

Структурные изменения микронеровностей, предшествующие усталостному разрушению поверхности

С.Р. Абульханов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Рассматривается подход контроля малых динамических изменений на изображении изучаемого процесса с помощью циклических кодов. Мы проводили сравнительный анализ одинаковых последовательностей пикселей на исходном изображении и соответствующие последовательности пикселей на контролируемом изображении. Последовательности одинаковых пикселей мы рассматривали, как разряды исходного сообщения. Порождающий многочлены циклических кодов, соответствующие исходному и контролируемому изображению, по нашему мнению, характеризуют состояние изучаемого процесса в разные моменты времени. Разница между порождающими многочленами мы интерпретируем, как внешнее воздействие (помеха), которая приводит к изменениям на контролируемой поверхности. Для визуализации помех мы использовали метод упаковки.

1. Введение

Оптические системы, эксплуатируемые в условиях космоса, используемые в авиации [1] работают в экстремальных условиях. Поверхности оптических элементов, включая торцы компонентов волоконной оптики, испытывают температурное воздействие [2-3], периодические деформации (вибрации) [4-6]. Предварительная обработка торцов световодов [7-10] формирует определённый микрорельеф, характер которого влияет на эффективность оптической системы в целом [11-14]. В процессе эксплуатации оптической системы на торцах световодов формируются по различным причинам царапины, забоины, загрязнения [15, 16]. Для обеспечения стабильных эксплуатационных характеристик оптических систем с волоконной оптикой рекомендуется регулярно осуществлять чистку торцов световодов [16, 17]. По нашему мнению, недостаточно изучена проблема достижения на торце критического микрорельефа, при котором целесообразно его дополнительно механически обработать или ограничиться очисткой. Для решения этой задачи мы предлагаем критерий на основе термодинамических принципов, который позволит принимать необходимые решения.

2. Постановка задачи

Многими исследователями [18-21] установлено, что регулярные воздействия деформаций (механических и тепловых) на световод могут приводить к возникновению сколов на его торцах, а также к трещинам на его торцевых и цилиндрической поверхностях. Эти обстоятельства приводят к потере работоспособности световода, как информационного канала. Для надёжной работы систем с волоконной оптикой предлагается [16, 17] по результатам систематического визуального контроля чистить или механически обрабатывать торцы

световодов. Визуальный контроль не может выявлять малые изменения микронеровностей торца, а также не может прогнозировать возможные изменения шероховатости в результате воздействия на световод динамически изменяющихся деформаций.

Мы изучили возможность контроля малых изменений на изображении с помощью различных математических методов.

Для исследования нами был взят полимерный световод с \varnothing оптической оболочки 140 мкм и длиной 220 мм. Оптические методы наиболее широко используются для контроля микрорельефа торца световода [22-25]. По этой причине для анализа изменения микрорельефа мы рассматривали цифровую матрицу размерами 520×515 пикселей (pel), которая соответствовала изображению фрагмента поверхности торца световода. Каждый пиксель изображения имел индекс градации серого цвета от 0 до 255. Фрагмент рассматриваемой поверхности соответствовал центральной части торца световода, микрорельеф которого был сформирован полированием (рис. 1). На рис. 1 *a* показано исходное изображение фрагмента полированной поверхности торца световода, на рис. 1 *b* показано изображение одноименного фрагмента полированной поверхности торца световода после его усталостного нагружения (далее контролируемое изображение). Изображения на рис. 1 были получены с помощью светового микроскопа ИМЦ 150×50 Б производства ЗАО «Калибр» и оцифрованы с помощью фотоаппарата Nikon D5200 Kit. Отметим, что визуально разница между изображениями рис. 1 *a*, *b* не фиксируется.

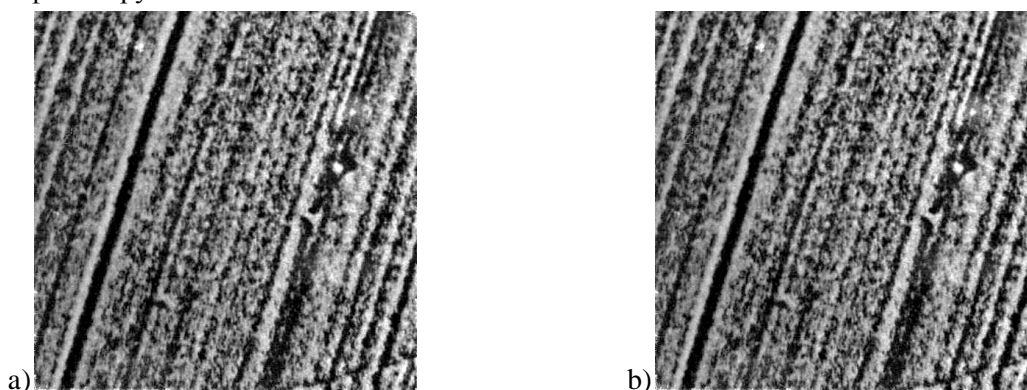


Рисунок 1. Изображение центральной части торца полимерного световода: *a* – исходное; *b* – после усталостного нагружения.

Исследуемый световод подвергался нами усталостному нагружению. На специальной установке световод совершал возвратно-поступательное и вращательные движения (рис. 2), для чего нами использовалась модернизированная испытательная разрывная машина РТ-250М-2 (производства Точприбор). Испытания проводились в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60793-1-31-2010 «Волокна оптические. Методы измерений и проведение испытаний».

Возвратно-поступательные перемещения осуществлялись в пределах ± 10 мм и с частотой 5 перемещений в минуту. Частота вращения световода составляла 30 оборотов в минуту. Расстояние между подшипниками составляло 180 мм. Время испытаний – 3 часа.

Во многих работах [26, 27] цифровые изображения рассматриваются, как сумма некоторого трехмерного полезного сигнала и помех. В этом случае целесообразно использовать в анализе статистических методов, которые во многих случаях позволяют выявлять индивидуальные особенности наблюдаемого процесса.

Медианный метод позволяет подавлять шумы в виде «выбросов» индексов цветовой палитры из наблюдаемой статистики пикселей. Медианная фильтрация эффективна при единичных «выбросах», для большого количества чередований выбросов метод неэффективен [26]. На рис. 3 показаны изображения после полирования торца световода: исходное (*a*) и контролируемое (*b*) после применения медианной фильтрации (ширина окна фильтра 5 pel). Размытие изображения на рис. 3 *a*, *b* свидетельствует о большом количестве выбросов индекса градации серого цвета (Grayscale). Это означает, что выбросы яркости являются значимой

информацией на изображении рис. 3 *a, b*. Медианная фильтрация не позволяет установить малые одинаковые изменения, а также параметризовать их на изображениях. Отметим, что визуально разница между изображениями рис. 3 *a, b* не фиксируются. Авторами работ [28-31] также было установлено, что статистические методы не позволяют оценить раздельно различные по масштабам изменения шероховатой поверхности с помощью визуальных образов.

