

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»  
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-  
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия С. Фундаментальные науки

В серии С научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области информатики и математики, физики.

---

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
Серыя С. Фундаментальныя навукі

У серыі С навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне інфарматыкі і матэматыкі, фізікі.

---

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY  
Series C. Fundamental sciences

Series C includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in computer science and mathematics, physics.

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Адрес редакции:

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 59 95 44, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск: С.А. Вабищевич.  
Редактор С.Е. Рясова.

Подписано к печати 18.06.2021. Бумага офсетная 70 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 12,33. Тираж 100 экз. Заказ 412.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.931

### ВЫЧИСЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПРИЗНАКОВ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ НА ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

канд. техн. наук, доц. Р.П. БОГУШ<sup>1</sup>, академик, д-р техн. наук, проф. С.В. АБЛАМЕЙКО<sup>2,3</sup>,  
И.Ю. ЗАХАРОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Полоцкий государственный университет)

<sup>2</sup>(Белорусский государственный университет)

<sup>3</sup>(Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси)

Рассмотрена задача формирования признаков объектов на видеопоследовательностях. Представлены основные типы движения одиночного объекта и группы. Предложена следующая классификация основных признаков, характеризующих движение объекта на видеопоследовательности: смещение, траектория, скорость и ускорение, время движения. С использованием предложенных обобщений для вычисления признаков динамических объектов описана модификация алгоритма сопровождения множества людей на видеопоследовательностях за счет использования фильтра Калмана для видеонаблюдения вне помещений. Первый этап алгоритма требует обнаружения всех людей во входных кадрах с использованием сверточной нейронной сети YOLOv4. Для сопоставления изображений людей на кадрах выполняется анализ их признаков в пространственной области кадров и во временной области на видеопоследовательности. При этом используются нейросетевые и гистограммные признаки, вычисленные для последнего правильного обнаружения человека в кадре; координаты центра выделенной области человека в кадре; смещение в текущем кадре относительно предыдущего; ширина и высота области на предыдущем кадре; траектория движения; время движения. Представлены результаты экспериментов для видеопоследовательностей, полученных с использованием стационарной и движущейся видеокамеры.

**Ключевые слова:** видеопоследовательность, анализ объектов, признаки движения, сверточная нейронная сеть.

**Введение.** Анализ объектов на видеопоследовательностях требуется при решении многих прикладных задач, включая обнаружение людей и их распознавание, сопровождение объектов для установления их перемещения на одной динамической сцене, повторную идентификацию (реидентификацию) людей в мультикамерных системах видеонаблюдения, определение нехарактерного поведения различных классов объектов. Задача анализа изображений объектов на видеопоследовательностях заключается в том, что требуется извлечение различной информации из последовательности входных кадров изображений объекта, однако для обработки он представляется в виде двумерного массива значений уровней яркостей пикселей. Таким образом, сложность заключается в том, что в отличие от статических изображений в данном случае необходимо учитывать наличие движения. Известно, что временные переходы объектов на трехмерной сцене могут приводить к таким преобразованиям на двумерном изображении, которые невозможно описать существующими аналитическими зависимостями [1], в связи с чем одни и те же признаки одного объекта будут характеризовать разные объекты. Поэтому при практической реализации алгоритмов обработки видео на первом шаге выполняется обнаружение объектов и их локализация или же детектирование областей-кандидатов, которые могут быть отнесены к объектам интереса. Следующий этап требует вычисления признаков выделенных фрагментов, на основе которых выполняется анализ и конечная их классификация. Подход с использованием областей-кандидатов позволяет сократить временные затраты за счет детальной классификации только более схожих объектов с заданными и повысить точность правильного обнаружения в целом.

Для анализа выделенных фрагментов кадров, содержащих объекты, на видеопоследовательности необходимо сформировать комплексный дескриптор, состав которого определяется решаемой прикладной задачей. Следует отметить, что в него необходимо включать признаки, позволяющие описать объект на основе данных не только текущего кадра, но и на последовательности предыдущих, которая позволит оценить особенности движения объекта. Для выделения признаков объектов на изображениях существуют различные подходы [2]. Однако, несмотря на имеющиеся результаты в теории распознавания образов и анализе статических изображений, пока не выработано четких определений и терминов для классификации и выбора признаков объектов, учитывающих их движение на видеопоследовательностях, а лишь присутствуют общие подходы для решения поставленной задачи.

Целью статьи является обобщение и классификация признаков движения объектов на видеопоследовательностях и их применение для задачи сопровождения множества людей с использованием сверточных нейронных сетей (СНС).

**Постановка задачи.** Ключевыми этапами процесса автоматической обработки видеопоследовательностей являются обнаружение объектов, вычисление и анализ их признаков для классификации. Под объектом ( $Ob$ ) понимаем локальную область, которая отличается от окружающего фона и отображает некоторую часть признаков объекта из реального мира.

Видеопоследовательность ( $V$ ), которая получена со стационарно установленной видеокамеры, состоит из набора изображений (кадров) одной и той же сцены, полученных с определенным временным интервалом (частотой кадров):  $V = \{F_k\}$ ,  $k$  – номер изображения в последовательности.

По критерию движения объект ( $Ob_q^{F_k}$ ), который присутствует на кадрах, может быть стационарным или движущимся.

Стационарный объект описывается множеством признаков ( $Ft_{Ob_q^S}$ ) и не изменяющимися в течение интервала времени ( $t$ ) координатами ( $x_{Ob_q}, y_{Ob_q}$ ):

$$Ob_q^S = \{Ft_{Ob_q^S}, x_{Ob_q}, y_{Ob_q}, Ns_{Ob_q^{F_k}}\},$$

где  $(Ft_{Ob_q}, x_{Ob_q}, y_{Ob_q}) = const \forall F_k, k \in t$ ;

$Ns_{Ob_q^{F_k}}$  – множество шумовых воздействий на объект.

Для движущегося объекта на видеопоследовательности наблюдается изменение одного или нескольких параметров: координат ( $x_{Ob_q^{F_k}}, y_{Ob_q^{F_k}}$ ), размеров ( $SZ_{Ob_q^{F_k}}$ ), формы ( $FR_{Ob_q^{F_k}}$ ) на интервале времени ( $t$ ).

Трансформация его формы и (или) размеров изменяет его признаки на кадрах ( $ft_{Ob_q^{F_k}}$ ). Соответственно, движущийся объект описывается как

$$Ob_q^D = \{ft_{Ob_q^{F_k}}, x_{Ob_q^{F_k}}, y_{Ob_q^{F_k}}, Ns_{Ob_q^{F_k}}\},$$

где  $Ft_{Ob_q^D}$  – множество признаков динамического объекта,  $Ft_{Ob_q^D} \supseteq ft_{Ob_q^{F_k}}, \forall k \in t$ . Как правило, для движущегося объекта характерно изменение его признаков на кадрах, однако  $ft_{Ob_q^{F_k}} \cap ft_{Ob_q^{F_{k+1}}}$ .

На изображении обнаруженный объект выделяется, как правило, прямоугольной рамкой и для дальнейших итераций обработки используется анализ данной области кадра.

Анализ объектов предполагает преобразование выделенного фрагмента изображения из его исходного представления в конечное, в качестве которого обычно используется вектор признаков, характеризующий объект в целом:

$$Ob = \{ob_{ij}\} \rightarrow P_{Ob} = \{p_l\}, l = 1, \dots, L,$$

где  $P_{Ob}$  – множество признаков ( $p$ ) изображения объекта.

Результат анализа фрагмента изображения в кадре на основе выделенных признаков должен содержать информацию о наличии или отсутствии объекта, о месте его положения в кадре и о классе объекта, т.е. объект в дальнейшем должен быть отнесен к определенному классу (распознан). В отличие от изображений, для видеопоследовательности требуется выполнять анализ не только в пространственной области, но и во временной. Для описания объектов необходимо применять признаки, которые инвариантны относительно яркостных и геометрических преобразований с учетом их временных изменений на видеопоследовательности: сдвиг, поворот и изменение масштаба. Для общего случая задача определения наиболее эффективного набора признаков движущихся объектов теоретически и технически не решена.

**Типы движения объектов.** Движение одиночного объекта, которое наблюдается на последовательности изображений, обычно представляет собой один из четырех основных элементов или их комбинацию [3]: смещение в сторону (рисунок 1, а) приводит к изменению его координат, смещение по оптической оси видеокамеры (рисунок 1, б) приводит к увеличению размеров либо к их уменьшению, вращение на постоянном расстоянии от видеокамеры вокруг оптической оси (рисунок 1, в) приводит к повороту объекта

на изображении, вращение вокруг собственной оси перпендикулярно оптической оси на постоянном расстоянии от видеокамеры (рисунок 1, з) приводит к визуальному изменению внешних признаков объекта, координаты и размер не изменяются.

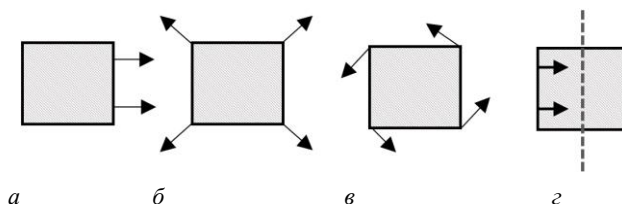


Рисунок 1. – Основные типы движения объектов на видеопоследовательностях

За время наблюдения объект может изменять свой класс по критерию движения. Он переходит из класса «стационарный» в класс «движущийся» на  $k$ -кадре, если выполняется хотя бы одно из условий:

$$\left(x_{Ob_q}^{F_{k-1}}, y_{Ob_q}^{F_{k-1}}\right) \neq \left(x_{Ob_q}^{F_k}, y_{Ob_q}^{F_k}\right), \left(FR_{Ob_q}^{F_{k-1}}\right) \neq \left(FR_{Ob_q}^{F_k}\right), \left(SZ_{Ob_q}^{F_{k-1}}\right) \neq \left(SZ_{Ob_q}^{F_k}\right).$$

Переход движущегося объекта в класс «стационарный» происходит после прекращения его движения, соответственно, координаты, форма и размеры объекта на соседних кадрах должны быть идентичны. За время наблюдения возможны неоднократные изменения классов для одного и того же объекта по критерию движения, тогда за этот период движение объекта будет иметь дискретный характер.

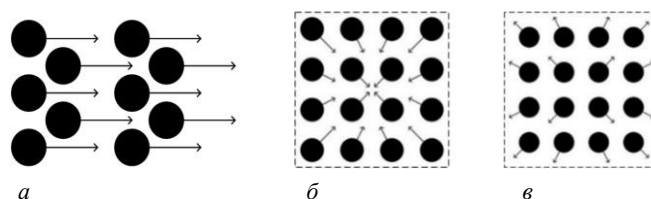
На каждом кадре последовательности может присутствовать множество движущихся объектов, поэтому при видеомониторинге часто возникает задача обнаружения и отслеживания поведения не единичного, а группы объектов (множества или толпы людей, клеточной популяции, движения автомобилей и т.п.).

При исследовании движения группы объектов на видео можно выделить три типа движения [4]: направленное движение объектов, агрегация объектов или их групп (движение к общему центру), рассеивание объектов (движение от центра).

Направленное движение определяется тогда, когда несколько объектов движутся в одном и том же направлении (рисунок 2, а). Основными признаками такого движения являются: одновременное перемещение нескольких объектов из одной области изображения в другую, скорость движения объектов, превышающая скорость движения объектов фона, совпадающие направления движения объектов.

Под агрегацией понимают движение объектов по направлению к общему центру. Движение объектов может быть симметричным или могут преобладать два направления (рисунок 2, б). К признакам агрегации относятся: перемещение объектов в одну область изображения, большая скорость движения объектов по сравнению со скоростью их хаотического движения, возможность выделения двух и более преобладающих направлений движения.

При рассеивании движение объектов осуществляется от общей точки на изображении (рисунок 2, в). К признакам рассеивания относятся: перемещение объектов от их общего центра на другие участки изображения, скорость движения объектов выше скорости хаотического движения, возможность выделения двух и более преобладающих направлений движения.



а – направленное движение; б – агрегация; в – рассеивание

Рисунок 2. – Основные типы движения группы объектов

Анализ рассмотренных типов движения показывает, что для эффективного анализа движущихся объектов на видеопоследовательностях следует использовать различные наборы признаков, включая пространственные характеристики объекта в кадре, и признаки, описывающие особенности движения объектов.

**Классификация признаков движущихся объектов на видео.** Можно выделить следующие классификации признаков и соответствующие им классы:

- по типу объекта (области) на видео: пиксели, блоки пикселей, фрагменты объекта, объект, группа объектов;
- по модели представления: в спектральной и временной области;

- по типу движения: для одиночного объекта и для группы объектов;
- по «уровню» признака: первичные и вторичные.

К признакам, характеризующим движение объекта, на видеопоследовательности целесообразно отнести:

- 1) смещение;
- 2) траектория движения;
- 3) скорость и ускорение;
- 4) время движения.

Можно выделить следующие параметры признака смещения объекта: длина вектора смещения объекта от кадра к кадру, направление вектора смещения объекта, плотность векторов смещения, однородность векторов смещения, карты движения, гистограмма оптического потока.

Первичными признаками смещения являются длина вектора и его направление, которые могут применяться для оценки этих величин представленных уровней декомпозиции объекта. На их основе вычисляются вторичные признаки: плотность и однородность векторов, карты движения, гистограмма оптического потока. Максимально плотным считается оптический поток, если он найден для всех точек объекта интереса. Однородность векторов максимальна, если все они по модулю и направлению одинаковы.

Гистограммы оптического потока (HOF) [5] позволяют извлечь информацию об относительном движении небольших фрагментов соседних кадров и оценить их связность в движении. Вычисление HOF основано на разбиении векторного поля на равные прямоугольные части (рисунок 3, а) и нахождении гистограмм количества векторов и их суммарной длины по диапазону направлений. Гистограммы состоят из столбцов, каждый из которых отражает количество или суммарную длину векторов, попавших в заданный диапазон значений направлений, и позволяют классифицировать движение объектов определенных областей. Визуально такие гистограммы отображают в виде векторов, исходящих из одной точки и имеющих направления, равные среднему значению диапазона направлений столбца, и длины, пропорциональные столбцам (рисунок 3, б). Итоговая гистограмма формируется на основе объединения гистограмм, рассчитанных для каждой части (рисунок 3, в).

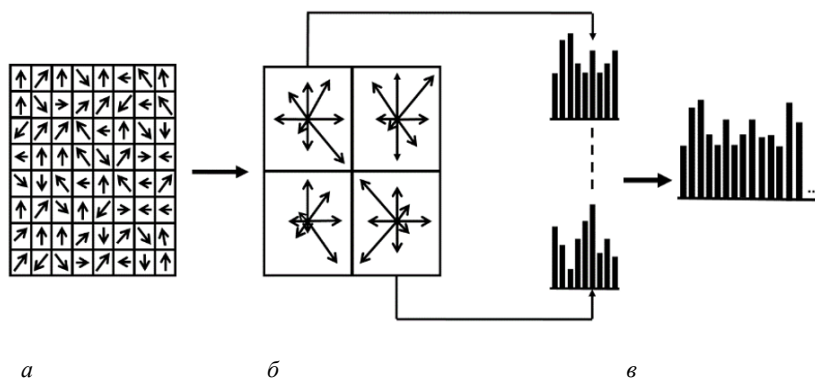


Рисунок 3. – Принцип получения гистограммы оптического потока

Интегральный оптический поток применяется для анализа движения групп объектов, например, людей [6]. Для каждого пиксела или блока изображения он формируется как результат интегрирования значений оптического потока по заданному количеству кадров видеопоследовательности:

$$VOF_t^N(p) = \sum_{i=0}^{N-1} OF_{t+i}(p_{t+i}),$$

- где  $OF_t$  – классический оптический поток для видеопоследовательности  $V$ ;
- $VOF_t^N$  – интегральный оптический поток фрагмента видеопоследовательности для  $N$  кадров;
- $p_{t+i}$  – положение пиксела  $I_t(p)$  на  $t+1$  кадре видеопоследовательности.

Для определения типа движения совокупности объектов в работе [6] построены четыре вида карт движения, использующие анализ интегрального оптического потока: карта сходимости пикселей, определяющая для каждого узла число пикселей, перемещающихся по направлению к нему; карта расходимости пикселей, определяющая число пикселей, движущихся по направлению от данного узла; результирующая карта сходимости пикселей, отображающая результирующее движение всех пикселей по направлению к данному узлу; результирующая карта расходимости пикселей, отображающая результирующее движение всех пикселей по направлению от данного узла.

Рассмотренные вторичные признаки позволяют выполнять локализацию объектов и оценку их поведения на динамической сцене на основе анализа видеопоследовательности.

Вторым признаком, который важен при анализе движения, является *траектория*, отображающая движение объекта на кадрах видеопоследовательности в виде тонкой линии или линии единичной ширины поперечного сечения на кадре. Данная линия может быть построена на основе координат объекта на предыдущих кадрах видеопоследовательности. Могут быть разные варианты их определения, но наиболее распространенный подход предполагает нахождение центра объекта (один пиксел на кадре) с координатами  $(x_{Ob_q}^{F_i}, y_{Ob_q}^{F_i})$ . Тогда траектория движения объекта на видео описывается последовательностью в виде набора координат центра объекта на каждом кадре:

$$Tr(Ob^D) = (Ob_{F_i}^D) = \{(x_{Ob_q}^{F_1}, y_{Ob_q}^{F_1}), (x_{Ob_q}^{F_2}, y_{Ob_q}^{F_2}), (x_{Ob_q}^{F_3}, y_{Ob_q}^{F_3}), \dots, (x_{Ob_q}^{F_n}, y_{Ob_q}^{F_n})\}.$$

Следует учитывать, что объекты могут появляться на видеопоследовательности не с первого кадра и выходить за пределы сцены в некоторый момент времени на  $n$ -м кадре, а не на последнем кадре. Тогда траектория движения может быть построена с кадра  $m$ , на котором обнаружен объект и до  $n$ -го кадра. Таким образом, траектория создается при появлении нового объекта в кадре и, как правило, удаляется при выходе его за пределы кадра. На время кратковременного скрывания движущегося объекта за другими или при невозможности его обнаружения по другим причинам, траектория прерывается, но восстанавливается через несколько кадров, т.е. наблюдается фрагментация траектории движения. Поэтому для оценки состояния необходим учет особенностей движения объекта, что может быть обеспечено использованием некоторых априорных сведений о перемещении объекта на предыдущих кадрах и его динамических возможностях, на основе которых может быть предварительно построена модель траектории, которая может быть линейной или нелинейной, периодической или непериодической. Исходя из траектории, может быть вычислено перемещение объекта на видео для заданного интервала времени, граничные значения которого определяются номерами кадров, на которых необходимо определить координаты положения объекта и найти между ними кратчайшее расстояние в координатах кадра.

*Скорость и ускорение* движения объекта в координатах кадра являются следующей группой важных признаков объекта, которые можно рассчитать путем вычисления первой и второй производных по одному из 4 или 8 направлений в зависимости от используемого типа связности пикселей.

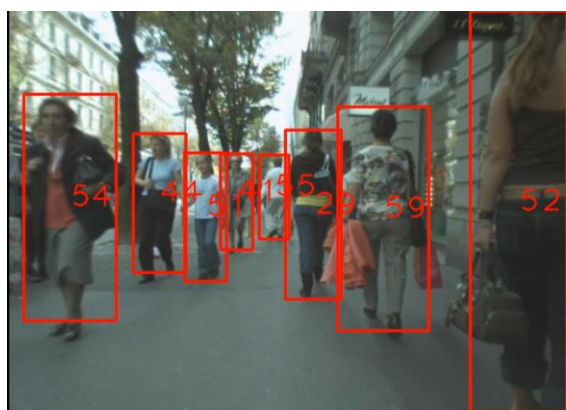
Четвертым признаком, который необходим при анализе движения, является *время движения объекта* (временной признак). Основными параметрами этого признака являются время начала и окончания движения объекта, вторичными – интервалы времени, характеризующие непрерывное движение объекта и его стационарность за весь период наблюдения.

