г. Управление качеством процессов жизненного цикла инновационной продукции на основе компьютерной системы менеджмента качества // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84603>
2. Шевцов С.Н., Сибирский В.В., Чигринец Е.Г. Применение нейронных сетей в прогнозировании качества механической обработки особо нагруженных композитных конструкций // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75572>

3. Geoff Vorley, Fred Tickle. Quality Management Principles & Practice, Section 9 – Computer Aided Quality, Quality Management & Training (Publications), Ltd, 5th edition, UK, 2002, 335 p.

4. Павлов П.В., Горюнов А.Е. Аппаратно-программный комплекс неразрушающего контроля авиационных деталей // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57019>

5. Halász L. Control Methods in Polymer Processing, Studies in Polymer Science, 2012, vol. 10, 486 p.

6. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Изд-во стандартов, 1980. - 12 с.

7. ГОСТ 23479-79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1980. - 13 с.

8. Чигринец Е.Г., Верченко А.В. CAD/CAM/CAE системы, OMW-технологии и нейросетевые алгоритмы анализа данных на предприятиях авиастроительной отрасли // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102420>

9. Потапов А.С. Автоматический анализ изображений и распознавание образов. - М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2017. – 292 с.

10. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. – М.: Высшая школа, 1984. - 208 с.

11. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. - М.: Мир, 1978. - 411 с.

12. Воробьев С. Н. Цифровая обработка сигналов. - М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 213 с.
13. Фомин Я.А. Распознавания образов: теория и применение. - М.: Фазис, 2014. – 670 с.
14. Мерков А.Б. Распознавание образов. Построение и обучение вероятностных моделей. - М.: Ленанд, 2014. – 240 с.
15. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. - М.: Изд-во Медиа. 2012. - 678 с.
16. Табарин Г.Т. Методы математической физики. - М.: Изд-во АСВ, 2009. - 208 с.
17. Мазуров В.Д. Математические методы распознавания образов. - Свердловск: Изд-во УрГУ, 2010. – 101 с.
18. Сутырин А.А. Аппаратура оперативного контроля чистоты поверхности изделий ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29228>
19. ОСТ 92-1152-2014. Подготовка поверхности деталей под сварку и пайку и обработка сборочных единиц после сварки и пайки. Основные требования. - М.: Композит, 2014. - 35 с.
20. Михайленко А.В. Лебедев Е.Л., Лебедев А.С. Основы методики оценивания качества поверхностей стенок камер жидкостных ракетных двигателей по статистическим характеристикам параметров отраженного света // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т .10. № 2. С. 4 - 12.
21. Mitra Sanjit K. Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach, Mcgraw Hill, 1997, 864 p.

22. Лебедев А.С., Добролюбов А.Н., Лебедев Е.Л., Безруков А.В. Методика распознавания степени повреждений поверхностей материалов по параметрам акустико-эмиссионных сигналов // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 2. С. 36 - 40.

Searching for diagnostic features for controlled surfaces contamination recognition system at the optoelectronic monitoring

Lebedev A.S.^{1*}, Dobrolyubov A.N.^{1**}, Mikhaylenko A.V.^{1***}, Bezrukov A.V.^{2*}

¹*Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,
13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia*

²*Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov,
1, 1-ya Krasnoarmeyskaya str., Saint Petersburg, 190005, Russia*

*e-mail: alexey2360@mail.ru

**e-mail: alexdobr-spb@ya.ru

***e-mail: tihaxis@mail.ru

Abstract

The subject of research is quality control methods of products during their production and operation. The purpose of the work consists in searching and studying new techniques and ways of diagnostic information processing obtained by employing optoelectronic means of non-destructive testing of products.

The quality control method proposed in this article is the image recognition method (artificial intelligence method), which is used to control and diagnose the products condition. Digital images of the controlled products surfaces obtained by optoelectronic non-destructive testing are used as images, and first-order statistics (mathematical expectation, variance, asymmetry coefficient and kurtosis coefficient) are used as a feature space, obtained from histograms of the intensity distribution of signals reflected from the controlled surfaces.

Four types of product surfaces were being studied (clean, oxidized, oiled, and with the degree of roughness that does not meet the set requirements). The oiled, oxidized, and

rough surfaces, in their turn, were also separated by their degree of contamination, which formed an a priori alphabet of recognizable classes.