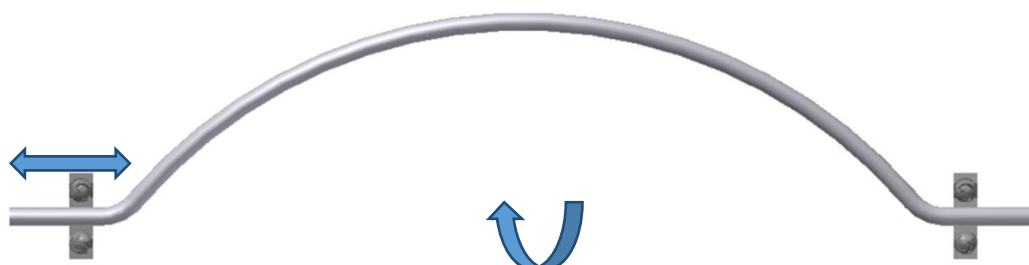


Рисунок 2. Схема усталостного нагружения световода.

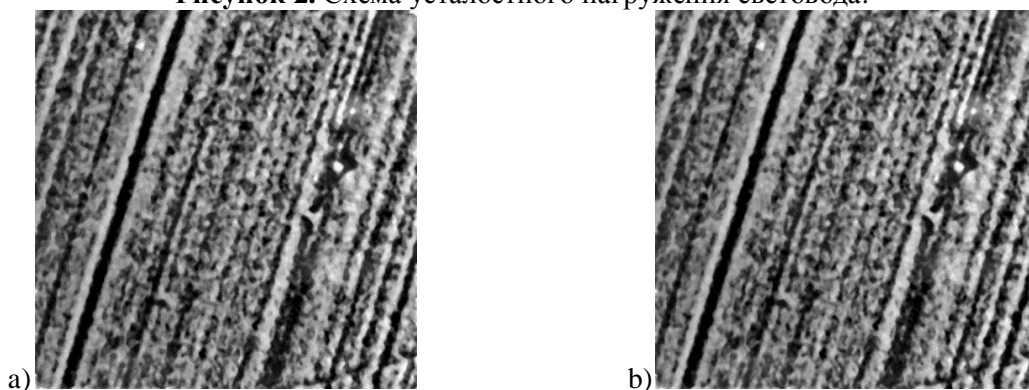


Рисунок 3. Медианная фильтрация изображения полированной поверхности торца световода: *a* – исходного изображения; *b* - изображение после усталостного нагружения (ширина окна фильтра 5 μel).

Частотная фильтрация изображения заключается в представлении функции яркости изображения в виде суммы тригонометрических функций различных частот. При этом "высоким" пространственным частотам соответствуют мелкоразмерные объекты, включая шумы [27]. На рис. 4 показаны Фурье образ (для линейной фильтрации) исходного изображения (рис. 4 *a*) и Фурье образ контролируемой поверхности на рис. 4 *b*. Из рис. 4 визуально невозможно оценить динамику малых изменений микрорельефа на изображении торца световода.

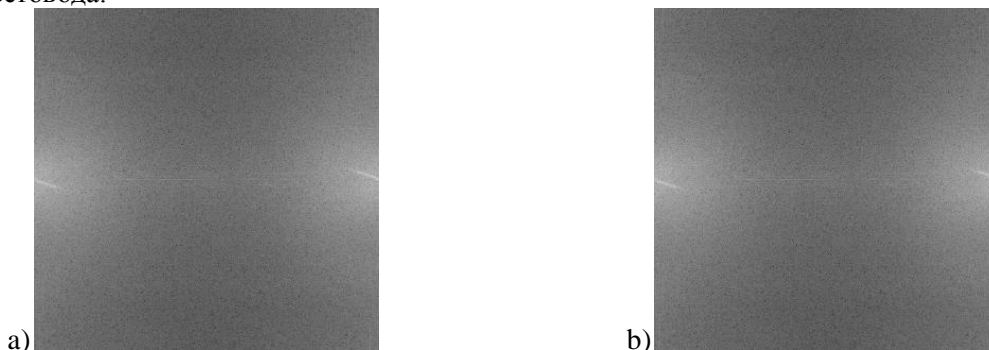


Рисунок 4. Фурье-образы изображения полированной поверхности торца световода: *a* – исходного изображения; *b* - изображение после усталостного нагружения (ширина линии 10 μel).

Известен опыт использования текстур для параметризации периодической (мозаичной) шероховатости [32, 33]. Текстурная сегментация позволяет через пространственное

распределение яркости пикселей оценить признаки изображения. Формируемые текстурные признаки применимы для некоторой окрестности изображения, которая определяет степень детализации исследуемых сегментов. На рис. 5. показан результат разбиения изображения на рис. 1 *a* на однородные области. Размеры плавающего окна составляли 3×3 пел. Разбиение на однородные области рис. 1 *b* не отличалось от рис. 5. Вычитание двух рисунков привело к изображению, на котором визуально разница не видна. Это значит, что в результате сегментации часть информации терялась.

Приведённые примеры указывают, что рассмотренные статистический метод, метод пространственной фильтрации и метод текстурирования изображения поверхности не позволяют визуально зафиксировать динамику малых изменений на изображениях.

Малые изменения на торце световода могут возникнуть в результате поселения бактериальной культуры, возникновения усталостных микротрещин, слущивания микрочастиц материала световода с его поверхности. Методики их фиксации и удобного для восприятия человеком графического представления мы не нашли среди источников информации.

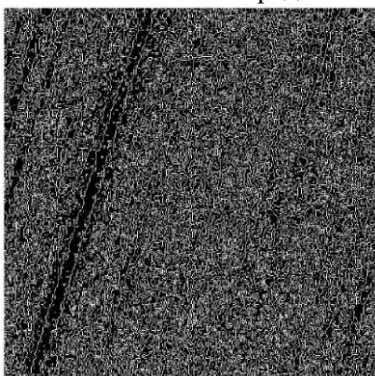


Рисунок 5. Разбиение изображения на рис. 1 *a* на однородные области (размеры плавающего окна 3×3 пел).

3. Контроль шероховатых поверхностей по изображению

Мы предлагаем метод цифровой обработки изображений микронеровностей, который выявляет закономерности малых изменений микрорельефа торца световода. Суть метода в следующем.