**Сопровождение множества людей на видеопоследовательностях на основе анализа комплекса признаков.** Для сопровождения множества людей эффективным является принцип сопровождения через обнаружение. В работе [7] предложен алгоритм, который использовал СНС YOLOv3 для обнаружения людей. Этап детектирования является одним из ключевых в алгоритмах трекинга, построенных на основе сопровождения с использованием обнаружения, так как точность его работы в значительной мере определяет и качество сопровождения. Поэтому для дальнейшего развития алгоритма будет использоваться более точная СНС YOLOv4, преимущества которой указаны в [8]. После обнаружения фигуры человека на кадре вычисляются и анализируются следующие признаки выделенного фрагмента в пространственной области кадров и во временной области на видеопоследовательности: СНС и гистограммные признаки канала цветного тона пространства HSV человека при последнем правильном его обнаружении на кадре, координаты центра выделенной области человека в кадре, смещение в текущем кадре относительно предыдущего, ширина и высота области на предыдущем кадре, траектория движения, время движения. Для всех сопровождаемых и обнаруженных на текущем кадре объектов вычисляются значения схожести, на основе которых устанавливается соответствие между обнаруженными и сопровождаемыми объектами. Установление соответствия для детектированных людей и их траекторий выполняется на основе венгерского алгоритма. Траектория создается при первом обнаружении человека, а удаляется если данный человек на протяжении определенного числа последовательных кадров не детектируется и для него отсутствует сопоставление с предыдущими кадрами, т.е. считается, что он вышел из сцены, которую снимает видеочамера.

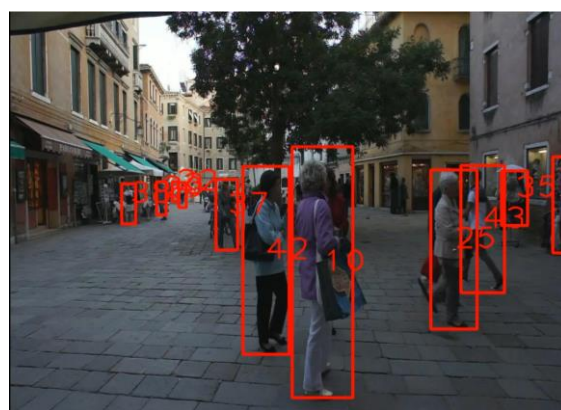
При сопровождении людей в помещениях траектория их движения имеет нелинейный характер и является труднопредсказуемой, поэтому построение и использование модели траектории для прогнозирования нового положения объекта не применяется в алгоритме [7]. При наблюдении вне помещений человек, как правило, перемещается в одном направлении на значительно большем количестве кадров, чем в помещении. Значит, траектория движения человека при внешнем видеонаблюдении ближе к линейной на более значительных временных интервалах. Следовательно, для данной задачи предлагается модификация алгоритма для предсказания положения человека на текущем кадре относительно предыдущих

с использованием линейного фильтра Калмана [9]. Первый шаг алгоритма Калмана выполняет прогноз значения возможного положения человека на текущем кадре на основе его траектории движения, а на втором шаге выполняется корректировка с учетом полученного прогнозируемого положения и сопоставления с ранее найденными изображениями людей на последовательности кадров. Следует отметить, что линейный фильтр Калмана чувствителен к единичным выбросам и нелинейности траектории движения.

Для оценки возможности практического использования алгоритма важной задачей является определение эффективности сопровождения с учетом совместной работы этапов обнаружения и трекинга, поэтому тестирование алгоритма сопровождения для наблюдения в помещениях и модифицированного алгоритма для применения вне помещений, который использует фильтр Калмана, выполнено с учетом результатов обнаружения людей СНС YOLOv4. В этом случае ошибки работы данной СНС приводят к ухудшению критериев оценки сопровождения алгоритмов, но эксперименты отражают реальную результативность алгоритмов сопровождения, что очень важно для принятия решения об их применении на практике. Тестирование проведено по методике MOT16 из [10] и определены критерии оценки сопровождения алгоритма. Основные из этих критериев представлены в таблице 1: обобщающий точность и полноту критерий путем вычисления их гармонического среднего за период (IDF1), точность локализации сопровождаемых людей (MOTP), количество отслеживаемых траекторий (MT), количество потерянных траекторий (ML), общее количество срывов за счет перезахвата ложного объекта при сопровождении (IDS), точность сопровождения множества объектов (MOTA). Для оценки эффективности сопровождения людей вне помещений использованы видеопоследовательности из базы данных MOT16, которые получены с использованием нестационарной видеокамеры при естественном и искусственном уличном освещении в ночное время (примеры показаны на рисунке 4).



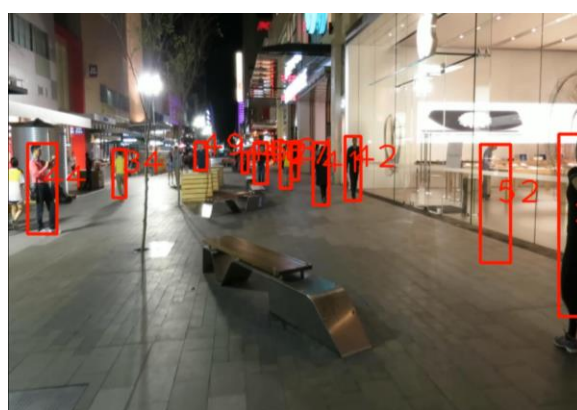
а



б



в



г

**Рисунок 4. – Примеры сопровождения множества людей вне помещения с использованием движущейся видеокамеры**

Эксперименты для видеопоследовательностей, полученных внутри помещений, проведены на шести видео со стационарной камеры наблюдения (рисунок 5). Общее количество кадров, для которых характерно изменение освещения, нелинейная траектория движения людей, их перекрытие объектами фона или пересечение их траекторий, схожие характеристики и др., составляет 11890.



Рисунок 5. – Примеры сопровождения множества людей с нелинейной траекторией движения в помещении с использованием стационарной видекамеры

Таблица 1. – Результаты экспериментов по оценке результативности сопровождения множества людей

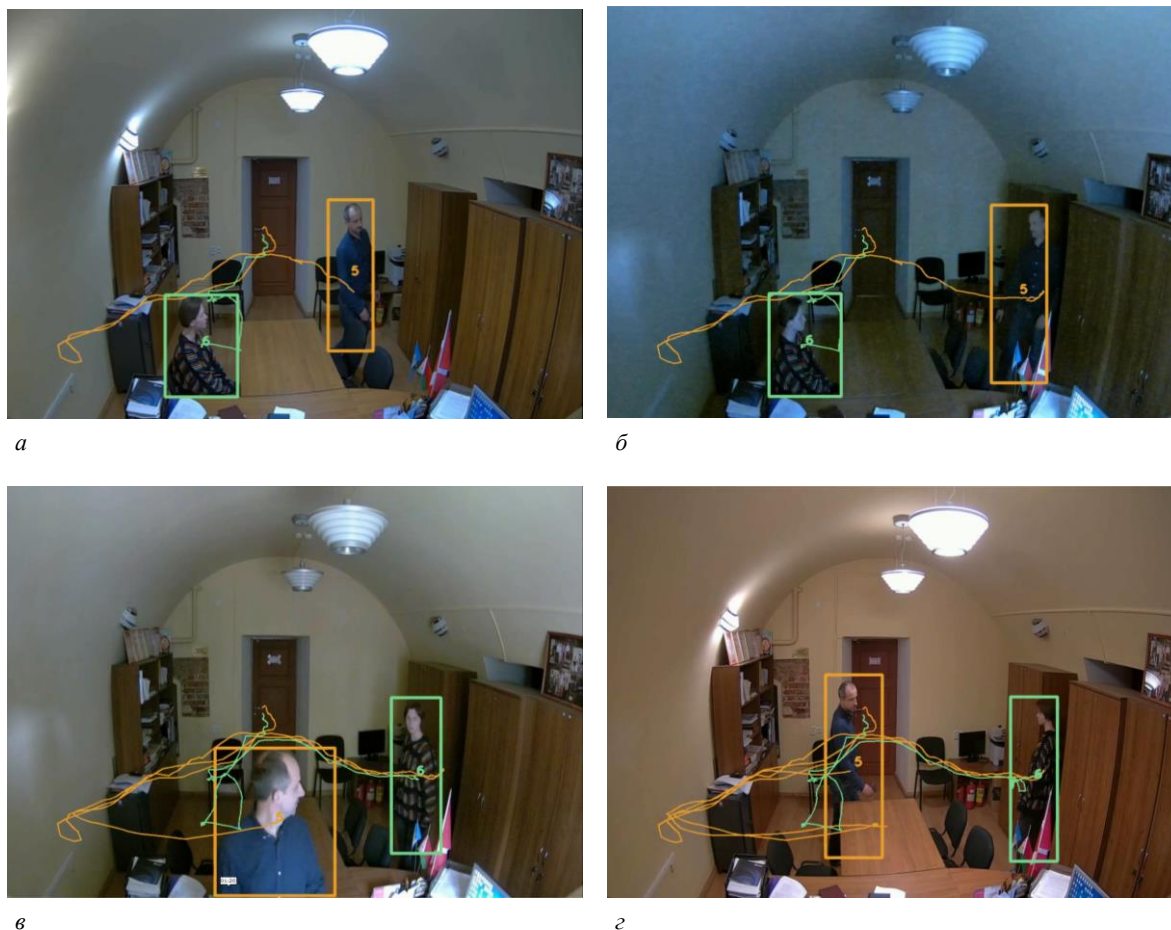
Видеоряд	IDF1	МОТР	MT	ML	IDS	МОТА
MOT16-02 [10]	24,4223	75,6913	7	30	184	21,4266
MOT16-04 [10]	29,3523	77,4336	7	44	253	27,1758
MOT16-05 [10]	34,0707	73,0136	27	27	179	44,7199
MOT16-09 [10]	37,9400	78,9493	9	2	100	48,2024
MOT16-10 [10]	30,1604	70,9951	10	23	239	30,2565
MOT16-11 [10]	38,8816	79,7906	17	29	139	49,2697
MOT16-13 [10]	28,3641	69,5090	16	55	235	23,0742
Рисунок 5, а	66,6366	81,1972	2	0	8	83,5165
Рисунок 5, б	74,1494	80,9533	2	0	1	90,2609
Рисунок 5, в	75,3374	83,1033	2	0	13	87,1513
Рисунок 5, г	85,2735	85,9602	3	0	11	98,6632
Рисунок 5, д	68,8444	79,1090	3	0	3	92,3880
Рисунок 5, е	95,1529	80,9356	3	0	3	90,7566

Анализ таблицы 1 и рисунков 4, 5 свидетельствует, что на точность работы алгоритмов значительно влияет результативность обнаружения людей. На видеопоследовательностях, полученных с помощью движущейся камеры из-за значительных шумовых воздействий, работа детектора достаточно долгое время характеризуется пропуском многих людей, что приводит к потере текущего индекса и присвоению нового при возобновлении обнаружения. Также из-за шумовых факторов во многих случаях наблюдается неточное выделение области человека в кадрах. Например, область человека с индексом 38 в кадре на рисунке 4, в обнаружена с высокой степенью точности, а для того же человека на рисунке 4, г детектор включил в область значительно больший фрагмент кадра из-за тени. Это приводит в дальнейшем к значительному отличию пространственных признаков фрагментов и переназначению индекса для сопровождаемого человека (в данном случае – индекс 52 на рисунке 4, з). Кроме этого, в некоторых видео из [10], получаемых переносимой камерой в потоке идущих людей, достаточно продолжительное время присутствуют движущиеся люди, снимаемые на близком расстоянии, и лишь часть их фигур отображается в кадрах. Применяемая СНС для выделения признаков людей обучена с использованием баз данных PRID [11] и iLIDS [12], которые не содержат полные изображения фигур людей, поэтому для повышения точности сопровождения в таких условиях требуется доработка базы данных для обучения СНС, вычисляющей признаки обнаруженных людей на видеопоследовательности. Однако предложенный алгоритм улучшает точность сопровождения на тестовых видеопоследовательностях, полученных вне помещения, по сравнению с алгоритмом из [13], так как для его реализации из [14] обеспечивается точность сопровождения для всех видео из [10] МОТА = 0,288306, а для предложенного алгоритма МОТА = 0,300860. Для видеопоследовательностей со стационарной камеры



наблюдения в помещении также обеспечивается улучшение точности: для алгоритма из [13] MOTA = 0,8793, для предложенного алгоритма с использованием СНС YOLOv4 MOTA = 0,9266.

Пример применения алгоритма для видеонаблюдения в помещении с изменяющимся уровнем освещения и построением траекторий движения людей показан на рисунке 6.



**Рисунок 6. – Пример сопровождения людей внутри помещений с использованием стационарной видекамеры с отображением их траекторий движения на кадрах**

Анализ траекторий на рисунке 6, *а* показывает, что в помещение вошли два человека, один из них, с индексом 6, подошел к столу и сел на стул, а человек с индексом 5 шел с левой стороны стола к видеокамере, затем развернулся и, обойдя стол, пошел в правую сторону по направлению к шкафам. Рисунок 6, *б* свидетельствует о том, что яркость изображения кадра значительно уменьшилась, т.к. было выключено освещение человеком с индексом 5, что подтверждается сравнением яркости светильников на рисунках 6, *а* и 6, *б*. После этого возникло большое количество шумов, однако сопровождение выполняется корректно (см. рисунок 6, *б*), что подтверждает эффективность разработанного алгоритма. Через незначительное время средствами аппаратной автоподстройки камеры яркость изображения кадра увеличилась, количество шумов стало меньше, обнаружение и сопровождение людей выполнялось корректно (см. рисунок 6, *в*). Траектории движения на рисунке 6, *г* свидетельствуют о том, что освещение в помещении включил человек с индексом 6. Таким образом, анализ траекторий на выбранном кадре позволяет определить, как передвигался каждый человек на динамической сцене, что очень важно для ряда прикладных задач.

**Заключение.** Анализ объектов на видеопоследовательности предполагает преобразование выделенного фрагмента изображения из его исходного представления в вектор признаков, который в дальнейшем используется для классификации и распознавания. Для последовательностей изображений, в отличие от изображений статических, требуется не только выполнять анализ объекта в пространственной области кадра, но и учитывать признаки движения, поэтому в статье рассмотрены основные типы и особенности движения одного объекта и группы объектов. Предложена следующая классификация основных признаков, характеризующих движение объекта на видеопоследовательности: смещение, траектория, скорость и ускорение, время движения. Приведены описания алгоритмов сопровождения людей на видеопоследовательностях, полученных в помещении и при наружном наблюдении, и выполнено

их тестирование по методике MOT16 по оценке критериев качества работы. Представлены примеры результатов обнаружения людей на видеопоследовательностях, а также кадры с визуализацией траекторий движения людей в условиях значительного изменения освещенности сцены.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Клетте, Р. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / Р. Клетте ; пер. с англ. А.А. Слинкин. – М. : ДМК Пресс, 2019. – 506 с.
2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. –3-е изд. – М. : Техносфера, 2012. – 1104 с.
3. Sonka, M. Image Processing, Analysis, and Machine Vision / M. Sonka, V. Hlavac, R Boyle. – 4th ed. – Cengage Learning, 2015. – 930 p.
4. Application of Integral Optical Flow for Determining Crowd Movement from Video Images Obtained Using Video Surveillance Systems / H. Chen [et al.] // J. of Appl. Spectrosc. – 2018. – Vol. 85, iss. 1. – P. 126–133.
5. Histograms of oriented optical flow and Binet-Cauchy kernels on nonlinear dynamical systems for the recognition of human actions / R. Chaudhry [et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2009. – 1932–1939.
6. Motion Maps and Their Applications for Dynamic Object Monitoring / H. Chen [et al.] // Pattern Recogn. Image Anal. – 2019. – 29. – P. 131–143.
7. Богуш, Р.П. Алгоритм сопровождения людей на видеопоследовательностях с использованием сверточных нейронных сетей для видеонаблюдения внутри помещений / Р.П. Богуш, И.Ю. Захарова // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 1. – С.109–116.
8. Bochkovskiy, A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection [Electronic resource] / A. Bochkovskiy, Ch.-Y. Wang, H.-Y. M. Liao. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>. – Date of access: 12.08.2020.
9. Simon, D. Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches / D. Simon. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2006.
10. MOTChallenge: The Multiple Object Tracking Benchmark [Electronic resource]. – Mode of access: <https://motchallenge.net>. – Date of access: 16.06.2020.
11. Person Re-ID (PRID) Dataset [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.tugraz.at/institute/icg/research/team-bischof/lrs/downloads/prid11/>. – Date of access: 12.04.2019.
12. iLIDS Video re-IDentification (iLIDS-VID) Dataset [Electronic resource]. – Mode of access: [http://www.eecs.qmul.ac.uk/~xiatian/downloads\\_qmul\\_iLIDS-VID\\_ReID\\_dataset.html](http://www.eecs.qmul.ac.uk/~xiatian/downloads_qmul_iLIDS-VID_ReID_dataset.html). – Date of access: 12.04.2019.
13. Wojke, N. Simple online and real time tracking with a deep association metric / N. Wojke, A. Bewley, D. Paulus // IEEE International Conference on Image Processing 2017: 3645-3649. – DOI: 10.1109/ICIP.2017.8296962.
14. Real-time Multi-person tracker using YOLOv3 and deep\_sort with tensorflow [Electronic resource]. – Mode of access: [https://github.com/Qidian213/deep\\_sort\\_yolov3](https://github.com/Qidian213/deep_sort_yolov3). – Date of access: 16.06.2019.

Поступила 05.03.2021

#### CALCULATION AND ANALYSIS OF MOVING OBJECT FEATURES FOR TRACKING IN VIDEO SEQUENCES

**R. BOHUSH, S. ABLAMEYKO, I. ZAHKARAVA**

*This paper discusses the formation of object features considering the peculiarities of their presentation in video sequences. The main types of movement of a single object and object group are presented. We propose a classification of features that characterize the movement of objects in a video sequence. A modification of the algorithm for tracking multiple people on video sequences using the Kalman filter for outdoor video surveillance is described. The first stage requires detecting person in the input frames by YOLOv4 convolutional neural network. For assignment problem solving of person we store information about individual object in spatial domain of frames and in the time domain on a video sequence. For person description feature set is used: neural network and histogram features, center coordinates of a person in the frame, offset in the current frame relative to the previous one, person width and height in the previous frame, trajectory and time of movement. The results of experiments for video sequences obtained using a stationary and moving video camera are presented.*

**Keywords:** video sequence, object analysis, motion features, convolutional neural network.

УДК 664.012

**СИНТЕЗ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ВАКУУМ-ВЫПАРНЫМИ УСТАНОВКАМИ**

*канд. техн. наук, доц. М.М. КОЖЕВНИКОВ, С.Н. АДАМОВ  
(Могилевский государственный университет продовольствия)*

*Предложен метод синтеза комбинированных автоматических систем управления температурой, концентрацией и глубиной вакуума для вакуум-выпарных установок, основанный на линеаризованных моделях динамики. В ходе выполненного анализа определены каналы нанесения возмущающих воздействий и найдены передаточные функции динамических компенсаторов для контуров регулирования температуры, концентрации и вакуума. Предложенный метод позволяет найти передаточные функции динамических компенсаторов в различных режимах работы вакуум-выпарной установки.*

**Ключевые слова:** динамическая модель, комбинированное управление, вакуум-выпарная установка.

На предприятиях химической и пищевой промышленности широко распространено использование вакуум-выпарных установок, обеспечивающих концентрирование различных растворов при их кипении на пониженной температуре. Поддержание режимных параметров в таких установках обычно обеспечивается локальными одноконтурными системами автоматического управления температурой, вакуумметрическим давлением и концентрацией сухих веществ в слабом растворе [1; 2]. При этом управляющие устройства представляют собой цифровые регуляторы, настройка параметров которых производится с использованием упрощенных динамических моделей вакуум-выпарной установки [3; 4].