Metal plates with normalized defect in surface quality: clean, corresponding to the State Standard; oxidized with the exposure of 90% HCl for 1–3 hours; oiled with 20–60 mg of oil content on the surface, and various degrees of roughness were employed as experimental samples. The essence of the experimental study consisted in registration the light reflected from the surface of the element under study by the CCD-matrix of the digital camera. Further, the digital images were being processed and presented in the form of histograms representing 1D probability distribution laws of amplitudes of the signals, reflected from the surfaces under control. As was shown by this experiment, even such “modest” feature dictionary possesses classification properties.

It is advisable to further improve (expand) the feature space using features based on higher-order statistics (such as, combination matrices), without imposing additional requirements for the hardware part of the diagnostic equipment.

Keywords: quality control, artificial intelligence, pattern recognition, dictionary of signs, controlled surface, light intensity.

References

1. Deniskin Yu.I., Dubrovin A.V., Podkolzin V.G. *Trudy MAI*, 2017, no. 95, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84603>

2. Shevtsov S.N., Sibirskii V.V., Chigrinets E.G. *Trudy MAI*, 2016, no. 91, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75572>
3. Geoff Vorley, Fred Tickle. *Quality Management Principles & Practice*, Section 9 – Computer Aided Quality, Quality Management & Training (Publications), Ltd, 5th edition, UK, 2002, 335 p.
4. Pavlov P.V., Goryunov A.E. *Trudy MAI*, 2015, no. 80, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57019>
5. Halász L. *Control Methods in Polymer Processing*, Studies in Polymer Science, 2012, vol. 10, 486 p.
6. *GOST 18353-79. Kontrol' nerazrushayushchii. Klassifikatsiya vidov i metodov* (State Standard 18353-79. Non-destructive control. Classification of species and methods), Moscow, Izd-vo standartov, 1980, 12 p.
7. *GOST 23479-79. Kontrol' nerazrushayushchii. Metody opticheskogo vida. Obshchie trebovaniya* (State Standard 23479-79. Non-destructive control. Methods of the optical type. General requirements), Moscow, Izd-vo standartov, 1980, 13 p.
8. Chigrinets E.G., Verchenko A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102420>
9. Potapov A.S. *Avtomaticheskii analiz izobrazhenii i raspoznavanie obrazov* (Automatic image analysis and pattern recognition), Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2017, 292 p.
10. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* (Methods of recognition), Moscow, Vysshaya shkola, 1984, 208 p.

11. Tu Dzh., Gonsales R. *Printsipy raspoznavaniya obrazov* (Principles of pattern recognition), Moscow, Mir, 1978, 411 p.
12. Vorob'ev S. N. *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Digital processing of signals), Moscow, Izdatel'skii tsentr "Akademiya", 2013, 213 p.
13. Fomin Ya.A. *Raspoznavaniya obrazov: teoriya i primenenie* (Pattern recognition: theory and application), Moscow, Fazis, 2014, 670 p.
14. Merkov A.B. *Raspoznavanie obrazov. Postroenie i obuchenie veroyatnostnykh modelei* (Pattern recognition. Building and training of probabilistic models), Moscow, Lenand, 2014, 240 p.
15. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* (Statistical radio engineering), Moscow, Izd-vo Media, 2012, 678 p.
16. Tabarin G.T. *Metody matematicheskoi fiziki* (Methods of mathematical physics), Moscow, Izd-vo ACB, 2009, 208 p.
17. Mazurov V.D. *Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov* (Mathematical methods of pattern recognition), Sverdlovsk, Izd-vo UrGU, 2010, 101 p.
18. Sutyurin A.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 51, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29228>
19. *OST 92-1152-2014. Podgotovka poverkhnosti detalei pod svarku i paiku i obrabotka sborochnykh edinits posle svarki i paiki. Osnovnye trebovaniya* (Industry Standard T 92-1152-2014. of Parts surfaces preparation for welding and soldering, and assemblies processing after welding and soldering. Basic requirements), Moscow, Kompozit, 2014, 35 p.

20. Mikhaylenko A.V., Lebedev E.L., Lebedev A.S. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 4 - 12.
21. Mitra Sanjit K. *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*, Mcgraw Hill, 1997, 864 p.
22. Lebedev A.S., Dobrolyubov A.N., Lebedev E.L., Bezrukov A.V. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2017, no. 2, pp. 36 - 40.