На изображении рис. 1 *a* мы определили по столбцам и строкам одинаковые последовательности пикселей. Количество пикселей в рассматриваемых последовательностях изменялось (k) от 3-х до 9. Последовательности из 2-х одинаковых пикселей не рассматривались, поскольку мы считали их малоинформативными. Одинаковые последовательности из 10-ти пикселей на исходном изображении обнаружены не были. Количество одинаковых последовательностей, состоящих из заданного количества пикселей (k), в дальнейшем будем называть кратностью (r_k). Отметим, что кратность для различных последовательностей из k пикселей изменялась от 2 до \max , величина которого зависит от k . В дальнейшем мы рассматривали последовательности пикселей с максимальной кратностью, как наиболее информативные. Распределение кратных последовательностей из 3 пикселей на исходном изображении (рис. 1 *a*) приведено на рис. 6. Последовательности пикселей на рис. 6 показаны точками. Отметим, что не все кратные последовательности пикселей одинаковы между собой.

На рис. 7 *a* показана кратность одинаковых последовательностей пикселей по столбцам и по строкам изображения на рис. 1 *a* для различных k .

На рис. 7 *b* показана кратность одинаковых последовательностей пикселей по столбцам и по строкам изображения на рис. 1 *b* для различных k . При этом рассматривались только одноименные последовательности пикселей на рис. 1 *a*.

Последовательность пикселей не может характеризовать микронеровности на исследуемой поверхности, поскольку шероховатость по природе своей является трёхмерным объектом. Найденные нами одинаковые последовательности пикселей на рис. 3 *a* не могут

рассматриваться без соседних последовательностей пикселей. Мы считаем, что правило объединения соседних последовательностей пикселей также несет информацию о исследуемой шероховатой поверхности.

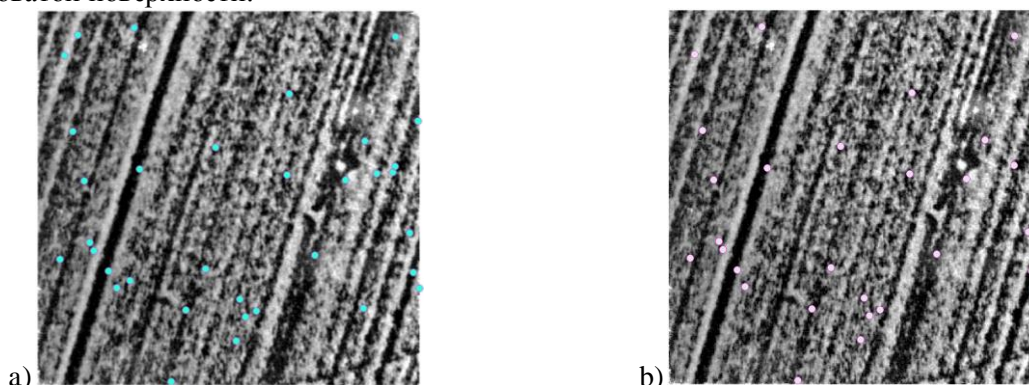


Рисунок 6. Распределение совпадающих последовательностей из трёх пикселей на исходном изображении (a) и изменившиеся одноимённые последовательности пикселей на изображении после усталостного нагружения (b).

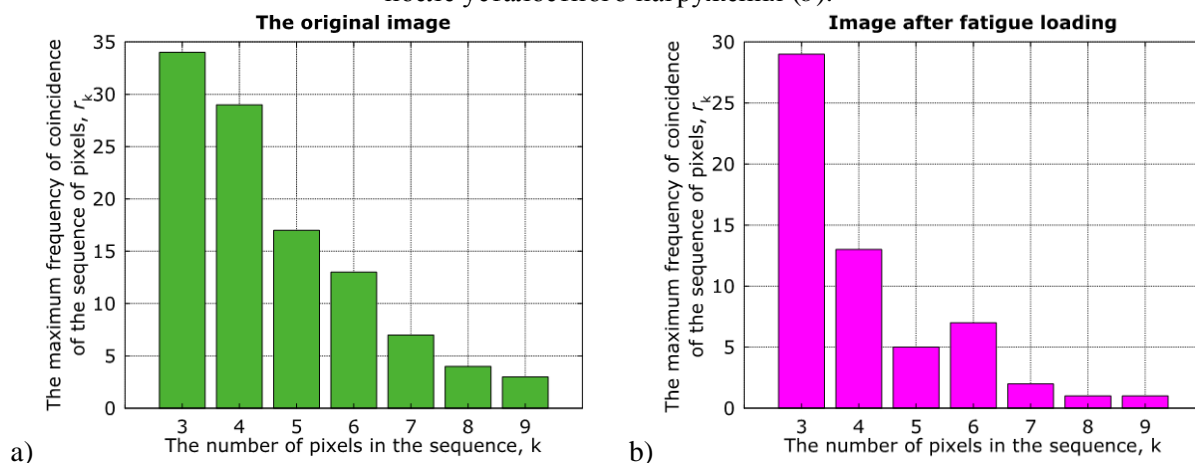


Рисунок 7. Зависимость кратности (r_k) одинаковых последовательностей пикселей от количества пикселей в последовательности (k): a – исходное изображение, b - изображение после усталостного нагружения.

Изменения на изображениях рис. 6 a, b мы рассматриваем, как преобразование кратных и прилегающим к ним последовательностей на рис. 6 a с помощью некоторого преобразования \mathcal{Q} . По нашему мнению особенности преобразования \mathcal{Q} могут характеризовать динамику изменения микрорельефа на поверхности в результате воздействия внешних факторов. Для математической формализации рассматриваемой проблемы нами были использованы методы математический криптографии.

Наш выбор математического формализма объясняется следующими причинами:

1. Найденные кратные и прилегающие к ним (сверху и снизу для горизонтальной последовательности пикселей, справа и слева для вертикальной последовательности пикселей) последовательности пикселей длиной k являются разрядами исходных сообщений (исходных кодов). Для горизонтальных кратных последовательностей пиксели верхние прилегающие последовательности нами рассматривались, как информационные символы, а пиксели кратных (нижних) последовательностей являются избыточными (контрольными) разрядами исходных сообщений. Пиксели нижних прилегающих последовательностей есть избыточные разряды кодов, а пиксели соответствующих кратных последовательностей – информационные разряды исходных сообщений (рис. 8 a). Аналогичным образом вводятся информационные и избыточные разряды исходных сообщений для горизонтальных кратных последовательностей

пикселей (рис. 8 *b*). Отметим: одинаковое количество информационных и избыточных разрядов кода соответствует равномерному блочному избыточному коду (*erasure coding*);

2. Последовательности пикселей на рис. 6 *b* соответствующие по месту расположения кратным последовательностям пикселей на рис. 6 *a* мы будем называть далее одноимёнными последовательностями. Одноименные последовательности пикселей вместе с прилегающими к ним последовательностями по п. 1 мы рассматривали, как кодовой сообщение (коды);

3. Наличие в рассматриваемых последовательностях пикселей k информационных k избыточных символов, позиции которых в сообщениях неизменны, указывает на соответствие разделимым систематическим кодам (*separable systematic code*);

4. Механическая обработка оптических поверхностей, включая обработку торца световода, в большинстве случаев формирует регулярный микрорельеф. По этой причине на изображении шероховатой поверхности после полирования должны быть кратные последовательности пикселей, соответствующие циклическим перестановкам. Это обстоятельство мы интерпретируем, как циклический код;

5. Индексы градаций серого цвета у найденных кратных последовательностей пикселей могут изменяться от 0 до 255. По нашему мнению, с учетом предыдущих причин наиболее уместна аналогия с циклическими недвоичными кодами, например, с кодом Рида-Соломона.