Существенный недостаток упрощенного подхода заключается в невозможности учета изменений температуры и расхода слабого раствора, подаваемого в установку, а также отклонений вакуумметрического давления. Это приводит к необходимости оперативной корректировки параметров настройки автоматических регуляторов вакуума и температуры при отклонениях нагрузок вакуум-выпарного аппарата. Технологический персонал, проводя корректировки параметров, зачастую существенно повышает тепловые нагрузки, вследствие чего неэффективно используются теплоносители.

В данной статье вакуум-выпарная установка представлена, в виде многомерного объекта автоматического управления, на основе которого реализован метод синтеза комбинированных автоматических систем управления температурой, концентрацией и глубиной вакуума. Предложенный метод позволяет эффективно компенсировать влияние возмущающих воздействий, вызванных колебаниями расхода и температуры слабого раствора на входе в выпарной аппарат, а также изменениями вакуумметрического давления. Разработаны структурные схемы комбинированных систем управления вакуум-выпарной установкой и получены выражения для расчета передаточных функций динамических компенсаторов возмущающих воздействий. Использование таких систем автоматического управления позволит более эффективно использовать теплоносители в вакуум-выпарных установках в химической и пищевой промышленности.

Схема исследованной в данной работе вакуум-выпарной установки с одним контуром представлена на рисунке 1 [1; 2]. На вход выпарного аппарата 1 подается слабый раствор, который затем поступает в греющую камеру 2, под нижнюю трубную решетку, где закипает и начинает поступать в кипятильные трубы. По кипятильным трубам парожидкостная смесь поступает в емкость над трубной решеткой и направляется по циркуляционной трубе 3 в сепаратор 4. Вследствие возникшей при этом центробежной силы происходит разделение вторичного пара и жидкости. Жидкость по циркуляционной трубе 5 поступает назад в греющую камеру, а вторичный пар подается в конденсатор 7. Вторичный пар также используется для подогрева выпарной установки посредством термокомпрессорного блока 6. Воздух и неконденсируемые газы отводятся посредством парэжекторного агрегата 8. В вакуум-выпарной установке имеют место следующие процессы: теплообмен между поверхностью нагрева и слабым раствором, кипение слабого раствора, сепарация пара и разделение жидкости и паров растворителя, конденсация пара.

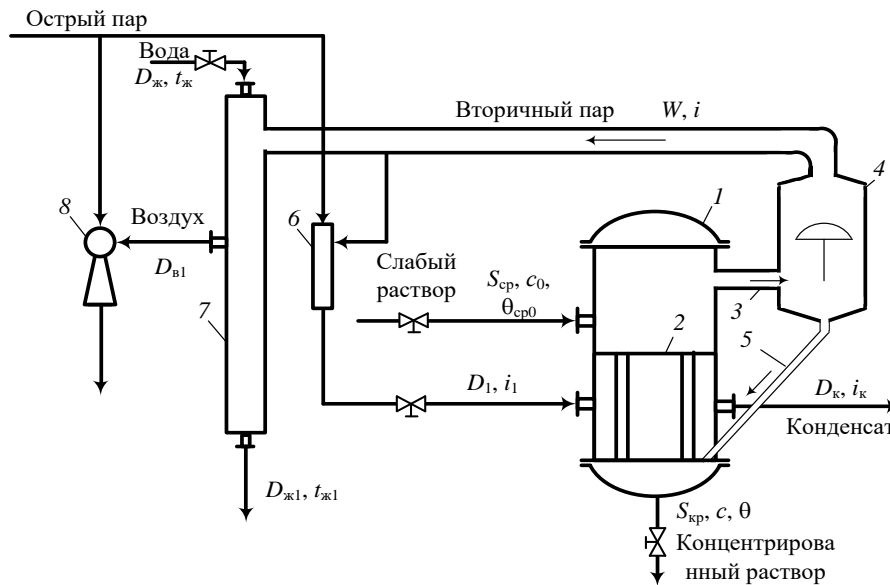


Рисунок 1. – Схема исследованной однокорпусной вакуум-выпарной установки

Представим греющую камеру в виде совокупности таких элементов, как пар в камере, пленка конденсата на поверхности нагрева, неконденсированные газы, конденсат в греющей камере, металлический корпус и изоляция [5]. При составлении модели для греющей камеры предположим что объем греющей камеры и объем пара равны, температуры пленки конденсата и пара изменяются с одинаковой скоростью, греющая камера и изоляция представляют собой сосредоточенные емкости, причем температура изоляции равна  $\theta_{и} = (\theta_{м} + \theta_{о}) / 2$ , где  $\theta_{м}$  – температура корпуса,  $\theta_{о}$  – температура внешней среды. Учитывая указанные допущения, тепловой и материальный баланс в греющей камере могут быть представлены в виде

$$p(V\rho_{п} + V_{к}\rho_{к}) = D_1 - D_к - D'_1; \quad (1)$$

$$p(V\rho_{п}u_{п} + V_{к}\rho_{к}c_{к}t_{к}) + (c_{мт}G_{мт} + 0,5c_{и}G_{и})pt_{п} = (D_1 - D'_1)i_1 - D_кi_к - Q_1 - Q', \quad (2)$$

где  $p = d/d\tau$  – оператор дифференцирования, где  $\tau$  – время;

$V$  – объем камеры;

$\rho_{п}$  – плотность пара;

$V_{к}$  – объем конденсата;

$\rho_{к}$  – плотность конденсата;

$D_1$  – расход пара;

$D_к$  – расход конденсата;

$D'_1$  – расход пара для удаления неконденсирующихся газов;

$u_{п}$  – энергия пара греющей камеры;

$c_{к}$  – теплоемкость конденсата;

$t_{к}$  – температура конденсата;

$c_{мт}$  – теплоемкость корпуса;

$G_{мт}$  – масса корпуса;

$t_{п}$  – температура пара;

$c_{и}$  – теплоемкость изоляции;

$G_{и}$  – масса изоляции;

$i_1$  – энтальпия пара;

$i_к$  – энтальпия конденсата;

$Q'$  – потери тепла во внешнюю среду;

$Q_1$  – тепло, передаваемое поверхности нагрева.

Величину  $Q_1$  определим по уравнению теплопередачи:

$$Q_1 = F_1'(t_n - t_c) / (1/\alpha_1 + \delta_c/2\lambda_c), \quad (3)$$

где  $F_1'$  – площадь поверхности со стороны пара;  
 $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $\delta_c$  – толщина стенки нагреваемой поверхности;  
 $\lambda_c$  – теплопроводность стенки;  
 $t_c$  – температура нагреваемой поверхности.

На основе выражений (1)–(3) получим зависимость для описания изменения температуры пара

$$a_1 p t_n = -a_2 t_n + a_3 t_c + a_4 (D_1 - D_1') + a_5, \quad (4)$$

где  $a_1 = V(\rho_n \partial u_n / \partial t_n + (u_n - i_k) \partial \rho_n / \partial t_n) + V_{\kappa \rho_{\kappa}} (c_{\kappa} + t_{\kappa} \partial c_{\kappa} / \partial t_n) + c_{\text{мт}} G_{\text{мт}} + 0,5 c_n G_n$ ;  
 $a_2 = a_3 = F_1' / (1/\alpha_1(t_n, t_c) + \delta_c/2\lambda_c)$ ;  
 $a_4 = i_1 - i_k$ ;  
 $a_5 = Q_1$ .

Температура поверхности нагрева  $t_c$  описывается уравнением [4]

$$c_1 p t_c = -c_2 t_c + a_2 t_n + c_3 \theta, \quad (5)$$

где  $c_1 = c_{\text{мт}} G_3$ , где  $G_3$  – масса металла окружающего парожидкостное пространство;  
 $c_2 = a_2 + c_3$ , где  $c_3 = F_1'' / (1/\alpha_2(t_c, \theta, b) + \delta_c/2\lambda_c + R_n(\bar{\tau}))$ ;  
 $\theta$  – температура кипения слабого раствора;  
 $F_1''$  – площадь поверхности, нагреваемой со стороны слабого раствора;  
 $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $b$  – величина концентрации сухих веществ в слабом растворе;  
 $R_n(\bar{\tau})$  – величина термического сопротивления накипи;  
 $\bar{\tau}$  – время работы выпарной установки после чистки поверхности нагрева.

При использовании уравнения (5) предполагается выполнение условий: трубы испарителя одинаковы по размерам и имеют одинаковые теплофизические свойства, отсутствует тепловой поток вдоль трубы, трубы испарителя получают одинаковое количество тепла, поверхность нагрева представляет собой сосредоточенную емкость [5].

Линеаризуем уравнения (4), (5) и заменим абсолютные значения переменных их приращениями безразмерной формы. Разделим отклонения переменных на соответствующие их величины в состоянии равновесия и выполним преобразование Лапласа:  $t_n^* = L(\Delta t_n / t_{n0})$ ,  $t_c^* = L(\Delta t_c / t_{c0})$ ,  $D_1^* = L(\Delta D_1 / D_{10})$ ,  $D_1'^* = L(\Delta D_1' / D_{10}')$ ,  $Q^* = L(\Delta Q / Q_0)$ ,  $\theta^* = L(\Delta \theta / \theta_0)$ ,  $b^* = L(\Delta b / b_0)$ ,  $R_n^* = L(\Delta R_n / R_{n0})$ , где  $L$  – преобразование Лапласа;  $\Delta$  – отклонения; индексом 0 обозначены значения переменных в состоянии равновесия. Тогда линеаризованную модель греющей камеры с учетом нулевых начальных условий можно записать в виде

$$t_n^* = W_{11}(s)t_c^* + W_{12}(s)D_1^* + W_{13}(s)D_1'^* + W_{14}(s)Q^*, \quad (6)$$

$$t_c^* = W_{21}(s)t_n^* + W_{22}(s)\theta^* + W_{23}(s)b^* + W_{24}(s)R_n^*, \quad (7)$$

где  $W_{ij}(s) = k_{ij} / T_i s + 1$  ( $i = 1, 2, j = 1: 4$ ) – передаточные функции каналов внешних воздействий на греющую камеру;

$k_{ij}$  – коэффициенты передачи соответствующих каналов греющей камеры;

$T_i$  – постоянные времени;

$s$  – комплексная переменная.

Для определения коэффициентов передачи и постоянных времени используются следующие формулы:

$$k_{11} = -l_{12}t_{c0}/l_{11}t_{n0}, \quad k_{12} = -l_{13}D_{10}/l_{11}t_{n0}, \quad k_{13} = -l_{14}D'_{10}/l_{11}t_{n0}, \quad k_{14} = -l_{15}Q'_0/l_{11}t_{n0}, \quad T_1 = -1/l_{11},$$

$$l_{11} = \frac{\partial}{\partial t_n} \left( \frac{a_3 t_c + a_4 (D_1 - D'_1) + a_5 - a_2 t_n}{a_1} \right) \Big|_0, \quad l_{12} = \frac{\partial}{\partial t_c} \left( \frac{a_3 t_c - a_2 t_n}{a_1} \right) \Big|_0,$$

$$l_{13} = \frac{\partial}{\partial D_1} \left( \frac{a_4 D_1}{a_1} \right) \Big|_0, \quad l_{14} = \frac{\partial}{\partial D'_1} \left( \frac{-a_4 D'_1}{a_1} \right) \Big|_0, \quad l_{15} = \frac{\partial}{\partial Q'} \left( \frac{a_5}{a_1} \right) \Big|_0,$$

$$k_{21} = -l_{22}t_{n0}/l_{21}t_{c0}, \quad k_{22} = -l_{23}\theta_0/l_{21}t_{c0}, \quad k_{23} = -l_{24}b_0/l_{21}t_{c0}, \quad k_{24} = -l_{25}R_{n0}/l_{21}t_{c0}, \quad T_2 = -1/l_{21},$$

$$l_{21} = \frac{\partial}{\partial t_c} \left( \frac{a_2 t_n + c_3 \theta - c_2 t_c}{c_1} \right) \Big|_0, \quad l_{22} = \frac{\partial}{\partial t_n} \left( \frac{a_2 t_n - c_2 t_c}{c_1} \right) \Big|_0, \quad l_{23} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{c_3 \theta - c_2 t_c}{c_1} \right) \Big|_0,$$

$$l_{24} = \frac{\partial}{\partial b} \left( \frac{c_3 \theta - c_2 t_c}{c_1} \right) \Big|_0, \quad l_{25} = \frac{\partial}{\partial R_n} \left( \frac{c_3 \theta - c_2 t_c}{c_1} \right) \Big|_0.$$

Подстановка начальных условий  $t_{n0}, t_{c0}, D_{10}, D'_{10}, Q'_0, \theta_0, b_0, R_{n0}$  в вышеприведенные формулы после выполнения дифференцирования обозначена символом  $|_0$ .

Для математического описания парожидкостного пространства использованы допущения: температура кипения слабого раствора  $\theta$  представляет собой сосредоточенный параметр, равный температуре вторичного пара  $t$ , масса пара существенно меньше массы слабого раствора, колебания расхода слабого раствора не превышают  $\pm 30\%$ , объем слабого раствора равен  $V = V'_0 + \eta h$ , где  $V'_0$  – начальный объем слабого раствора,  $\eta$  – значение площади поперечного сечения выпарного аппарата,  $h$  – уровень слабого раствора в аппарате. Рассмотрим парожидкостное пространство как совокупность следующих элементов: слабый раствор, пар ниже зеркала испарения, вторичный пар, металлический корпус [5; 6]. Материальный и тепловой балансы при этом будут иметь вид

$$(\rho - \rho_n) pV + (V_0 - V)(\partial \rho_n / \partial t) pt = S_{cp} - S_{кр} - W, \quad (8)$$

$$p(V\rho c\theta + (V_0 - V)\rho_n u + c_{мт} \theta G'_{мт}) = Q_2 + S_{cp} c_0 \theta_{cp0} - S_{кр} c\theta - Wi - Q'', \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность слабого раствора;

$V_0$  – величина объема парожидкостного пространства;

$S_m$  – расход слабого раствора, подаваемого в аппарат;

$S_{кр}$  – расход концентрированного раствора, отводимого из аппарата;

$W$  – расход вторичного пара;

$i$  – энтальпия вторичного пара;

$c$  – теплоемкость слабого раствора;

$u$  – внутренняя энергия вторичного пара;

$G'_{мт}$  – масса металла вокруг парожидкостного пространства;

$c_0$  – теплоемкость слабого раствора на входе в выпарной аппарат;

$\theta_{cp0}$  – температура слабого раствора на входе в выпарной аппарат;

$Q''$  – общие тепловые потери через корпус;

$Q_2$  – количество тепла, получаемое слабым раствором с поверхности теплообмена.

Значение  $Q_2$  вычислим по уравнению теплопередачи:

$$Q_2 = c_3(t_c - \theta). \quad (10)$$

С учетом выражений (8)–(10) динамика изменения уровня и температуры слабого раствора в выпарном аппарате может быть описана уравнениями вида

$$d_1 p\theta = -d_2\theta + c_3 t_c - d_3 W + d_4, \quad (11)$$

$$e_1 ph = S_{cp} - S_{кр} - W, \quad (12)$$

где  $d_1 = V\rho c + (V_0 - V)\rho_n \partial u / \partial t + u(V_0 - V)\partial \rho_n / \partial t + c_{мт} G'_{мт}$  ;  
 $d_2 = c_3 + S_{кр} c$  ;  
 $d_3 = i$  ;  
 $d_4 = S_{cp} c_0 \theta_{cp0} - Q''$  ;  
 $e_1 = (\rho - \rho_n) \eta$  .

Линеаризуем (11) и заменим абсолютные значения переменных их приращениями безразмерной формы. С учетом нулевых начальных условий получим

$$\theta^* = W_{31}(s)t_c^* + W_{32}(s)b^* + W_{33}(s)R_n^* + W_{34}(s)S_{кр}^* + W_{35}(s)S_{cp}^* + W_{36}(s)\theta_{cp0}^* ; \quad (13)$$

$$h^* = W_{41}(s)S_{cp}^* - W_{42}(s)S_{кр}^* - W_{43}(s)W^* , \quad (14)$$

где  $W_{3i}(s) = k_{3i}/T_3 s + 1$ ,  $W_{4j}(s) = k_{4j}/T_4 s$  ( $i = 1:6, j = 1:3$ ) – передаточные функции для парожидкостного пространства;

$k_{3i}, k_{4j}$  – коэффициенты передачи для парожидкостного пространства;

$T_3, T_4$  – постоянные времени для парожидкостного пространства.

Для определения коэффициентов передачи и постоянных времени используются следующие формулы:

$$k_{31} = -l_{32} t_{c0} / l_{31} \theta_0, \quad k_{32} = -l_{33} b_0 / l_{31} \theta_0, \quad k_{33} = -l_{34} R_{n0} / l_{31} \theta_0, \quad k_{34} = -l_{35} S_{cp0} / l_{31} \theta_0, \quad k_{35} = -l_{36} S_{cp0} / l_{31} \theta_0,$$

$$k_{36} = -l_{37} \theta_{cp00} / l_{31} \theta_0, \quad T_3 = -1 / l_{31}, \quad k_{41} = 1, \quad k_{42} = S_{кр0} / S_{cp0}, \quad T_4 = e_1 h_0 / S_{cp0},$$

$$l_{31} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{c_3 t_c - d_3 W + d_4 - d_2 \theta}{d_1} \right) \Big|_0, \quad l_{32} = \frac{\partial}{\partial t_c} \left( \frac{c_3 t_c - d_2 \theta}{d_1} \right) \Big|_0, \quad l_{33} = \frac{\partial}{\partial b} \left( \frac{c_3 t_c - d_3 W + d_4 - d_2 \theta}{d_1} \right) \Big|_0,$$

$$l_{34} = \frac{\partial}{\partial R_n} \left( \frac{c_3 t_c - d_2 \theta}{d_1} \right) \Big|_0, \quad l_{35} = \frac{\partial}{\partial S_{кр}} \left( \frac{-d_2 \theta}{d_1} \right) \Big|_0, \quad l_{36} = \frac{\partial}{\partial S_{cp}} \left( \frac{d_4}{d_1} \right) \Big|_0, \quad l_{37} = \frac{\partial}{\partial \theta_{cp0}} \left( \frac{d_4}{d_1} \right) \Big|_0.$$

Подстановка начальных условий  $\theta_0, t_{c0}, b_0, R_{n0}, S_{cp0}, \theta_0, \theta_{cp00}$  в вышеприведенные формулы после выполнения дифференцирования обозначена символом  $|_0$ .