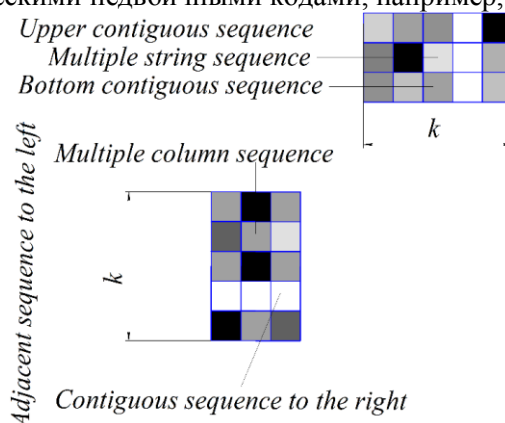


Рисунок 8. Расположение по столбцам и строкам кратных и прилегающих последовательностей пикселей.

Символы, из которых могут состоять исходные и кодовые сообщения, являются элементами конечного поля F_{256} , $q = 256$ мощность поля. Символы поля F_{256} , из которых состоят исходные и кодовые сообщения, есть алфавит M . Количество символов в алфавите M – мощность алфавита m .

Мы полагали, что изменения микрорельефа торца световода под воздействием внешних факторов, процесс эргодичный. Это означает, что в течении коммерческого использования световода усреднённые изменения шероховатости его торца совпадает с усреднёнными изменениями в течении некоторого времени. Применительно к рассматриваемым исходным и кодовым сообщениям это означает следующее:

- для исходных сообщений наибольшее расстояние Хемминга между информационными и избыточными разрядами не может превосходить наибольшего расстояния Хэмминга между информационными и избыточными разрядами одноимённых кодовых сообщений, т.е.

$$\max_{i=1, \dots, h} \left(d_{inf_excess_initial}(k) \right) \leq \max_{i=1, \dots, h} \left(d_{inf_excess_appropriate}(k) \right). \quad (1)$$

Здесь k – размер кратной последовательности пикселей, h – количество одноименных последовательностей пикселей, не совпадающих с соответствующими кратными последовательностями пикселей, $d_{inf_excess_initial}$ – расстояние Хэмминга между информационными и избыточными разрядами исходного сообщения, $d_{inf_excess_appropriate}$ – расстояние Хэмминга между информационными и избыточными разрядами одноимённого кодового сообщения;

- расстояние Хэмминга между информационными разрядами исходных сообщений, соответствующих кратным последовательностям пикселей, и между разрядами кодовых сообщений, соответствующих одноименным последовательностям кратных пикселей, не превосходит некоторой величины M , т. е.

$$\max_{l=1, h} \left(d_{i_{inf\ initial_code\ appropriate}}(k) \right) \leq Max. \quad (2)$$

Здесь $d_{i_{inf\ initial_code\ appropriate}}$ - расстояние Хэмминга между информационными исходного сообщения и между разрядами кодовых сообщений, соответствующих одноименным последовательностям кратных пикселей;

- расстояние Хэмминга между избыточными разрядами исходных сообщений, соответствующих кратным последовательностям пикселей, и между разрядами кодовых сообщений, соответствующих одноименным разрядам исходных сообщений, не превосходит некоторой величины M , т. е.

$$\max_{l=1, h} \left(d_{i_{excess\ initial_code\ appropriate}}(k) \right) \leq Max, \quad (3)$$

где

$$Max = \max \left(\max_{l=1, h} \left(d_{i_{inf\ initial_code\ appropriate}}(k) \right), \max_{l=1, h} \left(d_{i_{excess\ initial_code\ appropriate}}(k) \right) \right)$$

В таблице 1 приведены параметры кратных последовательностей пикселей на рис. 1 а и соответствующие им последовательности пикселей на рис. 1 б, а также параметры соответствующие исходным и кодовым сообщениям.

Таблица 1. Параметры кратных и одноимённых последовательностей пикселей.

Количество пикселей в последовательности, n	Кратность последовательностей пикселей, r_k на изображении	Количество различных одноимённых последовательностей пикселей h на изображении	Количество различных символов в кратной последовательности пикселей на изображении	*Мах количество различных символов в прилегающих последовательностях пикселей к кратной	*Мах количество различных символов в одноимённых последовательностях пикселей на изображении	Мах количество различных символов в прилегающих последовательностях пикселей к одноимённой последовательности на	Количество символов в алфавите, m
3	34	29	3	3/3	3	3/3	15
4	29	13	3	2/3	4	4/3	18
5	17	5	4	4/3	5	5/4	19
6	13	7	6	6/6	5	6/3	29
7	7	2	5	5/7	6	6/6	39
8	4	1	8	3/7	8	8/4	45
9	3	1	7	7/8	9	7/5	51

*Дробь соответствует соседним последовательностям пикселей сверху (слева) / снизу (справа).

В таблице 2 приведены максимальные расстояния Хэмминга для исходных и кодовых сообщений.

4. Расчёт циклических кодов

Циклический (n, k) -код над полем F_{256} определяется порождающим многочленом $g(x)$, который удовлетворяет условиям: $g(x)$ – нормированный; степень $g(x)$ равна $n-k$; многочлен $x^n - 1$ делится на $g(x)$ в кольце многочленов $F_{256}[x]$ [34]. Таким образом, число различных циклических кодов длины n над полем F_q равно числу различных нетривиальных

нормированных делителей многочлена $x^n - 1$. Значит, если имеется разложение многочлена $x^n - 1$ на неприводимые нормированные множители над полем F_{256} :

$$x^n - 1 = f_1(x)f_2(x) \dots f_s(x). \quad (4)$$

В этом случае число различных циклических кодов длины n над полем F_{256} равно числу различных нетривиальных нормированных делителей (тривиальные делители: 1 и $x^n - 1$) многочлена $x^n - 1$, т. е. равно $n^{256} - 2$ [35].