Анализ выражений (6), (7), (13), а также конструктивных особенностей рассматриваемой вакуум-выпарной установки, позволяет выделить в качестве управляющего воздействия на температуру кипения слабого раствора  $\theta$  расход пара  $D_1$  и использовать для реализации замкнутой системы управления с отрицательной обратной связью ПИД-регулятор с передаточной функцией  $R_1(s)$  (рисунок 2). При этом возмущающие воздействия, вызванные колебаниями расходов слабого  $S_{cp}$  и концентрированного растворов  $S_{кр}$ , могут быть полностью скомпенсированы введением соответствующих динамических компенсаторов с передаточными функциями  $W_{1k}(s)$  и  $W_{2k}(s)$ . Управляющее воздействие в такой комбинированной автоматической системе будет определяться следующим образом:

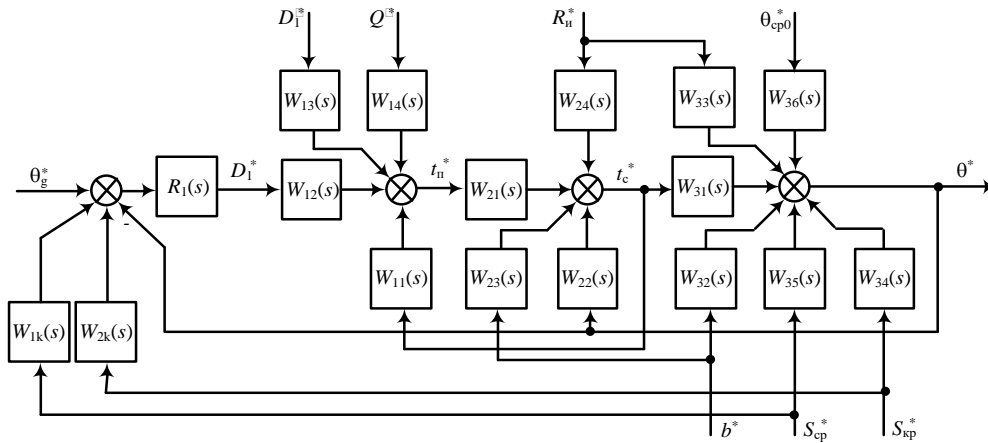
$$D_1^* = R_1(s) \left( \theta_g^* + W_{1k}(s) S_{cp}^* + W_{2k}(s) S_{кр}^* - \theta^* \right), \quad (15)$$

где  $\theta_g^*$  – величина задающего воздействия по температуре кипения слабого раствора.

Передаточные функции динамических компенсаторов определим, применив к (6), (7), (13) и (15) условие полной инвариантности системы автоматического управления к возмущениям  $S_{cp}^*$ ,  $S_{kp}^*$ :

$$W_{1k}(s) = W_{35}(s)(W_{11}(s)W_{21}(s) - 1) / R_1(s)W_{12}(s)W_{21}(s)W_{31}(s), \tag{16}$$

$$W_{2k}(s) = W_{34}(s)(W_{11}(s)W_{21}(s) - 1) / R_1(s)W_{12}(s)W_{21}(s)W_{31}(s). \tag{17}$$



**Рисунок 2. – Структурная схема комбинированной системы автоматического управления температурой в вакуум-выпарной установке с корректирующими контурами по расходам слабого и концентрированного растворов**

Для математического описания динамики изменения концентрации веществ в упариваемом растворе используем допущения: плотность слабого раствора при изменениях концентрации температуры не изменяется, концентрация считается сосредоточенным параметром, равным концентрации на выходе из выпарного аппарата. Тогда уравнение материального баланса примет вид

$$(G'_0 + h\rho\eta) \frac{db}{dt} + b\rho\eta \frac{dh}{dt} = b_{cp}S_{cp} - bS_{kp}, \tag{18}$$

где  $G'_0$  – масса слабого раствора в объеме, начиная от плоскости отсчета уровня;  
 $b_{cp}$  – начальная концентрация веществ в слабом растворе.

С учетом того, что  $r \gg r_n$ , а также выражений (12), (18) динамика изменения концентрации может быть описана уравнением

$$f_1 \frac{db}{dt} = b_{cp}S_{cp} - b(S_{kp} - W), \tag{19}$$

где  $f_1 = G'_0 + h\rho\eta$ .

Линеаризуем (19) и заменим абсолютные значения переменных их приращениями безразмерной формы. С учетом нулевых начальных условий получим модель динамики по концентрации в виде

$$b^* = W_{51}(s)S_{cp}^* + W_{52}(s)b_{cp}^* + W_{53}(s)h^* + W_{54}(s)S_{kp}^* + W_{55}(s)W^*, \tag{20}$$

где  $W_{5i}(s) = k_{5i} / T_5 s + 1$  – передаточные функции по каналам, влияющим на концентрацию ( $i = 1:5$ );  
 $k_{5i}$  – коэффициенты передачи;  
 $T_5$  – постоянная времени;  
 $b_{cp}^* = L(\Delta b_{cp} / b_{cp0})$ .

Для определения коэффициентов передачи и постоянных времени используются следующие формулы:

$$k_{51} = -l_{42}S_{cp0} / l_{41}b_0, \quad k_{52} = -l_{43}b_{cp0} / l_{41}b_0, \quad k_{53} = -l_{44}h_0 / l_{41}b_0,$$

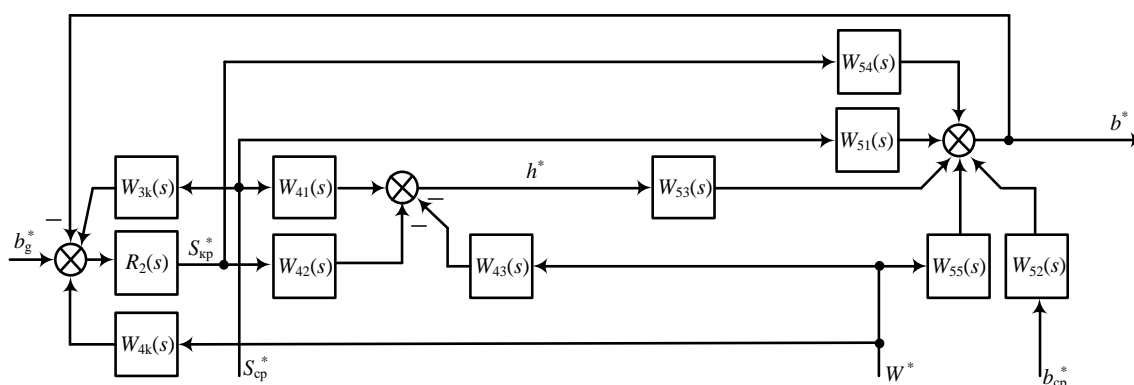


$$k_{54} = -l_{45}S_{\text{кр}0}/l_{41}b_0, \quad k_{55} = -l_{46}W_0/l_{41}b_0, \quad T_5 = -1/l_{41},$$

$$l_{41} = \left. \frac{\partial}{\partial b} \left( \frac{b_{\text{cp}}S_{\text{cp}} - bS_{\text{кр}} + bW}{f_1} \right) \right|_0, \quad l_{42} = \left. \frac{\partial}{\partial S_{\text{cp}}} \left( \frac{b_{\text{cp}}S_{\text{cp}}}{f_1} \right) \right|_0, \quad l_{43} = \left. \frac{\partial}{\partial b_{\text{cp}}} \left( \frac{b_{\text{cp}}S_{\text{cp}}}{f_1} \right) \right|_0,$$

$$l_{44} = \left. \frac{\partial}{\partial h} \left( \frac{b_{\text{cp}}S_{\text{cp}} - bS_{\text{кр}} + bW}{f_1} \right) \right|_0, \quad l_{45} = \left. \frac{\partial}{\partial S_{\text{кр}}} \left( \frac{bW - bS_{\text{кр}}}{f_1} \right) \right|_0, \quad l_{46} = \left. \frac{\partial}{\partial W} \left( \frac{bW - bS_{\text{кр}}}{f_1} \right) \right|_0.$$

Анализ (14), (20) позволяет выделить в качестве управляющего воздействия на величину концентрации сухих веществ в слабом растворе  $b$  величину расхода концентрированного раствора  $S_{\text{кр}}$ , отводимого из аппарата, и использовать для реализации замкнутой системы управления с отрицательной обратной связью ПИД-регулятор с передаточной функцией  $R_2(s)$  (рисунок 3). При этом возмущающие воздействия, вызванные колебаниями расходов слабого  $S_{\text{cp}}$  и расхода вторичного пара  $W$ , могут быть полностью скомпенсированы введением соответствующих динамических компенсаторов с передаточными функциями  $W_{3k}(s)$  и  $W_{4k}(s)$ .



**Рисунок 3. – Структурная схема комбинированной системы автоматического управления концентрацией сухих веществ в вакуум-выпарной установке с корректирующими контурами по расходу слабого раствора и расходу вторичного пара**

Управляющее воздействие в такой комбинированной автоматической системе будет определяться следующим образом:

$$S_{\text{кр}}^* = R_2(s)(b_g^* + W_{3k}(s)S_{\text{cp}}^* + W_{2k}(s)W^* - b^*), \quad (21)$$

где  $b_g^*$  – величина задающего воздействия по концентрации.

Передаточные функции динамических компенсаторов определим, применив к (14), (20) условие полной инвариантности системы автоматического управления к возмущениям  $S_{\text{cp}}^*$ ,  $W^*$ :

$$W_{3k}(s) = -(W_{41}(s)W_{53}(s) + W_{51}(s))/R_2(s)(W_{42}(s)W_{53}(s) + W_{54}(s)), \quad (22)$$

$$W_{4k}(s) = (W_{43}(s)W_{53}(s) - W_{55}(s))/R_2(s)(W_{54}(s) - W_{42}(s)W_{53}(s)). \quad (23)$$

Для математического описания динамики изменения вакуумметрического давления рассмотрим конденсатор смешения (поз. 7 на рисунке 1), как совокупность следующих элементов: жидкость в струях и на полках, паровоздушное пространство, металл полок и корпуса [5; 6]. При построении модели использованы допущения: пар в конденсаторе является сухим насыщенным, температура и давление представляют собой сосредоточенные параметры, температуры неконденсирующихся газов и пара равны, по составу неконденсирующиеся газы близки к воздуху, параметры металла и жидкости не зависят от давления и температуры, давление в выпарной установке представляет собой сумму парциальных давлений воздуха и пара  $q = q_n + q_b$ , в конденсатор подается вторичный пар с расходом  $W$ .

Состояние конденсатора смешения определяется следующими переменными:  $t_k''$  – температура вторичного пара,  $t_{\text{ж}}$  – температура воды для охлаждения на входе конденсатора,  $t_{\text{ж}1}$  – температура воды

после конденсатора,  $D_{ж}$  – расход воды, подаваемой в конденсатор,  $D_{ж1}$  – расход воды после конденсатора,  $D_{в}$  – расход воздуха, поступающего в конденсатор,  $D_{в1}$  – расход воздуха после конденсатора,  $G_{в}$  – масса воздуха, находящегося в конденсаторе,  $G_{ж}$  – масса воды, находящейся в конденсаторе,  $\varepsilon = G_{в}/G_{ж}$ ,  $Q_{п}$  – тепловые потери. Учитывая принятые допущения, для описания динамики давления  $q$ , применим уравнение [6]

$$g_1 p q = g_2 t''_к + g_3 t_{ж1} + g_4 t_{ж} + g_5 + g_6, \quad (24)$$

где  $g_i$  ( $i = 1:6$ ) – функции, зависящие от переменных  $t''_к, D_{ж}, D_{ж1}, D_{в}, D_{в1}, W, \varepsilon, Q_{п}$ , описывающих состояние конденсатора смешения, а также конструктивных параметров и свойств теплоносителей.

Формулы для вычисления функций  $g_i$  приведены в [6]. Линеаризуем уравнение (24) и заменим абсолютные значения переменных их приращениями безразмерной формы. Разделим отклонения переменных на соответствующие их величины в состоянии равновесия и выполним преобразование Лапласа:  $t''_к^* = L(\Delta t''_к/t''_{к0})$ ,  $D_{ж}^* = L(\Delta D_{ж}/D_{ж0})$ ,  $D_{ж1}^* = L(\Delta D_{ж1}/D_{ж10})$ ,  $D_{в}^* = L(\Delta D_{в}/D_{в0})$ ,  $D_{в1}^* = L(\Delta D_{в1}/D_{в10})$ ,  $\varepsilon^* = L(\Delta \varepsilon/\varepsilon_0)$ ,  $Q_{п}^* = L(\Delta Q_{п}/Q_{п0})$ . С учетом нулевых начальных условий динамика вакуумметрического давления описывается уравнением

$$q^* = W_{61}(s)t''_к^* + W_{62}(s)D_{ж}^* + W_{63}(s)D_{ж1}^* + W_{64}(s)D_{в}^* + W_{65}(s)D_{в1}^* + W_{66}(s)\varepsilon^* + W_{67}(s)W^* + W_{68}(s)Q_{п}^*, \quad (25)$$

где  $W_{6i}(s) = k_{6i}/s$  ( $i = 1:8$ ) – передаточные функции каналов парожидкостного пространства;  $k_{6i}$  – коэффициенты передачи, определяемые по формулам

$$k_{61} = l_{51} t''_{к0}/q_0, \quad k_{62} = l_{52} D_{ж0}/q_0, \quad k_{63} = l_{53} D_{ж10}/q_0, \quad k_{64} = l_{54} D_{в0}/q_0, \quad k_{65} = l_{55} D_{в10}/q_0,$$

$$k_{66} = l_{56} \varepsilon_0/q_0, \quad k_{67} = l_{57} W_0/q_0, \quad k_{68} = l_{58} Q_{п0}/q_0,$$

$$l_{51} = \frac{\partial}{\partial t''_к} \left( \frac{g_2 t''_к + g_3 t_{ж1} + g_4 t_{ж} + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Bigg|_0, \quad l_{52} = \frac{\partial}{\partial D_{ж}} \left( \frac{g_2 t''_к + g_3 t_{ж1} + g_4 t_{ж} + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Bigg|_0,$$

$$l_{53} = \frac{\partial}{\partial D_{ж1}} \left( \frac{g_2 t''_к + g_3 t_{ж1} + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Bigg|_0, \quad l_{54} = \frac{\partial}{\partial D_{в}} \left( \frac{g_2 t''_к + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Bigg|_0, \quad l_{55} = \frac{\partial}{\partial D_{в1}} \left( \frac{g_2 t''_к + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Bigg|_0,$$

$$l_{56} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left( \frac{g_2 t''_к + g_3 t_{ж1} + g_4 t_{ж} + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Bigg|_0, \quad l_{57} = \frac{\partial}{\partial W} \left( \frac{g_3 t_{ж1} + g_6}{g_1} \right) \Bigg|_0, \quad l_{58} = \frac{\partial}{\partial Q_{п}} \left( \frac{g_6}{g_1} \right) \Bigg|_0.$$

Подстановка начальных условий  $t''_{к0}, D_{ж0}, D_{ж10}, D_{в0}, D_{в10}, W_0, \varepsilon_0, Q_{п0}$  в вышеприведенные формулы после выполнения дифференцирования обозначена символом  $|_0$ .

Анализ (25) позволяет выделить в качестве управляющего воздействия на величину вакуумметрического давления в выпарной установке  $q$  величину расхода воды, подаваемой в конденсатор  $D_{ж}$ , и использовать для реализации замкнутой системы управления с отрицательной обратной связью ПИД-регулятор с передаточной функцией  $R_3(s)$  (рисунок 4). При этом возмущающие воздействия, вызванные колебаниями температуры вторичного пара  $t''_к$  и расхода воздуха после конденсатора  $D_{в1}$ , могут быть полностью скомпенсированы введением соответствующих динамических компенсаторов с передаточными функциями  $W_{5k}(s)$  и  $W_{6k}(s)$ .

Управляющее воздействие в такой комбинированной автоматической системе будет определяться следующим образом:

$$D_{ж}^* = R_3(s) \left( q_g^* + W_{5k}(s)t''_к^* + W_{2k}(s)D_{в1}^* - q^* \right), \quad (26)$$

где  $q_g^*$  – величина задающего воздействия по давлению.

Передаточные функции динамических компенсаторов определим, применив к (25), (26) условие полной инвариантности системы автоматического управления к возмущениям  $t_k^*$ ,  $D_{в1}^*$ :

$$W_{5k}(s) = -W_{61}(s)/R_3(s)W_{62}(s), \tag{27}$$

$$W_{6k}(s) = -W_{65}(s)/R_3(s)W_{62}(s). \tag{28}$$

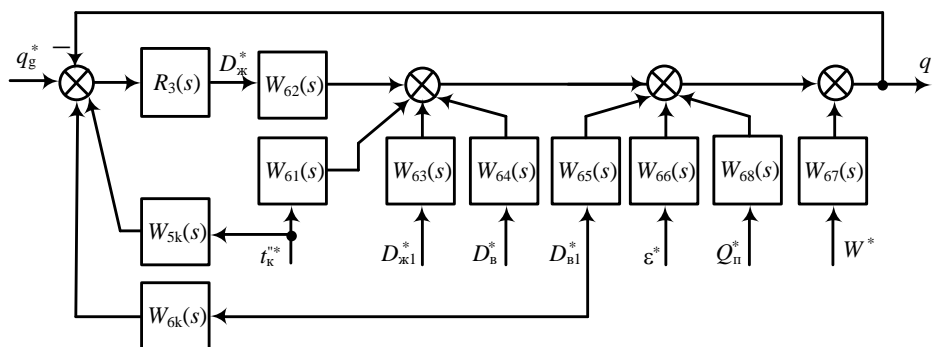


Рисунок 4. – Структурная схема комбинированной системы автоматического управления давлением в вакуум-выпарной установке с корректирующими контурами по температуре вторичного пара и расходу воздуха после конденсатора

**Заключение.** Предложен новый метод синтеза комбинированных автоматических систем управления температурой, концентрацией и глубиной вакуума для вакуум-выпарных установок. Метод основан на линеаризованных моделях динамики и позволяет синтезировать динамические компенсаторы возмущающих воздействий, вызванных колебаниями расхода и температуры слабого раствора на входе в выпарной аппарат, а также изменения вакуумметрического давления. Применение предложенных структур систем автоматического управления позволит повысить эффективность использования теплоносителей в вакуум-выпарных установках в химической и пищевой промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айрапетьянц, Г.М. Совершенствование систем автоматического регулирования технологическими процессами / Г.М. Айрапетьянц, А.В. Акулич, Н.И. Ульянов. – Могилев : МГУП, 2012. – 322 с.
2. Айрапетьянц, Г.М. Выбор каналов управления вакуум-выпарными установками / Г.М. Айрапетьянц, М.М. Кожевников, Е.Л. Волынская // Вестник МГУП. – 2010. – № 1(8). – С. 95–103.
3. Брусиловский, Л.П. АСУТП цельномолочных и молочных производств / Л.П. Брусиловский, А.Я. Вайнберг. – М. : Колос, 1993. – 363 с.
4. Брусиловский, Л.П. Научно-технические решения для создания автоматизированных биотехнологических комплексов цельномолочного производства / Л.П. Брусиловский, В.Д. Харитонов. – М. : ГНУВНИМИ, 1999. – 57 с.
5. Айрапетьянц, Г.М. Динамические модели вакуум-выпарных установок для молочной промышленности / Г.М. Айрапетьянц, М.М. Кожевников // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2009. – № 6. – С. 53–63.
6. Таубман, Е.И. Выпаривание / Е.И. Таубман. – М. : Химия, 1982. – 328 с.

Поступила 20.01.2021

SYNTHESES OF COMBINED CONTROL AUTOMATIC SYSTEMS FOR VACUUM EVAPORATORS

M. KOZHEVNIKOV, S. ADAMOV

The paper proposes a method for the synthesis of combined automatic control systems for temperature, concentration and vacuum depth for vacuum evaporation plants based on linearized dynamics models. The performed analysis shows the channels for applying the disturbing effects and the transfer functions of the dynamic compensators for the control loops of temperature, concentration and vacuum were found. The proposed method allows find the transfer functions of dynamic compensators in various operating modes of a vacuum evaporator.