Таблица 2. Максимальные расстояния Хэмминга для исходных и кодовых сообщений.

n		3	4	5	6	7	8	9
$d_{inf_excess_{initial}}$		3	3	4	6	5	6	5
$d_{inf_excess_{appropriate}}$	max	2	3	4	4	4	7	5
$d_{i_{inf_{initial-code_{appropriate}}}}$		3	3	3	4	5	7	6
$d_{i_{excess_{initial-code_{appropriate}}}}$		2	4	3	5	4	7	7

4.1. Нахождение вектора степеней многочленов

В таблице 3 приведены наибольшие общие делители НОД (n, q) для рассматриваемых k : 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9.

Таблица 3. Наибольшие общие делители мощности поля F_{256} и количества разрядов в сообщениях.

$n = 2 \cdot k$	$2 \cdot 3 = 6$	$2 \cdot 4 = 8$	$2 \cdot 5 = 10$	$2 \cdot 6 = 12$	$2 \cdot 7 = 14$	$2 \cdot 8 = 16$	$2 \cdot 9 = 18$
НОД($n, 256$)	2	8	2	4	2	16	2

Положим НОД (n, q) = p_k , тогда в кольце $F_{256}[x]$:

$$x^n - 1 = x^{p_k v} - 1 = (x^v - 1)^{p_k} \quad (5)$$

Если НОД (v, q) = 1, то это означает, что v и q взаимно простые. Из этого следует, что многочлен $x^v - 1$ не имеет кратных делителей. Все корни этого многочлена образуют циклическую группу $\langle \alpha \rangle$ порядка v в некотором расширении F_{256^v} поля F_{256} [36].

Для нахождения степеней многочленов из разложения (4) необходимо разбить эту группу на классы сопряжённых над полем F_{256} элементов и подсчитать количество элементов в каждом классе. Число элементов в классе равно степени соответствующего этому классу минимального многочлена [37]. В соответствии с работой [38] разбиение циклической группы $\langle \alpha \rangle = \langle 1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{n-1} \rangle$ на классы сопряжённых над полем F_q элементов мы провели следующим образом. В соответствии с работой [39] возведение каждого элемента в степень q является автоморфизмом поля F_{q^m} над полем F_q или автоморфизм Фронебиуса поля F_{q^m} над полем F_q :

$$\varphi: F_{q^m} \rightarrow F_{q^m}, \quad \varphi(a) = a^q$$

Аutomорфизм Фронебиуса является порождающим циклической группы автоморфизмов поля F_{q^m} над F_q . Любой автоморфизм этой группы переводит корень многочлена из $F_q[x]$ в корень этого же многочлена. Это означает следующее: если α^i – корень неприводимого над полем F_q многочлена $f(x)$, и класс элементов, сопряжённых с α^i , состоит из элементов

$$\{\alpha^i, \alpha^{iq}, \alpha^{iq^2}, \dots, \alpha^{iq^{m-1}}\}. \quad (6)$$

Построение класса заканчивается, когда для некоторого l выполняется условие $\alpha^{iq^l} = \alpha^i$.

Разбиение циклической группы $\langle \alpha \rangle = \langle 1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{n-1} \rangle$ на класса сопряжённых элементов можно заменить разбиением на круговые классы $C_i = \{q, iq, iq^2, \dots, iq^{l-1}\}$ по модулю n чисел от 0 до $n-1$, соответствующих степеням α .

Пример определения кругового класса C_i при $n = 14, q = 256 = 2^8$:

- после выделения кратных сомножителей многочлена $x^{14} - 1$ (Таблица 3) переходим к рассмотрению многочлена $x^7 - 1$;

- определения кругового класса C_i при $n = 7, q = 256$,

$$\begin{aligned} C_0 &= \{0\}, \text{ т. к. } 0 \cdot 256 \pmod{7} = 0 \\ C_1 &= \{1, 4, 2\}, \text{ т. к. } 1 \cdot 2^{8 \cdot 3} \pmod{7} = 1 \\ C_3 &= \{3, 5, 6\}, \text{ т. к. } 3 \cdot 2^{8 \cdot 3} \pmod{7} = 3 \\ C_5 &= \{5, 6, 3\}, \text{ т. к. } 5 \cdot 2^{8 \cdot 3} \pmod{7} = 5 \\ C_7 &= \{0\}, \text{ т. к. } 7 \cdot 2^{8 \cdot 3} \pmod{7} = 0 \end{aligned}$$

Число элементов в каждом классе: (1, 3, 3, 3, 1) – степени неприводимых многочленов в разложении $x^7 - 1$ на неприводимые множители. Учитывая кратность $x^7 - 1$ (Таблица 3) следует, что в разложении многочлена $x^{14} - 1$ на неприводимые сомножители многочлены, вектор степеней многочленов в разложения (4) примет вид $(1^2, 3^2, 3^2, 3^2, 1^2)$.

4.2. Оценка количества циклических (n, k) кодов и оценка шумов

Поскольку порождающий многочлен $g(x)$ имеет степень $n-k$ и является произведением некоторых из многочленов разложения (4), то задача оценки количества циклических (n, k) кодов сводится к определению способов представления числа $n-k$ в виде суммы чисел, составляющих вектор степеней многочленов разложения (4). Эта задача эквивалентна частному случаю задачи о рюкзаке [39] (рюкзачный вектор (1, 3, 9, 3, 9, 3, 9, 1)). Отметим, что одинаковую степень имеют не только одинаковые многочлены, но и различные.

В таблице 4 приведены количества циклических кодов (n, k) для $n = 2k$ при $k = (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9)$ над полем F_{256} для одинаковых и различных многочленов.

Таблица 4. Количество циклических кодов над конечным полем F_{256} .

k	3	4	5	6	7	8	9
Количество кодов, N	74	82	118	156	236	212	142

Для определения $f_i(x)$ мы использовали то обстоятельство, что элемент α циклической группы (6) есть примитивный элемент GN (256), а также

$$f_i(\alpha) = 0. \quad (7)$$

Численное решение уравнений (7) для каждого циклического кода Таблицы 4 позволяло найти величину α . Далее по величине α определялся каждый неприводимый сомножитель многочлена $g(x)$.

Из полученных возможных представлений многочлена $g(x)$ были выбраны только те, которые для кодовых и одноимённых исходных сообщений в наибольшей степени удовлетворяли условиям (1) - (3). Определение наилучшего представления многочлена $g(x)$ в виде произведения найденных неприводимых многочленов осуществлялось перебором.

Оценка шумов (несистематических изменений на изображении шероховатой поверхности) мы осуществляли следующим образом:

1. Для каждой пары исходных сообщений на рис. 1 *a* и одноимённых кодовых сообщений на рис. 1 *b*, определялись порождающие многочлены $g_{n,i}(x)$ и $g_{n,i}^*(x)$, где n – количество разрядов в коде, $i = \overline{1, r_k}$. Здесь r_k – кратность кодовых сообщений (рис. 7). Порождающий многочлен $g_{n,i}^*(x)$ – соответствует одноимённым кодовым сообщениям на рис. 1 *b*, $g_{n,i}(x)$ – соответствует кратным исходным сообщениям на рис. 1 *a*.

2. Для каждой группы кодов из n разрядов на рис. 1 *b*, определялись общие сомножители порождающих многочленов $g_{n,i}^*(x)$ для $i = \overline{1, r_k}$ (с учётом кратности), если такие сомножители были.

3. Для каждой группы одноимённых исходных кодов из n разрядов на рис. 1 *a*, определялись общие сомножители порождающих многочленов $g'_{n,i}(x)$ для $i = \overline{1, r_k}$ (с учётом кратности), если такие сомножители были.

4. Определялась разница $g_{n,i}^*(x) - g'_{n,i}(x)$.

В соответствии с приведённым алгоритмом нами было установлено, что для $n = 16$ и 18 не было общих сомножителей. Мы объясняем это тем, что на рис. 1 *a* и 1 *b* недостаточная количество последовательностей пикселей, которые могли быть циклическими кодами.

Наибольшее количество сомножителей имело место для $n = 6$ и 8 , но для всех последовательностей нет общих сомножителей $f_i(x)$ (хотя они есть для больших групп последовательностей из 3 и 4 пикселей). Мы объясняем это слишком большим разнообразием последовательностей из 3 и 4 пикселей. В результате среди рассматриваемых кодов из 6 и 8 разрядов имеют место недопустимые (не соответствующие условиям (1)-(3)) кодовые сообщения.

Для $n = 10$ не было общих сомножителей у кодов на рис. 1 *b*. Для $n = 12$ не было общих сомножителей у кодов на рис. 1 *a*. Это произошло по уже названным причинам.

Для $n = 14$ общий сомножитель для группы исходных кодов составлял $g'_{14,1}(x) = (x - 1)^2(x - 2)^2(x - 3)^2(x - 4)^2(x - 5)^2(x - 6)^2x^2$, общий сомножитель одноименных кодов на рис. 1 *b* составлял $g^*_{14,3}(x) = (x - 5)^2(x - 9)^2(x - 9)^2(x - 162)^2(x - 324)^2(x - 1458)^2x^2$.

Мы интерпретировали разницу $f_{nois}(x) = g^*_{n,i}(x) - g'_{n,i}(x)$, как порождающий многочлен помех. Применительно к изображению шероховатой поверхности многочлен $f_{nois}(x)$ характеризует изменения на изображении микронеровностей, после усталостного нагружения поверхности.

Мы считаем: по виду многочлена $f_{nois}(x)$ сложно осуществлять контроль поверхности торца световода. Для принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации световода необходим информационный визуальный образ общих сомножителей $f_1(x)$ и $f_3^*(x)$ и многочлена помех $f_{nois}(x)$.

Для создания информационного образа мы использовали методику, разработанную нами ранее в работе [41]. Для этого мы привели многочлены $f_1(x)$ и $f_3^*(x)$ к следующему виду:

$$f_1(x) = (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 0)^2 \left(x - \frac{1}{1+2+3+4+5+6+0}\right)^2 \left(x - \frac{2}{1+2+3+4+5+6+0}\right)^2 \left(x - \frac{3}{1+2+3+4+5+6+0}\right)^2 \left(x - \frac{4}{1+2+3+4+5+6+0}\right)^2 \left(x - \frac{5}{1+2+3+4+5+6+0}\right)^2 \left(x - \frac{6}{1+2+3+4+5+6+0}\right)^2 x^2 = 21^2(x - 0,0476)^2(x - 0,0952)^2(x - 0,1428)^2(x - 0,1904)^2(x - 0,2381)^2(x - 0,2857)^2x^2,$$

$$f_3^*(x) = (1967)^2(x - 0,0025)^2(x - 0,0045)^2(x - 0,0045)^2(x - 0,0823)^2(x - 0,1647)^2(x - 0,7412)^2x^2, \quad (8)$$

$$f_{nois}(x) = (x - 0,1237)(x - 0,0261)(x - 0,1401)(x - 0,0023)(x - 0,1302)(x - 0,1109)(x - 0,0132)(x - 0,0156)(x - 0,0235)(x - 0,1302)(x - 0,0595)(x - 0,0719)(x - 0,0779)(x - 0,0904)(x - 0,1147).$$

Очевидно, сумма корней каждого многочлена (8) равна 1. Каждый корень каждого из многочленов (8) мы интерпретировали, как площадь квадрата. В этом случае возможна упаковка без пересечений квадратов, соответствующих корням одного из многочленов (8), в квадрат площадью 2. На рис. 6 показаны визуальные информационные образы для многочленов (8).

Из рис. 9 *a-c* хорошо видна динамика изменения кодов (14, 7) на исходном изображении шероховатости на рис. 1 *a* и на изображении шероховатой поверхности рис. 1 *b* после её усталостного нагружения. На рис. 6 *d* показан визуальный образ многочлена помехи, приведшей к изменению изображения на рис. 1 *a* последовательностей пикселей, соответствующих циклическому коду (14, 7). Применяемые методы статистической оценки изменений на изображении шероховатой поверхности не позволяют визуально обнаружить малые изменения.