**Keywords:** dynamic model, combined control, vacuum evaporator.

UDC 621

**INTEGRATION OF THE SYSTEM OF DIAGNOSTICS OF INDUSTRIAL EQUIPMENT AND ENTERPRISE ASSET MANAGEMENT SYSTEMS USING FIWARE FRAMEWORK<sup>1</sup>****D. KECHIK<sup>1</sup>, PhD I. DAVYDOV<sup>1</sup>, Ya. HIERASIMUK<sup>2</sup>, A. TSURKO<sup>1</sup>, M. SMOLEV<sup>1</sup>**<sup>1</sup>(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)<sup>2</sup>(Belarusian State Economic University, Minsk)

*The purpose of this paper is to present integration of vibrational diagnosing system with a FIWARE framework. This integration increases scalability of the system and facilitates the further developing of the system. Designed system has been implemented and tested in real life conditions. The best economical effect can be achieved if the proposed system is used in full-automated manufacturing. Integration with subsystems of enterprise management of Industry 4.0 trend has been proposed. Operative recomputing of workflow and costs of each of alternative scenarios can maximize advantages of continuous automated monitoring of technical state of equipment. Advantages of application of the FIWARE framework for design of proposed Cyber-Physical System have been shown.*

**Keywords:** *cyber-physical system, Industry 4.0, FIWARE, context broker, smart factory, vibrational diagnosing, system modeling, function modeling, information system, industrial control system.*

**Introduction.** Non-destructive diagnostics methods are rapidly developed for the last decades. Vibrational diagnosing is the one of the most effective methods of non-destructive equipment diagnosing. Vibrational signal is an immediate result of machine parts interaction between themselves and with environment [1–4]. Thus, vibrational signal contains full information about equipment state. It consists of a lot of components different nature that are informative features of equipment state. Vibrational diagnosing system extracts these features, evaluates their significance and occurrence stability. Technical state of each element of machine and its state in general are monitored.

Depending on used technical processes and equipment kind different maintenance approaches may be used:

- breakdown or run to failure maintenance. Machine is allowed to run until its failure. Its parts are repaired or replaced only after its damage. Such kind of maintenance may be acceptable if equipment shutdowns do not break workflow or idle losses are not appreciable. The approach has a few serious disadvantages. Large nomenclature of details is needed to replace details fast. Equipment is worn faster because of increasing of temperature and vibrational loads. Installation errors, that are the most frequent reason of damages [5], are not corrected;
- preventive or time-based maintenance. Maintenance activities are conducted at predetermined calendar time intervals or equipment running hours. This can prevent unexpected failure and destruction of equipment. Drawbacks of this method are numerous unneeded assembling operations, destruction and removing of good parts or missing of defective ones. Probability of mounting errors is higher;
- predictive or condition-based maintenance. Maintenance activities are conducted only when a functional failure is detected. Then significant increasing between-repair intervals (25–40%) and improvement of production efficiency (2–10%) [2], reducing need for large inventory spares and mistakes in mounting [5] are possible. But incorrect machine state assessment may increase damage. Complex diagnosing equipment and qualified personnel are required to prevent this;
- proactive or prevention maintenance. The best result may be achieved if reasons of equipment failures are eliminated in addition to equipment state monitoring. Simple procedures are used to significantly decrease mounting mistakes and therefore equipment damages [2]. But vibration diagnosing methods can improve detection and correction of installation errors [2].

Choice of suitable approach depends on relation of diagnosing cost and losses caused by damages and idle of equipment, workflow and equipment costs. In practice, combined approach can be used [2; 6] (figure 1) Diagnosing system, considered in this paper, realizes predictive maintenance. The main advantages of this system are early defect detection, broken element and kind of defect recognition, the elements remaining useful life (RUL) estimation. Equipment idle time and its repair cost may be reduced due to better maintenance scheduling. The purpose of considered in this paper system is provide information for realization of predictive and proactive maintenance.

Vibrational diagnosing can be effective only if information about technical state of equipment is operatively applied. It is possible in full automated manufacturing. Many subsystems, such as scheduling, process control, spares supply and maintenance, should be integrated. Next Generation Services Interface (NGSI) API

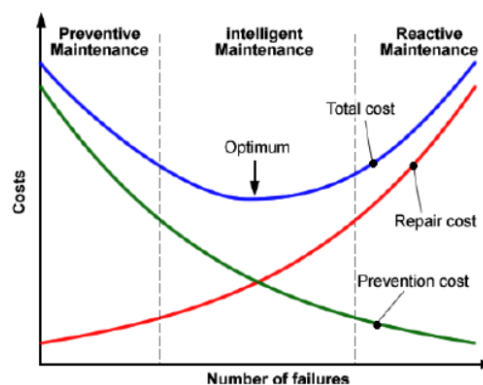
---

<sup>1</sup> The article is a part of "Automatic vibration diagnostics and Prescriptive maintenance service for Industrial equipment in Industry 4.0" grant project supported by MIDIH ("Manufacturing Industry Digital Innovation Hubs", funded by the European Union Framework Program for Research and Innovation Horizon 2020) under Grant Agreement No. 767498.

is appropriate solution: it realized system-independent approach means to advertise the existence of data with particular categories and provide it using an appropriate adaptor [7]. It can share information between various subsystems that even can be not aware about each other. This means that any of already deployed system of plant management can be extended, special adaptor is only needed. Any of third-party solution having such adaptor can easily be applied.

The paper is devoted to integration of industrial equipment vibrational diagnosing system with ecosystems based on FIWARE framework [8]. Such integration has been implemented [9]. The rest of this paper is organized as follows: maintenance approaches have been described, appropriacy of used approach have been grounded, context management conception has been discussed, the current implementation has been briefly described, integration of diagnosing system with business administration system has been proposed. Questions for the further research have been raised in the conclusions section.

Figure 1. – Costs of maintenance of different strategies [6]



**Data acquisition and processing.** Vibration is measured by sensors mounted near important details, for example, in bearing housings, in such way as to pass vibration freely in all frequency ranges [10–12]. This means secure direct contact, minimum of irregularities and hard material on the way of wave propagation (to avoid resonances, achieve good high-frequency response) [5] and low distance from vibration source to sensor to pass high frequencies dissipating faster. Acceleration, velocity and displacement probes can be used, but accelerometers are the most widely spread [10]. They are reliable and have wide frequency response range [5]. Velocity can be obtained by integration of acceleration, integral of velocity is displacement, and vice versa. All the signals carry the same information, but methods of diagnosing are developed for the concrete type of the signal, e.g., misalignment is diagnosed analyzing displacement (especially trajectories) [2; 10; 13], defects of rotary equipment, especially rolling bearings, are detected processing acceleration and its envelope [2; 3; 14]. Components of acceleration signal have comparable magnitudes in different frequency ranges, that makes them convenient for analysis [2]. Some standards normalized vibrational velocity [2]. Vibrational diagnosing system requires telemetry equipment to transmit observed vibration. It includes multichannel analog to digital (ADC) converter. Note, that the channels should be synchronized with high accuracy for some tasks, such as shaft orbit analysis (acquisition of vibration from installed closely sensors in perpendicular directions) and phase measurements (analysis of phases at distinct ends of shaft to discriminate types of imbalance or rotor bent [10]). Analysis of amplitude spectrum only does not require synchronization, but signals should be observed simultaneously, especially if they are non-stationary by amplitude (examples [11]) or frequency (examples [15; 16]). Telemetry block transmits recorded data through WiFi or Ethernet connection to cloud server where the main signal processing program is deployed. It's grounded by high computational cost of algorithms of extraction of informative features and lack of need in real time processing. The system is able to process third-party data and share observed vibration and its meta through NGSi adaptor, particularly, subscribing to updates of third-party observations and updating according entities.

**Informative features extraction methods.** The simplest diagnosing methods are based on signal statistical parameters. Signals root mean square (RMS) is used to compare signals power. Equipment state control standards (ISO 7919, ISO 15242) assign vibration RMS or peak-to-peak value permissible values for different types of equipment. Also vibration growth is limited. For early detection of defects it's appropriate to trend these parameters [2; 5]. Additional parameters are also recommended for trending. Peak factor is ratio of peak and RMS values. It's effective to detect shocks. Its trending is important because its value grows when pulses energy increases, but the further degradation leads to noise increasing and decreasing of peak factor value. Shock pulse method (SPM) is extension of peak factor measurement. The core of the method is measurement of amplitude of spikes at resonant frequency of sensor or elements. Shocks in defective bearings excite pulses at resonant frequencies of elements and sensor. Then shocks amplitude is related to noise level. Further modification of SPM leads to frequency domain methods (analysis of pulses envelope spectrum) and time domain methods (demodulation and estimation of pulse repetition rate) [17].

Analysis of statistics and power of vibration can indicate technical state of group of elements under sensor in general, cannot indicate a certain faulty element and its defect [18]. Information about technical state of each

element is required to reduce maintenance costs as well as disassembling and installation operations leading to errors and thus failures. Vibrational signal consists of various components of different origin related with periodical impact of unbalanced masses, kinematic forces and shocks [1–4; 10]. These components should be selected and discriminated. Mainly frequency domain analysis of vibration and its envelope [1–4; 10; 14; 19] is used to detect a certain defect of a concrete element, especially incipient defects, time-frequency methods are applied for preprocessing of the signal [11; 20] as well as for informative features selection [21; 22]. Then, remain resource of each element can be estimated and thus maintenance can be planned more rationally [5; 23].

To estimate the current state of equipment relying on various features, trending and comparison of parameters of signal with their previous values [5; 11], thresholding of parameters using maximum likelihood rule [24; 25], Big Data analysis [23]. The system evaluates the current technical state of equipment and its units as well as its remaining useful life (RUL) that is approximate time of degradation of the machine to its damage or dangerous faults. RUL estimation is based on trending of informative features [25] or random process analysis (Markov-based models, Wiener or Gaussian processes) [23]. RUL is based on estimations of the current technical state, cannot be evaluated exactly and unreliable if defect evolves abruptly, then both of the current state and RUL are used for decision making, especially rational scheduling [23]. Considered in this paper diagnosing system can estimate the current state as well as RUL, recommendations on maintenance, such as align shafts or replace bearing are provided.

**Unexpected failures.** Maintenance and implementation of recommendations can also prevent developing of new defects. Poor alignment of machines is the main reason of their malfunction [10]. Accurate alignment is reported to enhance average life time of bearings and couplings by 3...8 times, reduce maintenance costs by 5...7%, increase interrepair interval by 10...12%, reduce unexpected halt of equipment, caused by misalignment, by 2 times [2]. Basic reasons of failure of rolling bearing are reported [2]: 40% – lubrication defects, 30% – wrong assembling and mounting, 20% – other reasons related with wrong exploitation, such as overloads, strong vibration, etc., 10% – normal wear. Vibration of bearings is excited by their normal work as well as defects of bearing or related elements such as shaft, that increases vibration load [2]. Diagnosing system can detect incipient defects as well as errors of installation, and user can prevent faster degradation of equipment. Maintenance and elimination of named reasons of failures can offer significant economical advantage if all actions are conducted timely and do not interfere with production plans. Satisfy contradictory conditions is task of scheduling system. High priority, unexpected repair works can be reduced [26]. It should consider probabilistic nature of failures.

Malfunction of equipment units is a random event by its physical nature due to variability of parameters of details and operating conditions. Thus, it may be described by failure probability density function (PDF), hazard rate and reliability function [27; 28]. Failure PDF of rolling bearings is reported to be like one depicted at figure 2, *a*. It can be approximated as  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ . This PDF describes electric motor to failure if  $\lambda$  is motor failure rate [28]. Failure (hazard) rate is approximated by bathtub function (figure 2, *b*) [27; 28] in various fields of technique: the first period is early failure, burn-in period; useful life period and wearout period. Probability of breakdown of is higher at burn-in period due to errors of manufacturing and poor quality control [27; 28]. Additionally, errors of mounting discussed above can increase failure rate [28]. During useful life, failures are caused by a lot of random factors, failure rate is stable [27; 28]. In wear-out period, aging factors are the reason for breakdown: fatigue, cracks, friction and corrosion, etc. Ageing of the components is accelerated by defects, such as imbalance or misalignment [28]. Constant failure rate can be described by exponential PDF of failure, rate of mechanical systems can be described by normal PDF, wear-out period can be described by Weibull distribution [27]. Bathtub curve can be approximated by sum of three Weibull functions with different parameters [29]. Hazard function is also reported to have different shape near zero and do not decrease [29].

Maintenance costs (MC) can be estimated using the methodology [30]. MC of preventive approach can be evaluated according to the expression:

$$MC = C_w + C_{pr} = (C_w^u + C_w^p) + (C_{pr}^u + C_{pr}^p), \quad (1)$$

where  $C_w^u$  is unexpected failure work (labor + spares);

$C_w^p$  is planned maintenance work;

$C_{pr}^u$  is production costs during unexpected idle;

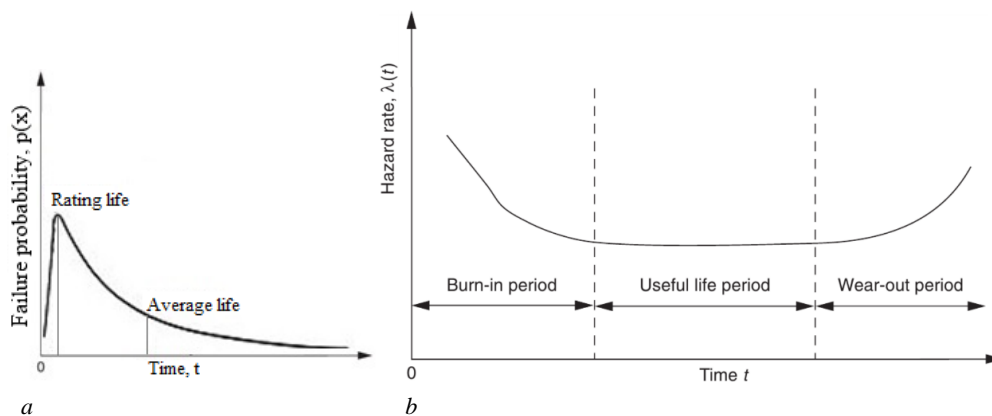
$C_{pr}^p$  production costs during planned maintenance idle.

Unexpected expenses are accounted for probability of failure before assigned time of maintenance. Predictive maintenance, together with proper scheduling, can reduce unexpected costs as well as planned, e.g., interrepair period can be 15–30% shorter due to unreasonable scheduled works [30].

Conclusions of the section:

– preventing of all failures by periodical maintenance is impossible, unexpected failures can interrupt workflow and delay of production;

- periodical maintenance leads to additional expenditures;
- mounting errors increase failure rate. They can be eliminated by diagnosing and operative maintenance;
- interrepair period is decreased in case of constant period maintenance, that can lead to additional mounting errors.



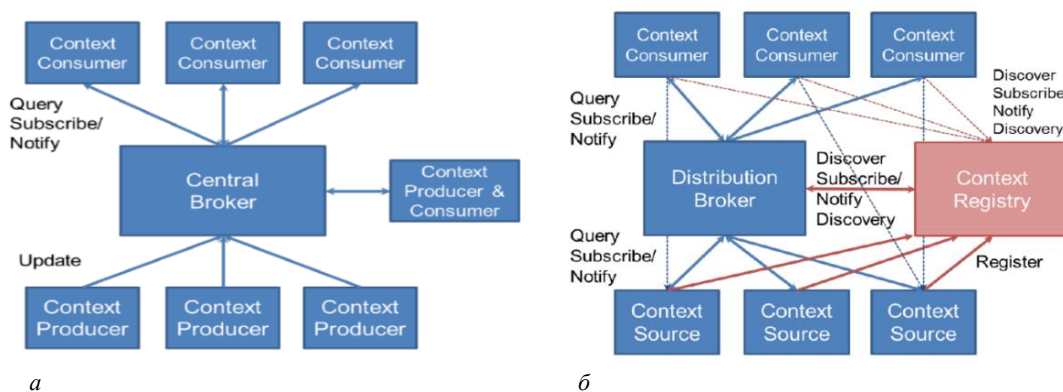
a – failure PDF [31]; b – hazard rate [28]

Figure 2. – Functions describing probabilistic nature of failure

**Integration of diagnosing system with FIWARE framework**

**Context broker.** Interest to development of Cyber-Physical Systems (CPS) growing fast during a few last years. CPS is kind of ICT systems (sensing, actuating, computing, communication, etc.) embedded or software integrated in physical objects, interconnected including through the Internet, and providing citizens and businesses with a wide range of innovative applications and services [32]. Its advantages are increasing of flexibility and higher integration of production system [33]. Application of CPS in industry improves continuous monitoring and remote control of workflow and technical state of equipment [34]. Open design and standardized platform is demanded [32]. FIWARE framework can be convenient solution.

In FIWARE, various producers and consumers of data are interrelated through Context Broker (CB). Context is any actual information about entities: their properties and interrelations with other entities [7]. Each source is registered as entity in the common data base. Virtual entity is updated by actual metadata containing any information about real object: its coordinates, sensor readings, timestamps, etc. Consumer of data should discover existing producers of information. It sends request to CB and receive which sources match conditions of request. In next time consumer can request data or subscribe on updates of any selected producer. Possible schemes of data communication are presented at figure 3.



a – centralized broker; b – distributed broker

Figure 3. – Context Broker based architectures of integration [7]

Configuration depicted at figure 3, a is more proper for small systems. The only central broker is used for information interchange. Geographically distributed systems can be realized as it showed at figure 3, b. Central database is used for metadata exchange only, large amounts of data can be sent directly from producer to consumer. Advantages of CB application are: flexible system of requests, independence of integrated systems and potentially limitless of their amount, easy scaling and, unlike data lakes, it does not requires regular cleaning up [7].

**The current implementation.** Scheme of realized integration of diagnosing system [9] has been shown at figure 4. Telemetry blocks (Vbox device) receive signals of accelerometers, translate them to \*.wav files and upload to Vibrobox Cloud service for the further processing, informative features selection and diagnosing. Metadata, such as uploading link, calculated at Vbox device statistics of vibration signal (RMS, peak factor, recording date, etc.), is updated in CB. Broker is deployed in Docker container at cloud service. Microservice Draco is used for storing history of updates in Mongo Database. The service is subscribed on updates of the sensor entity. The system have been deployed and tested under Linux Ubuntu and Windows 10 systems [9]. The following KPIs were performed [9]:

- 1) metadata of signals were successfully transmitted from Vbox telemetry units through FIWARE components to cloud processing platform;
- 2) time of deploying of diagnosing system for new type of equipment is less than 14 days from sensors installation till full readiness system for usage, including self-adaptation and adjustment;
- 3) the system can be scaled in 5 days or faster for the similar type of equipment if its kinematic scheme is known;
- 4) idle time of equipment has been reduced by 10% during testing on enterprise.

**Integration with smart scheduling systems.** Smart scheduling can decrease idle time as well as delay of production manufacturing. Shop-floor scheduling algorithms can be used (artificial intelligence [35], genetic algorithms or fuzzy logic [36], agent modelling [37; 38], risk minimization or gain maximization [39], usage of constraints on temporal variables [40]). Note, that these algorithms can dynamically update schedule, unlike proposed system that minimizes losses by optimizing time to maintenance [41]. Utility maximization approach is selection of several alternatives. Each of them is according to utility or risk, that is calculated as weighted sum of a few parameters. It can consider many factors, specificity of workflow and enterprise, time of delivery of production, etc. For example, delay of production or leads to increasing of risk or decreasing of utility. Decreasing of idle time leads to increasing of utility. The simplified scheme of integration of such scheduling framework with monitoring system, relying on [39], is presented at figure 5. Input of decision making block is variables under weighting. Output of monitoring system is also taken into account. For example, delay of maintenance can increase risk if equipment state degrading fast. System decides what of alternative scenarios have less risk: losses if production delayed or losses on equipment failure. Maintenance costs (1) are also can be taken into account.