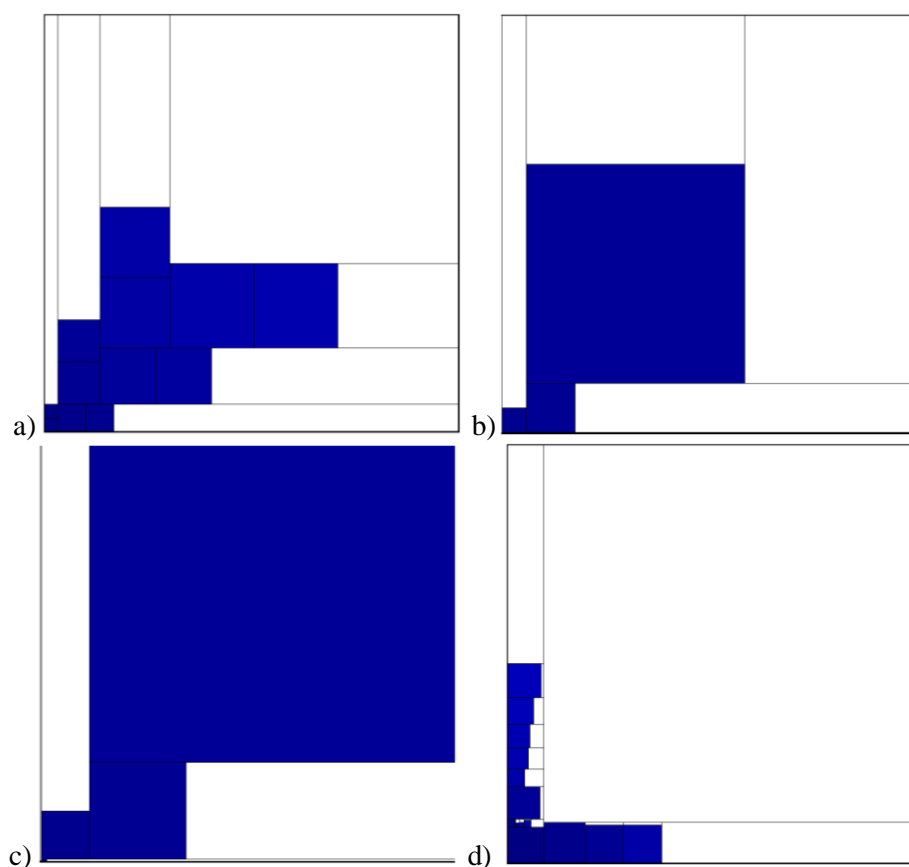


Рисунок 9. Визуальные информационные образы: *a* – общий многочлен $f_1(x)$ циклического кода (14, 7) на изображении рис. 1 *a*; *b* - общий многочлен $f_3^*(x)$ циклического кода (14, 7) на изображении рис. 1 *b*; *c* – увеличенное изображение информационного образа $f_3^*(x)$ циклического кода (14, 7) на изображении рис. 1 *b*; *d* – многочлен помех $f_{nois}(x)$ для циклических кодов (14, 7).

5. Заключение

Проведённые исследования показали:

1. Предлагаемый метод позволяет определять и визуализировать в удобном для восприятия виде динамику малых изменений двумерного оптического сигнала.
2. Визуализация процесса изменений двумерного оптического процесса осуществляется с учетом физических особенностей изучаемого процесса.
3. Предлагаемый метод позволяет фиксировать и визуализировать наиболее часто встречаемые на изображении последовательности пикселей, устойчивые к внешним воздействиям на поверхность.
4. В отличие от статистических методов, предлагаемый метод позволяет в удобном визуальном виде наблюдать за динамикой изменений на изображении, что актуально при контроле торца световода.
5. Исследование корней многочлена $f_{nois}(x)$ позволит установить устойчив ли он [42, 43]. Исследование соотношения устойчивости многочлена и физических процессов, происходящих на контролируемой поверхности будет предметом нашей будущей работы.

6. Литература

- [1] García, I. Optical Fiber Sensors for Aircraft Structural Health Monitoring / I. García, J. Zubia, G. Durana, G. Aldabaldetrekú, M.A. Illarramendi, J. Villatoro // Sensors. – 2015. – Vol. 15(7). – P. 15494-15519. DOI:10.3390/s150715494.

- [2] Kajnar, T. Study of the effect of temperature on the optical connectors / T. Kajnar, J. Latal, M. Fajkus, D. Hruby, S. Kepak, V. Vasinek // *Proceedings Photonics, Devices, and Systems*. – 2015. – Vol. 9450. – P. 94500T. DOI: 10.1117/12.2070326.
- [3] Cherian, S. Investigation on harsh environmental effects on polymer fiber optic link for aircraft systems // S. Cherian, H. Spangenberg, R. Caspary // *Proc. SPIE*. – 2004. – Vol. 9202(9). – P. 92020I-11. DOI: 10.1117/12.2061767.
- [4] Thomes, W.J. Vibration performance comparison study on current fiber optic connector technologies / W.J. Thomes, J.T. La Roccaa, R.C. Switzera, M.N. Ott, R.F. Chuskaa, L. Shawn, S.L. Macmurphy // *Proc. SPIE Optical Technologies for Arming, Safing, Fuzing, and Firing*. – 2008. – Vol. 7070. – P. 70700A. DOI: 10.1117/12.796644.
- [5] Lin, S. Effect of polishing conditions on terminating optical connectors with spherical convex polished ends // *Appl. Opt.* – 2002. – Vol. 41. – P. 88-95.
- [6] Gong, Z. A pressure-sensitive fiber optic connector for loss analysis of physical contact / Z. Gong, K. Chen, W. Wang, Y. Yang, W. Peng, Q. Yu, X. Zhou // *Optical Fiber Technology*. – 2017. – Vol. 36(7). – P. 134-138. DOI: 10.1016/j.yofte.2017.03.008.
- [7] Ramachandran, S. Record bandwidth microbend gratings for spectrally flat variable optical attenuators / S. Ramachandran, M. Yan, E. Monberg, F. Dimarcello, P. Wisk, S. Ghalmi // *Lasers and Electro-Optics. CLEO Conference, 2003*. – P. 373-374.
- [8] Duan, J. Influences of polishing on return loss of optical fiber connectors // J. Duan, D. Liu, J. Zhong // *Journal of Central South University of Technology*. – 2005. – Vol. 12(3). – P. 320-323. DOI: 10.1007/s11771-005-0153-3.
- [9] Losada, M.A. Influence of termination on connector loss for plastic optical fibres / M.A. Losada, F.A. Domínguez-Chapman, J. Mateo, A. López, J. Zubia // *16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2014*. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876306.
- [10] Yin, P.L. Polishing of Fibre Optic Connectors / P.L. Yin, H. Huang, W.K. Chen, Z. Xiong, Y.C. Liu, P.L. Teo // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2004. – Vol. 44(6). – P. 659-668.
- [11] Abbasova, T.S. Optimization and Standardization of Optical Media of Computer Complexes Cooperation // *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.* – 2017. – Vol. 1. – P. 86-99. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-1-86-99.
- [12] Шевцов, А.Н. Влияние оптических соединителей (аттенюаторов) на прохождение сигнала в оптическом волокне / А.Н. Шевцов, А.Н. Щитов // *Сборник научных трудов по материалам XI Международного междисциплинарного форума молодых ученых «Наука, техника и инновации: гипотезы, проблемы, результаты» – Москва, 2017*. – С. 220-255.
- [13] Men, C.L. Optical Attenuators and Couplers Characterization // *Trends in Optical Fibre Metrology and Standards. NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences)*, 1995. – P. 285.
- [14] Faults, K.M. Novel Countermeasures for Optical Fiber Connections in Fiber-To-The-Home Networks // *Current Developments in Optical Fiber Technology – InTech*, 2013. – P. 43-71. DOI: 10.5772/54241.
- [15] Brown, M. Achieving IEC Standard Compliance for Fiber Optic Connector Quality through Automation of the Systematic Proactive End Face Inspection Process // *Viavi Solutions Inc*, 2016.
- [16] Zuyuan, H. Effects of fiber endface scratches on return loss performance of optical interface / H. Zuyuan, M. Waqar, S. Erin, A. Nasir, Y.G. Pradieu // *Proc. SPIE Active and Passive Optical Components for WDM Communications II*. – 2002. – Vol. 4870. DOI: 10.1117/12.475564.
- [17] Hannon, D.R. Effects of Repetitive End Cleaning on Multimode Plastic Fiber Optic Cable Performance // *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*. – 2010. – Vol. 19(3). – P. 40-48.
- [18] Glaesemann, G.S. Optical Fiber Mechanical Reliability // *Review of Research at Corning's Optical Fiber Strength Laboratory White Paper WP8002*. – 2017. – Vol. 7. – P. 62.

- [19] Faramarz, E.S. On Impact of Dynamic Pressure and Thermal Loading on Refractive Index and Microbending Loss in Two-Layer Optical Fibers // *International Journal of Optics and Applications*. – 2015. – Vol. 5(5). – P. 168-179. DOI: 10.5923/j.optics.20150505.05.
- [20] Dwivedi, A. Optical Fiber Strength, Fatigue and Handleability After Aging in a Cable / A. Dwivedi, G.S. Glaesemann // *White Paper TR3290*. – 2011. – Vol. 01. – 8 p.
- [21] Hanson, T.A. Incorporating multi-region crack growth into mechanical reliability predictions for optical fibres / T.A. Hanson, G.S. Glaesemann // *Journal of Materials Science*. – 1997. – Vol. 32(20). – P. 5305-5311. DOI: 10.1023/A:1018662727060.
- [22] Филипенко, А.И. Использование интерференционных методов для контроля параметров критических поверхностей коммутационных компонентов волоконнооптических систем // *Радиоэлектроника и информатика*. – 2004. – Т. 2, № 27. – С. 81-88.
- [23] Majorov, E.E. Development of computer interference control system of non-smooth surfaces / E.E. Majorov, A.C. Mashek, S.V. Udakhina, G.A. Tsygankova, G.G. Khaidarov, T.A. Chernyak // *Instruments*. – 2015. – Vol. 11(185). – P. 26-31.
- [24] Чигиринский, Ю.Л. Возможность оценки геометрических параметров микрорельефа поверхности бесконтактным методом / Ю.Л. Чигиринский, А.П. Гонтарь // *Известия ВолгГТУ*. – 2016. – Т. 14, № 193. – С. 40-42.
- [25] Okada, M. Simple Inspection Tool for Cleaved Optical Fiber Ends and Optical Fiber // *Connector End Surfaces*, 2011.
- [26] Злобин, В.К. Обработка аэрокосмических изображений / В.К. Злобин, В.В. Еремеев – М.: Физматлит, 2006. – 288 с.
- [27] Gonzalez, R.C. Digital Image Processing. Upper Saddle River / R.C. Gonzalez, E.W. Richard – N.J.: Prentice Hall, 2002.
- [28] Abuazza, A. Analysis of surface defects using a novel developed fiber-optics laser scanning system / A. Abuazza, D. Brabazon, M.A. El-Baradie // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 143-144. – P. 875-879.
- [29] Junchao, S. Parameterization of Surface Roughness Based on ICESat/GLAS Full Waveforms: A Case Study on the Tibetan Plateau / S. Junchao, M. Massimo, L. Roderik // *Journal of Hydrometeorology*. – 2013. – Vol. 14. – P. 1278-1292. DOI: 10.1175/JHM-D-12-0130.1.
- [30] Zheng, X. A method for surface roughness parameter estimation in passive microwave remote sensing / X. Zheng, K. Zhao // *Chinese Geographical Science*. – 2010. – Vol. 20(4). – P. 345-352.
- [31] Dumbrava, V. Angle Encoding Disk Surface Parameters Evaluation Using Conventional Laser Head: Initial Study / V. Dumbrava, D. Pagodinas, V. Juska, I. Kupciunas, V. Knyva // *MAPAN*. – 2017. – Vol. 32(3). – P. 207-214.
- [32] Gropper, D. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings / D. Gropper, L. Wang, T.J. Harvey // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 94. – P. 509-529. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.10.009.
- [33] Wing Keung, A. Surface-Type Classification Using RGB-D / A. Wing Keung, G. Paul, D. Liu // *Automation Science and Engineering IEEE Transactions*. – 2014. – Vol. 11. – P. 359-366.
- [34] Leite, F.L. Theoretical models for surface forces and adhesion and their measurement using atomic force microscopy / F.L. Leite, C.C. Bueno, A.L. Da Róz, E.C. Ziemath, O.N. Oliveira // *Int. J. Mol. Sci*. – 2012. – Vol. 13(10). – P. 12773-856. DOI: 10.3390/ijms131012773.
- [35] Lidl, R. Applied Abstract Algebra / R. Lidl, G. Pilz – Springer, 1998. – 488 p.
- [36] Зяблицева, Л.В. Линейные коды, исправляющие ошибки, и алгоритмы их подсчёта / Л.В. Зяблицева, С.Ю. Корабельщикова, А.И. Чеснокова // *Эвристические алгоритмы и распределённые вычисления*. – 2014. – Т. 1, № 3. – С.47-59.
- [37] Колесник, В.Д. Декодирование циклических сдвигов / В.Д. Колесник, Е.Т. Мирончиков – М.: Связь, 1968. – 251 с.
- [38] Lidl, R. Introduction to finite fields and their applications / R. Lidl, H. Niederreiter – Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press, 1986. – 407 p.
- [39] Lang, S. Algebra. Graduate Texts in Mathematics – Springer, 2000. – 918 p.

- [40] Salomaa, A. Public-Key Cryptography. EATCS Monographs on Theoretical Computer Science – Springer-Verlag, 1990.
- [41] Яглом, И.М. Как разрезать квадрат – М.: Наука, 1968. – 112 с.
- [42] Постников, М.М. Устойчивые многочлены – М.: Эдиториал УРСС, 2004. – 176 с.
- [43] Постников, М.М. Теория гомотопий клеточных пространств – М.: Наука, 1985. – 416 с.

Structural changes in microroughness preceding surface fatigue failure

S.R. Abulkhanov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The approach of controlling small dynamic changes in the image of the process under study using cyclic codes is considered. We performed a comparative analysis of the same pixel sequences in the original image and the corresponding pixel sequences in the monitored image. Sequences of identical pixels we considered as bits of the original message. The generating polynomials of cyclic codes corresponding to the initial and controlled image, in our opinion, characterize the state of the process under study at different points in time. We interpret the difference between the generating polynomials as an external influence (interference), which leads to changes on the controlled surface. To visualize the interference, we used the packaging method.