Diagnosing system can estimate technical state and RUL that can be used for decision making by humans. Considered diagnosing system can give recommendations based on actual state and RUL, for example, replace the bearing during the month. In case of full-automated manufacturing with smart decision making, recommendations can be used for composing of alternative scenarios further selecting as described above, e.g., stop machine now and conduct alignment, replace bearing, etc., or finish the current production task and conduct maintenance after. If maintenance operation is considered as one more operation at the same machine, approach of usage of constraints on time variables can be used to compose scenarios for their further selection. Starting time of each operation is limited by set of constraints [40]. Let  $O_i$  be the  $i$ -th operation,  $s_i$  be its starting time,  $p_i$  be processing duration,  $c_{max}$  be total operation duration. The condition (2) sets end time and duration of each operation. Rules (3), (4) assign right order of operations [40]:

$$s_i + p_i - c_{max} \leq 0, \forall i \in O, \quad (2)$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} - v_{i,m} - v_{j,m} \leq 0, \forall i, j \in O, J_i \neq J_j, \forall m \in M_i \cap M_j, \quad (3)$$

$$x_{i,j,m} + x_{j,i,m} - v_{i,m} - v_{j,m} \geq -1, \forall i, j \in O, J_i \neq J_j, \forall m \in M_i \cap M_j, \quad (4)$$

where  $i, j$  are operation iterators;

$m$  is number of machine tool;

$x_{i,j,m}$  is equal to 1 if operation  $O_i$  is processed before operation  $O_j$  on the tool  $m$  and is equal 0 otherwise;

$v_{i,m}$  is equal to 1 if operation  $O_i$  is assigned to the tool  $m$  and is equal to 0 otherwise;

$M_i$  is set of machine tools available for operation  $O_i$ ;

$J_g$  is the  $g$ -th job.

Other conditions, such as energy consuming, can be taken into account [40]. Using the same methodology, rule that define order of operations of maintenance and production (5) is proposed. It means that maintenance operation can be assigned only if maintenance of according machine tool is prescribed, and production operation cannot be assigned in another case.

$$v_{i,m} \cdot R_i - S_m = 0, \quad (5)$$

where  $R_i$  is equal 1 if  $O_i$  is maintenance, repair operation, 0 otherwise;

$S_m$  is equal 1 if maintenance of the  $m$ -th tool is prescribed, 0 otherwise.



New operations excepting maintenance are not appointed if the current state degraded to damage level. Workflow is also interrupted after RUL has expired. Constraint (6) allows exploitation of equipment if its state is appropriate and factors (such as RMS of vibration or level of some harmonics) are not exceed prescribed by standards [2; 5; 10] level. The condition can be used for planning operations of the machine whose the current state is satisfactorily but its soon degradation is expected:

$$v_{i,m} \cdot CS_m \cdot RUL_m \cdot L_m = 1, R_i = 0, \tag{6}$$

where  $CS_m$  is equal to 1 if the current state of the  $m$ -th tool is good, 0 otherwise;

$RUL_m$  is equal to 1 if remaining useful life has expired, 0 otherwise;

$L_m$  is equal to 1 if vibration level is lower assigned threshold and is 0 otherwise.

System of equations can be more complex since halt of the  $m$ -th machine leads to interruption of the whole chain of production.

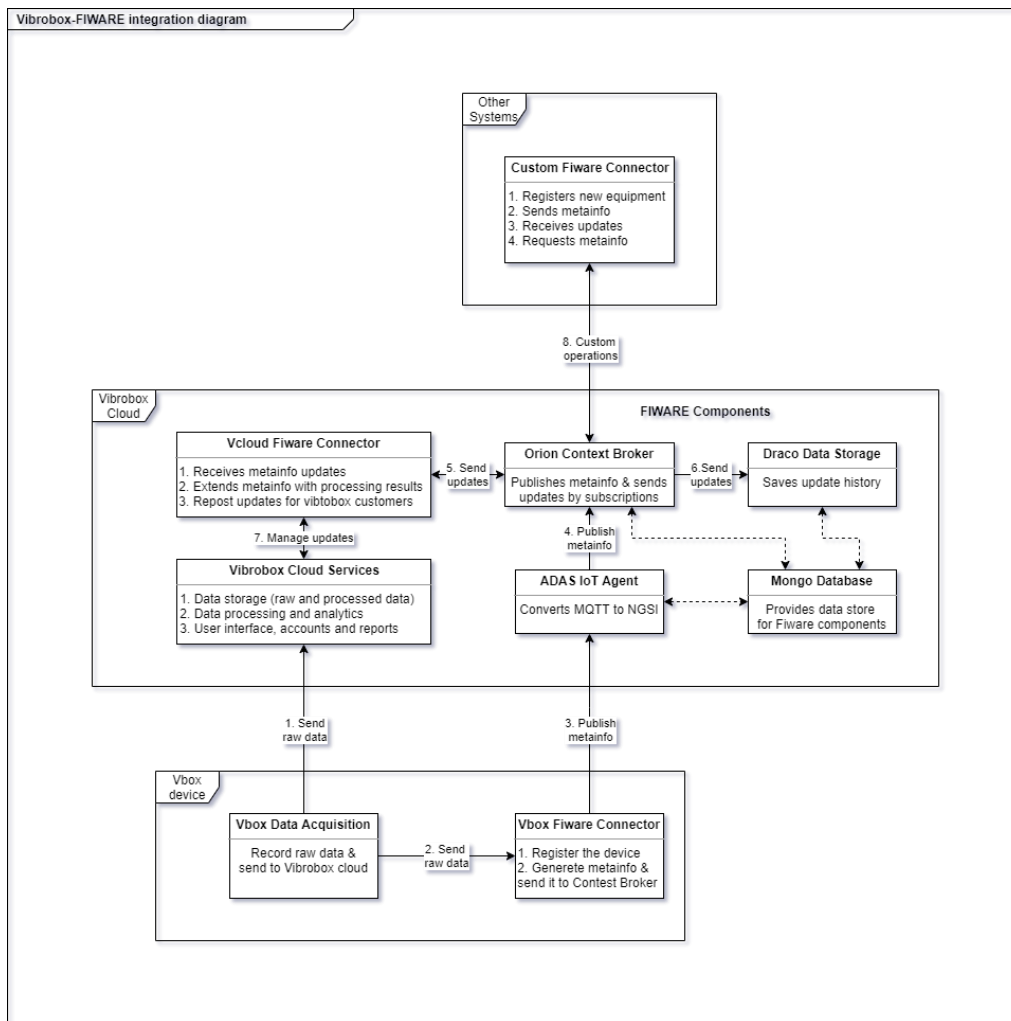


Figure 4. – Scheme of realized integration of diagnosing system with FIWARE components

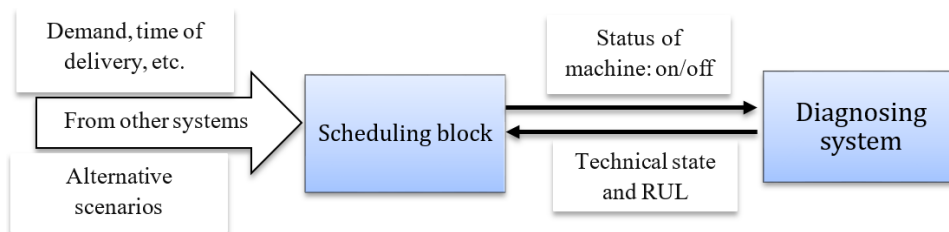


Figure 5. – Simplified scheme of interrelations between scheduling and monitoring subsystems

Scheme of proposed system is presented at figure 6. Alternatives construction block prepares a few of possible scenarios of production and maintenance according to (2)–(6). Maintenance is not included in schedule if equipment state is good. Scheduling block selects one consequence of operations which have maximum gain. Both of these blocks are interrelated with each other, maintenance system and additional subsystems (such as materials supply) through CB. Interaction between systems is unified, one shouldn't change anything in one system if another is modified or added. Each of them obtains actual required information.

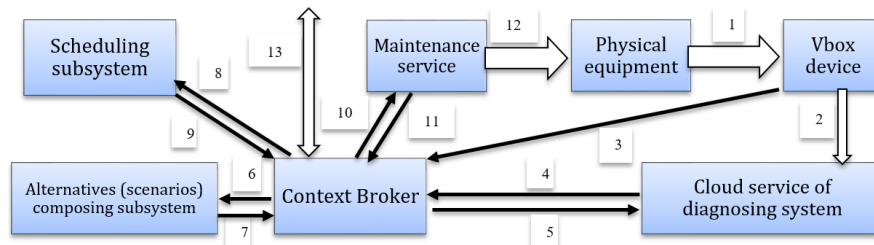


Figure 6. – Scheme of integration of vibration diagnosing system and business management system

Vbox device observes vibration produced by physical equipment, link 1, converts it to convenient for processing form and sends it to cloud service, link 2, updates the sensors entities, link 3. Cloud service can update entities of machine and its units under diagnosing by their actual estimations of technical state, RUL and recommendations, link 4. Such recommendations as “conduct maintenance of the  $m$ -th machine in  $x$  days” or prescriptions to halt machine immediately (if it goes to breakdown) can be used for automatic scenarios composing, detailed recommendations, such as “replace the  $n$ -th bearing of the  $m$ -th machine in  $x$  days”, are useful for personnel of maintenance service. Cloud service can receive updated of the third-party observations, link 5, and update in the similar way according equipment entities. Integration of data acquisition subsystems (Vbox device) and cloud service with CB (links 1–5) is currently implemented (see figure 4). Scenarios composing subsystem receives notifications and updates of equipment entities as well as other controlled parameters (production demand, etc.), link 6, updates entity of production scenarios of the current factory, link 7. It can be implemented according to (2)–(6) and should take into account workflow of the concrete enterprise and selected maintenance strategy – see figure 1. Scheduling subsystem receives notifications and updates of scenarios and variables that influence on cost of each of alternatives, link 8, and updates schedule, workorders and maintenance prescription entities and equipment status (on/off), link 9. Maintenance service receives prescriptions and recommendations, link 10, it can request spares and update required time of maintenance, link 11. The 12-th link designates repair works conducted by maintenance service and changing equipment state. The 13-th link signifies interrelations with other enterprise administration systems (demand, supply, etc.) and third-party services.

Each of sensors, machine units and the whole machines are distinct entities. Sensors entities hold information about recent observation and the most necessary characteristics of vibration (RMS, peak) required according to standards. Machine units, as well as the whole machine, are characterized by their technical state and RUL. State of machine is estimated by the simplest integral methods and they are needed to capture breakdown if more accurate methods cannot do it. More accurate methods indicate faulty unit or even its concrete defect, evaluate its technical state. This is needed to prescript maintenance of a certain unit, decrease number of operations and probability of mounting errors. A few sensors are needed to evaluate technical state of unit or machine. Observed vibration of one or a few sensors is processed in cloud service, then it updates state and RUL of unit and the whole machine. Addition of equipment unit requires just registration of new entities (machine, its units under observation and sensors) in CB. All the rest blocks will obtain information that match their requirements automatically.

Subsystems of smart enterprise control can be integrated with FIWARE components. A lot of solutions have been already integrated [8], custom adaptor should be implemented otherwise. Once implemented, it can be deployed at any other system and scaled fast, as it has been demonstrated. The only condition is the common context definitions, such as machine, unit of machine, sensor. The system should be aware how they are related, e.g., failure of the unit or excitation of vibration at the only sensor leads to halt and assigning of maintenance of the whole machine, stop of machine leads to delay of operations of the whole production chain. Localization of the defect is needed to repair service to reduce expenditures and risk of errors.

If probability densities of units failure are estimated and production plans are known, probabilities of all possible scenarios can be evaluated. For example, for the sake of simplicity we can assume that maintenance operations are assigned in scenarios with the same probability as element failure. But selection of a certain alternative depends on many variables describing workflow, costs of production delay and potential losses of maintenance delay. Probability of breakdown of equipment in each moment leads to risk of losses due to failure of fulfillment of production plans. On the other hand, timely elimination errors of installation and other defects will reduce failure rate. It should be considered when production is planned.

**Conclusions.** Appropriacy of using of FIWARE framework has been shown. The framework can help to improve scalability of the system. Developing of the system of monitoring of technical state of equipment together with adaptive shop-floor scheduling leads to full-automated manufacturing. Described system can be realized at the levels of subdivisions (department, shop-floor), the whole enterprise or a few factories (hyperconnected factories [42]), it should consider modern standards and frameworks for enterprise integration and modelling, see ISO 19439. The FIWARE framework can unify interconnection between maintenance and production frameworks. The questions were raised for the following research:

- How to consider probabilities of breakdown of each element during planning of production to reduce risk of production delay?
- How to optimize scenarios construction to consider different probabilities of failure of each element during its life time?
- How to calculate costs of each of scenario considering technical state, RUL of elements and recommendations of diagnosing system depending on workflow and loading of equipment?
- How to integrate the system at different levels, e.g., to connect maintenance, scheduling, etc. systems at each subdivision independently and connect them at higher level or build the whole factory/group scheduling, maintenance, etc. systems?

## REFERENCES

1. Genkin, M.D. Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms / M.D. Genkin, A.G. Sokolova. – Moscow : Mashinostroenie, 1987. – 288 p. (In Russian)
2. Abramov, I.L. Vibrational diagnostics of power equipment / I.L. Abramov. – Kemerovo : KuzGTU, 2011. – 81 p. (In Russian)
3. Barkov, A.V. Monitoring and diagnostics of rotary equipment relying on its vibration / A.V. Barkov, N.A. Barkova, A.Yu. Azovtsev. – Saint-Petersburg : SMTU, 2000. – 159 p. (in Russian)
4. Barkov, A.V. Vibrational diagnosing of machines and equipment. Analysis of vibration. Tutorial / A.V. Barkov, N.A. Barkova. – Saint-Petersburg : SMTU, 2004. – 156 p. (in Russian)
5. Scheffer, C. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance / C. Scheffer, P. Girdhar. – Amsterdam : Elsevier, 2004. – 263 p.
6. Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges / P. Tchakoua [et al.] // Energies. – 2014. – Vol. 7, № 12. – P. 2595–2630.
7. NGS-LD API: for Context Information Management [Electronic resource] / D. Bees [et al.]. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/330927056\\_NGS-LD\\_API\\_for\\_Context\\_Information\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/330927056_NGS-LD_API_for_Context_Information_Management). – Date of access: 11.10.2020.
8. WHAT IS FIWARE? [Electronic resource] / FIWARE. – Mode of access: <https://www.fiware.org/developers/>. – Date of access: 11.10.2020.
9. Integration of system of industrial equipment diagnosing with ecosystems of Industry 4.0 trend based on FIWARE framework / D.A. Kechik [et al.] // Information radiosystems and radiotechnologies. – Minsk, 2020.
10. Vibrational diagnosing / Ye.Z. Madorskiy [et al.] ; ed. G.Sh. Rosenberg. – Saint-Petersburg : Federal State educational establishment, 2003. – 284 p. (in Russian)
11. Kechik, D.A. Vibrational signal power variance compensation during equipment speed mode changing / D.A. Kechik // Doklady BGUIR. – 2020. – Vol. 18, № 5. – P. 27–34. (in Russian)
12. Device for mounting of sensors on objects under studying : pat. BY 11689 / S.Y. Vasiukevich, Y.P. Aslamov, R.V. Tolkach. – Publ. date 15.02.2018. (in Russian)
13. Shirman, A.R. Practice of vibrational diagnosing and monitoring of equipment state/ A.R. Shirman, A.B. Solovyov. – Moscow : Nauka, 1996. – 276 p. (in Russian)
14. Approach of vibrational diagnosing of rolling bearing : pat. BY 2720328 / N.V. Kosmach, Yu.P. Aslamov. – Publ. date 28.04.2020. (in Russian)
15. Influence of changes in shaft rotational speed of rotary equipment on frequency-domain processing / Yu.P. Aslamov [et al.] // Doklady BGUIR. – 2018. – Vol. 113, No 13. – P. 13–18. (in Russian)
16. Zhang, X. A new time synchronous average method for variable speed operating condition gearbox / X. Zhang, G. Wen, T. Wu // J. Vibroengineering. – 2012. – Vol. 14, № 4. – P. 1766–1774.
17. Xu, M. Spike energy measurement and case histories / M. Xu. – P. 15.
18. Aslamov, Y.P. System of control of working capacity of rotary equipment based on analysis of temporal structure of vibrational signals : Doctor of Philosophy thesis : 05.13.01 / Y.P. Aslamov ; BSUIR. – Minsk, 2019. – 244 p. (in Russian)
19. Approach of vibrational diagnosing of rotary equipment for detection of rolling bearing defects : pat. EA EA034627B1 / Y.P. Aslamov. – Publ. date 28.02.2020. (in Russian)
20. Kechik, D. Segmented Autoregression Pitch Estimation Method / D. Kechik, I. Davydov // 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), Samara, 16–18 September 2020 / Samara University. – Samara, 2020. – P. 1–6.
21. Sparse Wavelet Decomposition with Redundant Dictionary for Vibration Waveform Analysis / Y.P. Aslamov [et al.] // 14th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing, Minsk, 21–32 May 2019 / BSUIR. – Minsk, 2019. – P. 6.
22. Vorobiov, V.I. Inter-component phase processing of quasipolyharmonic signals / V.I. Vorobiov, D.A. Kechik, S.Y. Barysenka // Appl. Acoust. – 2021. – Vol. 177. – 14 p.

23. Lei, Y. Intelligent Fault Diagnosis and Remaining Useful Life Prediction of Rotating Machinery / Y. Lei. – Pub. 1 edition. – Oxford, United Kingdom : Butterworth-Heinemann, 2016. – 376 p.
24. Lyon, R.H. Machinery Noise and Diagnostics / R.H. Lyon. – Butterworth-Heinemann, 2013. – 310 p.
25. Integrated Condition Monitoring and Prognosis Method for Incipient Defect Detection and Remaining Life Prediction of Low Speed Slew Bearings / W. Caesarendra [et al.] // Machines. – 2017. – Vol. 5, № 2. – P. 11.
26. Bengtsson, M. Machining Equipment Life Cycle Costing Model with Dynamic Maintenance Cost / M. Bengtsson, M. Kurdve // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 48. – P. 102–107.
27. Lienig, J. Fundamentals of Electronic Systems Design / J. Lienig, H. Bruemmer. – Cham : Springer International Publishing, 2017.
28. Dhillon, B.S. Engineering Maintenance: A Modern Approach / B.S. Dhillon. – Pub. 1. – Boca Raton : CRC Press, 2002.
29. Klutke, G. A critical look at the bathtub curve / G. Klutke, P.C. Kiessler, M.A. Wortman // IEEE Trans. Reliab. – 2003. – Vol. 52, № 1. – P. 125–129.
30. Bychkov, D.V. Economic efficiency of implementation of vibration-based diagnostic systems at enterprises / D.V. Bychkov // Energy Resource Saving. Diagnostics-2014 : XVI International theoretical and practical conference, Dimitrovgrad, 12–13 May 2014 / Promservis. – Dimitrovgrad, 2014. – P. 10.
31. Rolling bearings [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.nsk.com/common/data/ctrpPdf/e1102m.pdf>. – Date of access: 10.02.2021.
32. Vázquez, J.J.R. Open CPS Platforms [Electronic resource]. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/280095935\\_Open\\_CPS\\_Platforms](https://www.researchgate.net/publication/280095935_Open_CPS_Platforms). – Date of access: 9.02.2021.
33. Ram, M. Advances in mathematics for Industry 4.0 / M. Ram. – Pub. 1. – San Deigo : Elsevier, 2020.
34. Kamaludin, N. Cyber Physical System in the industry / N. Kamaludin, B. Mulyanti // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 830, № 3. – P. 8.
35. Stefán, P. Shop-floor scheduling based on reinforcement learning algorithm / P. Stefán, L. Monostori // Prod. Syst. Inf. Eng. – 2003. – Vol. 1. – P. 83–90.
36. Alabdulkarim, A.A. Applications of Simulation in Maintenance Research / A.A. Alabdulkarim, P.D. Ball, A. Tiwari // World J. Model. Simul. – 2013. – Vol. 9, № 1. – P. 39.
37. Design of multiagent system «Smart Factory» for operative control of resources in real-time mode / V.F. Shpilevoy [et al.] // Information and control systems. – 2013. – № 6 (67). – P. 91–98. (in Russian)
38. Informational robots in systems of enterprise control / D. Ye. Namiot [et al.] // Int. J. Open Inf. Technol. – 2017. – Vol. 5, № 4. – P. 12–21. (in Russian)
39. Mourtzis, D. A cloud-based cyber-physical system for adaptive shop-floor scheduling and condition-based maintenance / D. Mourtzis, E. Vlachou // J. Manuf. Syst. – 2018. – Vol. 47. – P. 179–198.
40. Lamy, D. Energy-aware scheduling in reconfigurable multiple path shop floors / D. Lamy, J. Schulz, M.F. Zaeh // Procedia CIRP : 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020. – 2020. – Vol. 93. – P. 1007–1012.
41. Ko, Y.M. Condition-based joint maintenance optimization for a large-scale system with homogeneous units / Y.M. Ko, E. Byon // IISE Trans. – 2017. – Vol. 49, № 5. – P. 493–504.
42. Hyperconnected Factories pathway [Electronic resource] / Connected factories. – Mode of access: <https://www.connect-edfactories.eu/hyperconnected-factories-pathway>. – Date of access: 09.03.2021.

Поступила 24.02.2021

## ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ ПРИ ПОМОЩИ ФРЕЙМВОРКА FIWARE

**Д.А. КЕЧИК, И.Г. ДАВЫДОВ, Я.В. ГЕРАСИМУК,  
А.В. ЦУРКО, М.А. СМОЛЕВ**

*Цель настоящей работы – описать интеграцию системы вибрационной диагностики с фреймворком FIWARE. Данная интеграция повышает масштабируемость системы и способствует ее дальнейшему развитию. Разработанная система реализована и опробована в реальных условиях. Наилучший экономический эффект от внедрения данной системы может быть получен в случае, когда она применяется в полностью автоматизированном производстве. Предложен вариант интеграции с подсистемами управления предприятием тренда Индустрии 4.0. Оперативный перерасчет техпроцесса и стоимости каждого из альтернативных сценариев потенциально максимизирует преимущества непрерывного автоматизированного мониторинга технического состояния оборудования. Показаны преимущества применения фреймворка FIWARE для разработки предложенной киберфизической системы.*

**Ключевые слова:** киберфизическая система, Индустрия 4.0, FIWARE, брокер контекста, умная фабрика, вибрационная диагностика, системное моделирование, функциональное моделирование, информационная система, автоматизированная система управления.

УДК 519.876.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПИДЕМИИ С ПОМОЩЬЮ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

канд. техн. наук, доц. А.Ф. ОСЬКИН  
(Полоцкий государственный университет);

Д.А. ОСЬКИН  
(Белорусский государственный экономический университет, Минск)

*Рассматривается технология построения модели распространения эпидемии с помощью клеточных автоматов. Приведены краткие сведения по истории становления данной технологии моделирования. Указано, что в качестве среды для построения модели выбран табличный процессор Microsoft Excel, проанализированы достоинства и недостатки такого выбора. Описана SIR-модель распространения эпидемии и показано как она реализуется в среде Microsoft Excel. Рассмотрены результаты моделирования по различным сценариям.*

**Ключевые слова:** клеточные автоматы, Microsoft Excel, SIR-модель распространения эпидемии.

**Введение.** Вспышка коронавирусной инфекции была зарегистрирована в декабре 2019 г. в Ухане (Китайская Народная Республика). Всемирная организация здравоохранения объявила ее чрезвычайной ситуацией в области здравоохранения уже 30 января 2020 г., а 11 марта эпидемия, начавшаяся в Китае, была признана пандемией.

Пандемия вызвала серьезные социально-экономические последствия. Так, она стала причиной крупнейшей мировой рецессии после Великой депрессии – мирового экономического кризиса, начавшегося в октябре 1929 г. в США и продолжавшегося до 1939 г. Было отменено или перенесено множество культурных, научных, спортивных, политических, религиозных мероприятий. Высшие учебные заведения, а также колледжи и школы были закрыты на карантин и переведены на дистанционную форму обучения.

В связи с вышеизложенным вполне естественным представляется огромный интерес, который проявляет мировая научная общественность к изучению и моделированию распространения коронавирусной инфекции. Так, на информационном ресурсе <https://kaggle.com>, созданном и запущенном корпорацией Google LLC, организована платформа для размещения компьютерных программ, моделирующих динамику распространения инфекции и прогнозирующих ее последствия.

На платформе в открытом доступе находятся верифицированные наборы данных по динамике распространения коронавируса в различных странах, и каждый желающий может воспользоваться этими наборами при построении своей модели пандемии. Можно также разместить здесь свою программу моделирования, которую по достоинству смогут оценить все члены научного сообщества.

Существует множество подходов к реализации компьютерной модели распространения эпидемии. Преобладают модели, в основе которых лежат системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Чаще всего для построения моделей используются программные продукты, реализующие принципы системной динамики: iThink, Dynamo, Stella, PowerSim, российская программная система AnyLogic.

Самыми распространенными моделями являются модели SIR (аббревиатура от англ. Susceptible, Infected, Recovered – *Восприимчивые, Инфицированные, Выздоровевшие*). Население в таких моделях делится на три части – восприимчивые к заболеванию, заразившиеся (инфицированные) и выздоровевшие. В процессе моделирования люди переходят из состояния в состояние, пока эпидемия не закончится.

В отличие от подходов к моделированию, описанных выше, мы будем моделировать процессы развития эпидемии, основываясь на других принципах. В основе нашей модели лежат клеточные автоматы.

**Клеточные автоматы.** Клеточным автоматом называется структура, состоящая из множества однородных элементов, для каждого из которых заданы состояния и правила поведения. Правила определяют, как будет меняться поведение каждого элемента в зависимости от состояния соседних элементов и времени. Причем как время, так и состояния элементов меняются дискретно.

Создателем клеточных автоматов является J. von Neumann, предложивший использовать их для формального моделирования механизмов самовоспроизведения [1]. В конце 1940-х – начале 1950-х годов он разработал пять теоретических моделей самовоспроизводящихся клеточных автоматов, реализовать которые не удалось, так как они оказались слишком сложными для того времени.

Свой вклад в теорию построения клеточных автоматов внес и E. Codd [2], широко известный как автор реляционной модели хранения данных. Однако и его модель не была реализована.

Основываясь на работах E. Codd, в начале 1970-х годов J. Conway построил клеточную модель, получившую название Game of Life (игра «Жизнь»). Модель имитировала поведение популяции примитивных организмов в однородной среде и получила широкую популярность.

Также вклад в развитие математической теории, описывающей поведение клеточных автоматов, внесли такие ученые, как А. Burks [3], V. Aladyev [4], T. Vollmar [5], A. Smith III [6]. Завершил построение теории S. Wolfram [7], разработавший принципы и построивший первую классификацию клеточных автоматов.

**Табличный процессор Microsoft Excel как среда моделирования.** Табличный процессор Excel является мощным инструментальным средством реализации вычислительных алгоритмов. Нам известен подход к решению вычислительных задач в среде Excel, который авторы В.И. Аникин, О.В. Аникина называют алгоритмическим табличным моделированием (АТМ), достоинства и недостатки которого сводятся к следующему:

1. Процесс создания табличной модели становится осмысленным и логичным, а не выполняется, как часто бывает, методом проб и ошибок, что ускоряет процесс создания модели, позволяет избежать множества ошибок.

2. Разработчик по необходимости больше внимания уделяет концептуальной модели и формализации решаемой задачи, математическим и функциональным зависимостям между переменными модели, алгоритму обработки данных, чем неопытные разработчики часто пренебрегают.

3. Создавая табличную модель по технологии АТМ, разработчик большую часть времени затрачивает на работу непосредственно с данными, тогда как при обычном программировании его внимание в основном концентрируется на процессе написания программного кода.

4. Технология АТМ превращает электронные таблицы в удобную инструментальную среду эффективного моделирования и визуализации огромного числа практически значимых вычислительных алгоритмов.

Обладая перечисленными достоинствами, технология АТМ обладает также рядом недостатков, ограничивающих область ее применения:

1. Алгоритм обработки данных должен быть вычислительным, а не процедурным, так как исходно функции табличного процессора пассивны.

2. Технология АТМ хорошо подходит для создания одномерных, двумерных, иногда трехмерных моделей, в противном случае серьезным ограничивающим фактором становится плоская структура ЭТ.

3. По быстродействию табличные модели алгоритмов значительно уступают быстродействию их программных реализаций [8].

Учитывая сказанное выше, взвесив перечисленные достоинства и недостатки, мы остановили свой выбор среды моделирования на табличном процессоре Excel, так как нами, с одной стороны, решается двумерная задача, а с другой стороны, низкое быстродействие табличной модели не является важным ограничивающим фактором.

**Описание модели.** Базовым элементом модели является квадрат размером  $50 \times 50$  клеток, размещенный на листе табличного процессора Microsoft Excel. В соответствии с концепцией SIR, каждая клетка модели может находиться в одном из трех состояний – *Восприимчивые* (Susceptible), *Инфицированные* (Infected), *Выздоровевшие* (Recovered). Присвоим каждому из состояний числовые значения. Пусть клетки, моделирующие состояние *Восприимчивые*, имеют значение «0», клетки, моделирующие состояние *Инфицированные* – начальное значение «1», а *Выздоровевшие* – значение «10». В процессе моделирования клетки, отображающие состояние *Инфицированные*, меняют свое текущее значение в сторону увеличения. Как только текущее значение такой клетки станет равным или большим некоторой величины  $\alpha$ , являющейся одним из управляющих параметров модели, клетка перейдет в состояние *Выздоровевшие*.

Кроме того, на состояние каждой клетки влияют состояния ее соседей. Для определения текущего состояния рассматриваемой клетки, мы используем окрестность Мура – совокупность из восьми клеток, имеющих общую вершину с рассматриваемой. Если текущую клетку, находящуюся в состоянии *Восприимчивые*, окружает не менее трех клеток в состоянии *Инфицированные*, то такая клетка «заболевает», т.е. переходит в состояние *Инфицированные*.

Для большей наглядности ко всем клеткам модели применено условное форматирование со следующими правилами:

- клетка остается незакрашенной, если ее текущее значение равно 0;
- клетка заливается красным цветом, если ее значение равно 1;
- клетка заливается зеленым цветом, если ее значение равно 10.

Алгоритм моделирования состоит из последовательности шагов (итераций).

На рабочем поле базового квадрата размещаем в случайном порядке клетки с текущим значением 1 – *Инфицированные*. При этом на вспомогательном квадрате отображаются клетки *Заразившиеся* от *Инфицированных*, рассчитанные в соответствии с правилами, изложенными выше. На этом завершается первая итерация (рисунок 1).

На второй итерации складываются текущие значения клеток базового и вспомогательного квадратов. Получившаяся совокупность клеток образует новый базовый квадрат. Как и в предыдущем случае, на вспомогательном квадрате отображаются клетки *Заразившиеся* от *Инфицированных* (рисунок 2).

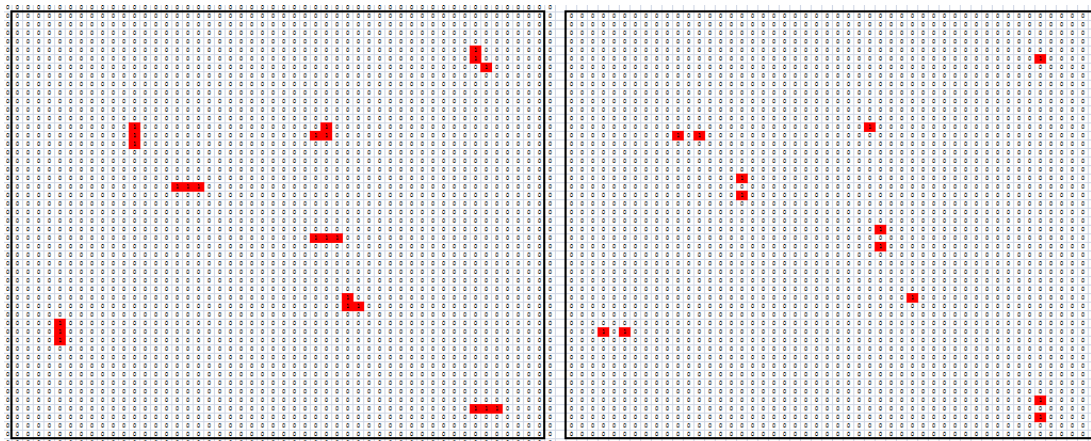


Рисунок 1. – Первая итерация процесса моделирования. Исходное состояние (базовый квадрат) и результаты расчета (вспомогательный квадрат)

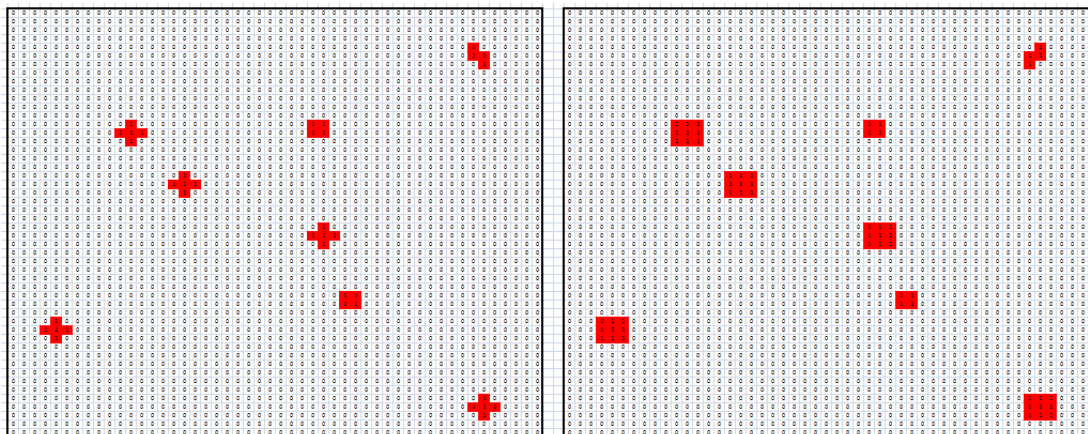


Рисунок 2. – Вторая итерация процесса моделирования. Число «заболевших» растет

Третья и дальнейшие итерации повторяют предыдущие. Качественного изменения картины не происходит до тех пор, пока текущие значения *Инфицированных* клеток не превысят параметр  $\alpha$ . В этом случае на вспомогательном квадрате появятся *Выздоровевшие* – клетки с текущим значением больше  $\alpha$ , закрасненные зеленым цветом (рисунок 3).

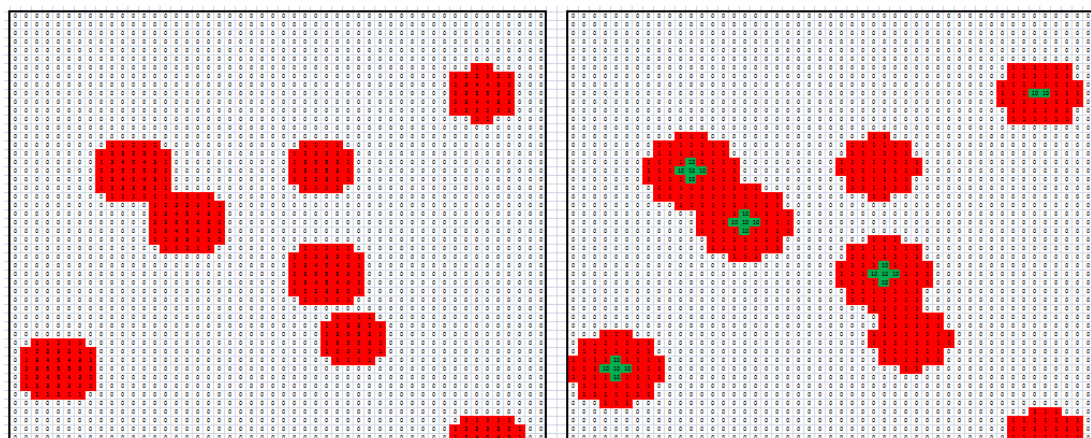


Рисунок 3. – N-я итерация процесса моделирования. Появились первые *Выздоровевшие*

Далее процесс продолжается по той же схеме.

**Сценарии моделирования. Модель SIR-1.** Исследование процесса распространения эпидемии начнем с классической SIR: в модели три типа клеток (*Восприимчивые*, *Инфицированные*, *Выздоровевшие*), «умерших» клеток нет, вакцинация не проводилась.

Результаты моделирования представлены на рисунках 4 и 5.



Рисунок 4. – Развитие эпидемии.  
Итерации 1, 3, 5



Рисунок 5. – Развитие эпидемии.  
Итерации 7, 9, 11

Как было указано выше, на рисунках красным цветом выделены *Инфицированные*, зеленым – *Выздоровевшие*.

На рисунках 6–8 соответственно представлены графики изменения числа *Восприимчивых*, *Болеющих* и *Выздоровевших*. Как видно из графика, приведенного на рисунке 7, пик эпидемии приходится на 6-ю итерацию. Интересным является тот факт, что после того как 80% жителей региона переболело, в моделируемом регионе вырабатывается коллективный иммунитет, а число заразившихся резко снижается (рисунок 6).

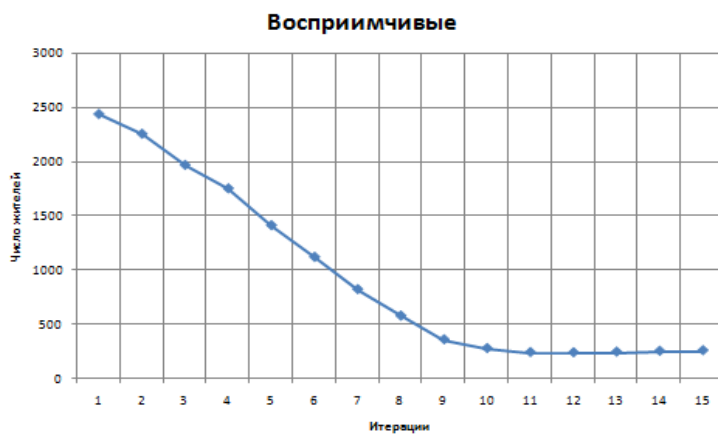


Рисунок 6. – Число жителей региона, восприимчивых к заболеванию



Рисунок 7. – Число болеющих жителей региона

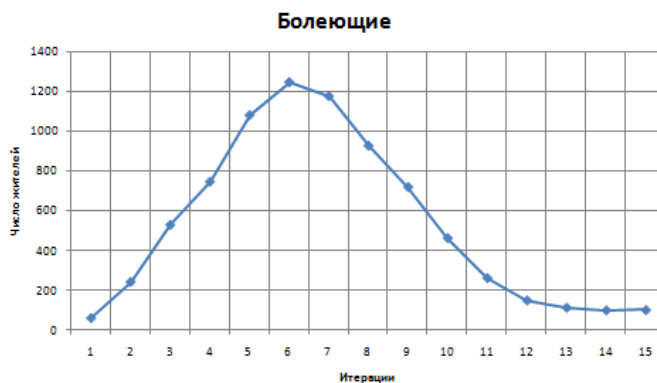
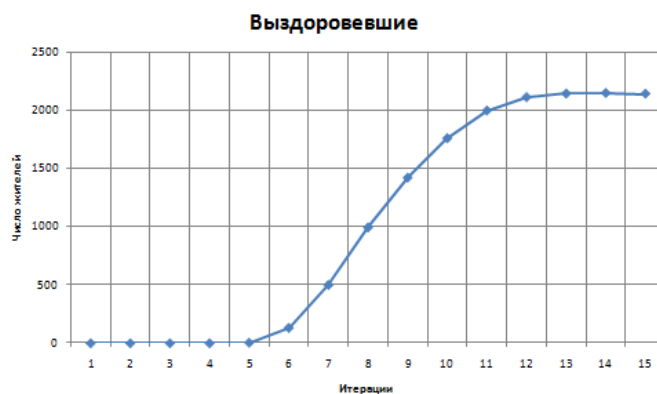


Рисунок 8. – Число выздоровевших жителей региона



**Сценарии моделирования. Модель SIR-2.** Оценим влияние вакцинации на процесс развития эпидемии. Для этого дополним описанную выше модель «вакцинированными» клетками. Присвоим им текущее значение «10», так как эти клетки, как и клетки, отображающие *Выздоровевших*, являются носителями антител. Очевидно, что соответствующие клетки окрасятся в зеленый цвет.

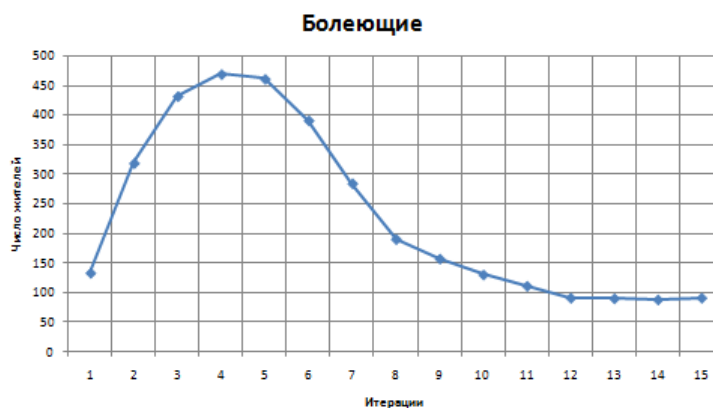
Будем считать, что к началу эпидемии провакцинировалось примерно 30% населения региона. Как при этом будет развиваться эпидемия показано на рисунках 9 и 10. Как в этом случае изменяется число болеющих показано на рисунке 11.



Рисунок 9. – Развитие эпидемии с учетом вакцинации. Итерации 1, 3, 5



Рисунок 10. – Развитие эпидемии с учетом вакцинации Итерации 7, 9, 11



**Рисунок 11. – Число болеющих жителей региона**

**Заключение.** Моделирование различных сценариев развития эпидемии показало следующее:

1) несмотря на простоту, модель адекватно отображает процессы развития эпидемии в некотором замкнутом регионе;

2) в модели естественным образом отобразился феномен формирования коллективного иммунитета. Никаких дополнительных улучшений вносить в модель не потребовалось;

3) также естественно было учтено влияние вакцинации на развитие эпидемии. При заданных параметрах модели всего 30% вакцинированных позволили снизить максимальное число болеющих почти в три раза (с 1273 в случае отсутствия вакцинации до 469 при 30% вакцинированных);

4) наличие параметров, позволяющих регулировать динамику отображения моделируемых процессов, делает возможным использование модели для прогнозирования эпидемиологической ситуации в заданном регионе при условии его относительной автономности;

5) в модели не учитываются возможные летальные исходы, что, безусловно, является ее недостатком;

6) доработка модели с учетом большего количества влияющих факторов позволят повысить точность и эффективность моделирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Von Neumann, J. Theory of Self Reproducing automata / J. Von Neumann ; ed. A.W. Burks. – Champaign, IL : University of Illinois Press, 1966.
2. Codd, E.F. Cellular Automata / E.F. Codd. – Academic Press, 2014. – 132 p.
3. Essays on Cellular Automata / Ed. A. Burks. – Champaign, IL : University of Illinois Press, 1970. – 375 p.
4. Aladyev, V.Z. Mathematical theory of homogeneous structures and their applications / V.Z. Aladyev/ – Tallinn, Estonia : Valgus, 1980.
5. Vollmar, T. Cellular spaces and parallel algorithms, and introductory survey / T. Vollmar // Feilmeier, M. Parallel Computation Parallel Mathematics / M. Feilmeier. – Amsterdam, The Netherlands : North-Holland Publishing Co., 1977. – 49–58.
6. Smith III, A. Introduction to and survey of polyautomata theory / A. Smith III // Automata, Languages, Development. – Amsterdam, The Netherlands : North-Holland Publishing Co., 1976.
7. Wolfram, S. Theory and Applications of Cellular Automata: Including Selected Papers 1983–1986 / S. Wolfram. – NJ : World Scientific Publishing Co.Inc. : River Edge, 1986.
8. Аникин, В.И. Визуальное табличное моделирование клеточных автоматов в Microsoft Excel / В.И. Аникин, О.В. Аникина. – Тольятти : ПВГУС, 2013. – 324 с.

Поступила 30.03.2021

#### MODELING AN EPIDEMIC WITH CELLULAR AUTOMATION

**A. OSKIN, D. OSKIN**

*The technology of constructing a model of the spread of an epidemic using cellular automata is considered. Brief information on the history of the formation of this modeling technology is given. It is indicated that the Microsoft Excel spreadsheet processor is selected as the environment for building the model, and the advantages and disadvantages of this choice are listed. The SIR-model of the spread of the epidemic is described and it is shown how this model is implemented in the MS Excel environment. The results of modeling for various scenarios are considered.*

**Keywords:** cellular automata, Microsoft Excel, SIR-epidemic spreading model.

UDC 621

## ALGORITHM OF CLASSIFICATION OF SHAFT ORBITS

**D. KECHIK, PhD I. DAVYDOV, I. LOSHCININ, K. ZHUKOVSKIY**  
(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)

*Classification of spatial patterns of shaft orbits is studied in this paper. Recent methods of signal processing, such as spectral interference frequency refinement method, Mallat scattering transform were tested for task of obtaining patterns, informative features extraction and classification. Strong dependence on fluctuations of signal parameters and significant variability of spatial patterns has been discussed. Effectiveness of ranking of patterns using different approaches has been estimated using computational modelling and natural experiments. Preprocessing of signal and informative features has been considered. Approach of discrimination of different misalignment types and severities, based on rate of occurrence of classes of spatial patterns, has been proposed, its effectiveness has been demonstrated.*

**Keywords:** *pattern recognition, frequency domain, spatial domain, time synchronous averaging, phase processing, vibrational diagnosing, scattering transform, wavelet transform, convolutional network, support vector machine.*

**Introduction.** In normal and various defect states displacement of shaft is periodical process. Measurement of trajectory of center of shaft at its end, or shaft orbit, has been used for diagnosing of rotary equipment for a long time. Shaft displacement in orthogonal directions carry full information about dynamical forces occurred in rotary system [1; 2]: shaft and related plain bearings [3–6], rolling bearings [1], couplings [3–6]. Thus, shaft orbit related with machine state unambiguously [2]. It shows processes in system pictorially [2] and is convenient for experienced expert. Idea of spatial averaged shaft orbits is close to time synchronous averaging (TSA) [7–9] of signal of vibration for extraction of patterns of signal that are informative features of equipment state. Both methods require synchronization with shaft rotation frequency. It can be usually achieved by tachometer. Another approach is to estimate instantaneous shaft rotation frequency using vibration signal [10; 11]. Vibration is assumed to be stationary, and temporal or spatial patterns can be obtained by averaging of signal frames of length of shaft revolution period. Signals of vibration observed under condition of varying speed can be resampled with equiangular step [10; 11] to obtain stationary signals and recover spectral, temporal and spatial informative features could be selected by conventional methods.

To display shaft orbit, let averaged vertical radial displacement be on  $Y$  axis and averaged horizontal radial displacement be on  $X$  axis. This idea is close to idea of Lissajous figures that are images of orthogonal oscillations [12; 13]. Unambiguous dependence of figure form on their phase and frequency relations has been shown [13]. Under frequency relations ratios of frequencies of present components of signals in the both channels to the frequency of fundamental frequency is understood. Phase relations term means relative values of initial phases of the components of signals in both channels as well as phase shift between channels. Fundamental frequency (FF) is the first harmonic of the signal, shaft rotation frequency.

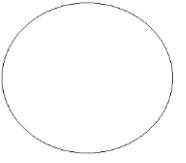
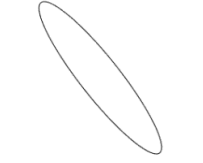


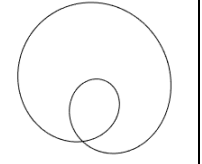
The commonly used method of vibrational diagnosing is analysis of amplitude spectrum of vibrational signal and its envelope. Fourier transform (FT), of fast FT (FFT) is the most appropriate method: its implementation using modern computational technique is simple, basis functions (sinus and cosine) are correspond to oscillations of real mechanical system [14] and impulse response of linear system, it has high frequency resolution and noise immunity: even a component of low power is discriminable at wideband noise or/and harmonic of higher power and close frequency. Amplitudes of harmonics whose frequencies are multiple to FF are selected as informative features. Relations of the amplitudes and their growth is related with defect kind and its severity (class of equipment state) [15].

Shaft orbit can consider also phase relations (not values of initial phases that are random, but their relations [13]), non-synchronous vibration (usually at 0.4...0.5 FF), wideband vibration. Variability, sensitivity to small variation of parameters, relations of orbit classes and equipment state classes are studied in this paper. Recognition of spatial patterns of shaft orbit of equipment having misalignment has been studied in this paper. The main purpose of the paper is to investigate relations of defect kind as well as its severity with class of pattern, appropriate selection of spatial patterns among highly varied and distorted orbits and application of recent methods of signal processing for analysis of vibration and images. Classes of patterns described in literature and observed at testbed are considered. The rest of paper is organized as the following: in the Section 2 learning dataset (patterns obtaining) is discussed, the Section 3 describes pattern extraction. Pattern recognition and classification of shaft trajectories is discussed in the Section 4. The last section concludes the paper.

**Dataset.** Review of literature sources has showed that relations of shape of orbit and defect is different in different sources. Circle (C) [16] or Ellipse (E) [17, 18] orbits may indicate normal state of equipment. Elliptical [16–18] or close to circle [2] orbits may appear if shaft imbalance is present. Trajectory of misaligned

shaft may be elliptical [2] or have more complex form, named “Eight” (8), “Heart” (H) or “Tornado” (T) [16], the similar shapes are reported in [4] for various faults. Classes of pattern are often described as what they look like (e.g., Tornado, Heart) and what elements they are consist of (e.g., number of loops that may be important to explain physical processes, see [3]). We will keep this tradition next. Examples of classes adduced in literature are presented in table 1.

Table 1. – Examples of shaft orbits described in different sources

Class	Circle	Ellipse	Eight	Heart	Tornado
Image					

Misalignment can be described in two partial cases:

- angular misalignment (figure 1, *a*) is a state when axes of joined shafts are not parallel;
- parallel misalignment (figure 1, *b*) is a state when axes of joined shafts are parallel and do not lie on the same straight line.

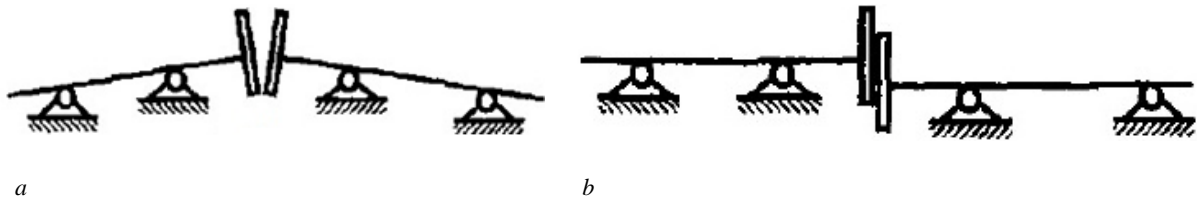


Figure 1. – Types of misalignment [19]

More generally, both types of misalignment can appear simultaneously, but we don't discuss this complex case. Lack of attention is paid to difference between kinds of misalignment in the papers devoted to studying of shaft orbits, despite even amplitude spectrum significantly differs that affects on orbit shape: the second (more rarely the third) harmonic grows faster at parallel misalignment rather than at angular misalignment [3; 5]. Sources that describe features in amplitude spectrum in detail usually do not pay attention to phase relations, and shaft orbits is only feature that experienced expert can analyze to obtain full information. Make unambiguous decision relying just on amplitude spectrum is not possible [3; 5]. Axial vibration may be additional source of information [5; 6; 20], but it is usually ignored. Growth of axial vibration may indicate misalignment [6; 20], but it is not ambiguous.

It is important to detect incipient defect and predict remaining resource of equipment. Tracking of amplitude values and their relations [15], statistical characteristics of signal [21] is used to estimate equipment state more accurate. Any changing of spatial pattern of shaft orbit may indicate its malfunction [22]. Spatial pattern is also developing when severity of the defect increases: shaft orbit is reported to be elliptical at the early stage of misalignment and become Eight further [23]. Estimation of defect severity, tracking and prediction of its evolution are needed to schedule maintenance of equipment more rationally [21; 23]. Then, we study dependence of spatial patterns of shaft orbit on defect kind and its severity using testbed vibration as an example.

Two datasets of vibration observed at bearing housing of equipment having parallel [24] and angular [25] misalignment of different severity were recorded. Each of them contains vibration signals observed under conditions of both kinds of misalignment of different severity in three orthogonal directions: radial vertical (V), radial horizontal (H), axial (A). Signals were observed at bearing housing of testbed using three orthogonal accelerometers. Bearing was separated from motor by jaw coupling. Severity and type of misalignment was regulated by special apparatus that shifted and rotated motor. It is notable that foundation of testbed was not rigid that is not typical for industrial equipment.

**Pattern extraction.** Traditionally, shaft orbits were obtained using laser (basics), proximity sensors [12; 18]. Accuracy of vibration sensors has been increased significantly. In this paper displacement of shaft is proposed to be obtained using accelerometers that are mounted in perpendicular directions. Acceleration signal is integrated twice to obtain displacement signal. Sensors were mounted on the bearing housing. Vibration contains a lot of components of different nature, and the components produced by shaft and its interaction with other elements should be selected. Components related with shaft and coupling defects are multiple to FF. Faulty plain bearing can produce multiples to FF and its half or 0.1FF in the case of lubrication defects such as oil whirl [26]. Frequencies of the most of components produced by rolling bearing are also multiple to FF [15; 27]. Two controversial

conditions must be met: suppression of wideband and harmonic noise and passing all informative wideband and narrowband components. For analysis of spatial patterns low frequencies band (0...200 Hz) as well as notch filtrated narrow bands may be selected [22]. Harmonic components of vibrational signal at low frequencies are coherent with FF [14; 28]. If FF does not variate significantly, energy of components related to shaft is concentrated in narrow band. Selection of the components using FT is appropriate [11; 21; 29]. Fourier filtration is a procedure of consequent FT of signal, windowing of complex spectrum, applying of inverse FT [29] and can be realized as [11]:

$$s_{out}(t) = \Re\{F^{-1}(Y(f) \cdot W(f_1, f_2)), W(f_1, f_2) = \begin{cases} 1, & \text{if } f_1 \leq f \leq f_2, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (1)$$

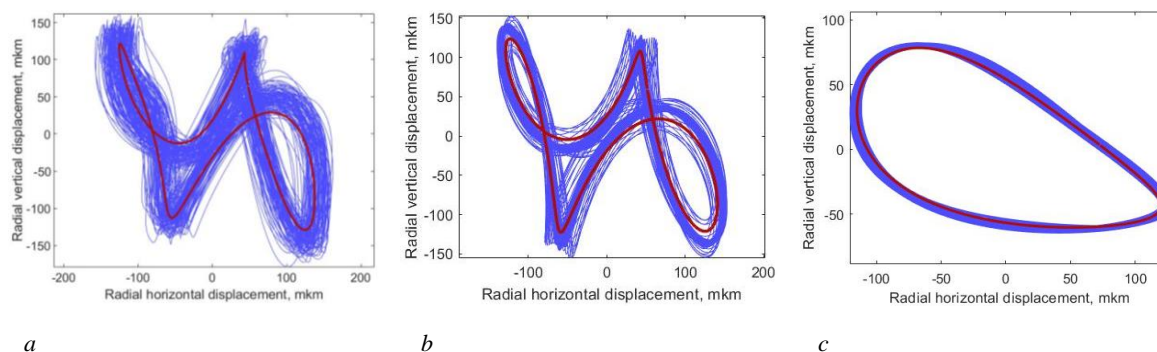
where  $F^{-1}(x)$  is inverse FT;

$Y(f)$  is one sided spectrum of input signal;

$W(f_1, f_2)$  is rectangular window.

The first three harmonics of shaft rotation frequency carry information about presence and severity of both kinds of misalignment [3; 5] and should be selected. Shaft rotation frequency was refined for each signal of dataset using spectral interference method. The method is used to detect multiple frequencies at mixture of polyharmonic signal and wideband and harmonic noise. Shaft speed is estimated with high accuracy (less than 1%), then we can select narrow frequency bands of harmonics of FF. The method is used to detect automatically harmonics of FF that are prominent enough, are not splitted or leaked and are multiple to FF with high accuracy [11]. Then, we select the narrow bands in the vicinity of detected harmonics using Fourier filtration. Hereinafter, we denote multiple to FF components of vibration as  $nX$  (1X, 2X, ...), where  $n = 1, 2, \dots$  is number of harmonic.

Shaft orbit is generated as Lissajous figure. We can plot filtrated signal of horizontal direction sensor along X axis and filtrated signal of vertical direction sensor along Y axis. Obtained figure is smeared and open-ended due to residual noise and deviations of frequency, as it has been shown at figure 2 on example of vibration of parallel misaligned testbed and in [12]. Signals should be averaged to obtain spatial pattern. Filtrated signals, consisting of selected harmonics and negligible residual noise, were averaged in the same manner as it is assumed using TSA method [7; 8]. Each of the signals was divided at temporal windows of length of the FF period. Tachometer signal, or keyphasor, is usually used to determine moments of full shaft revolution. Here in this paper, we divide the signal on equal windows of length of average period of filtrated 1X. It is based on assumptions of high stationarity of the signal and high SNR of selected 1X signal. Additionally, orbit images were obtained applying technique to vibration filtrated in range of 0...200 Hz. The patterns were sustainable in both cases. Trajectories obtained by limitation of harmonics number (1X and 2X) were not variated strong in case of angular misalignment depending on its severity, but orbits observed under parallel misalignment variated under different defect severity and were not similar to angular misalignment results.







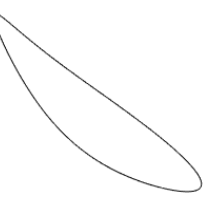
**a – using low-pass Fourier filtration; b – using selection of 3 narrow band components; c – using selection of 2 components**

**Figure 2. – Shaft orbit and its average pattern (thick line) obtained in different way**

**Pattern recognition.** Monitoring of evolution of informative features of defects is highly recommended [3; 15; 21; 23] to detect incipient defects, evaluate equipment state more accurate and then minimize maintenance costs. Evolution of informative features in frequency domain is well described [3]. Shaft orbits are also depending on severity of defect. For example, spatial pattern of misalignment evolves from Ellipse to Eight [23]. Shaft orbit may be distorted under various conditions [3]. Variation of shape of shaft trajectory is recommended to be monitored depending on variation of speed, load or machine process parameters [22]. Thus, dependence of shaft orbit on severity of defect should be considered when classes of shaft orbit are selected.

On the basis of literature sources (e.g. [3]) and results of numerical and natural (observed at testbed orbits are available [30]) modelling one can reveal, that select classes of patterns relying on similarity of their form unambiguously is difficult, e.g., variability of form is discussed in [3]. Number of figures are similar to described in sources classes having distortions of different severity (quantitative difference) or another geometry (e.g., degenerated loop, qualitative difference). For example, observed at experiment on testbed transient classes of orbits are presented in table 2.

Table 2. – Examples of distorted and transient classes

Class	Transition of Ellipse to Eight	Transition of Ellipse to Eight	Degenerated Eight	Degenerated Ellipse	Distorted Ellipse
Image					

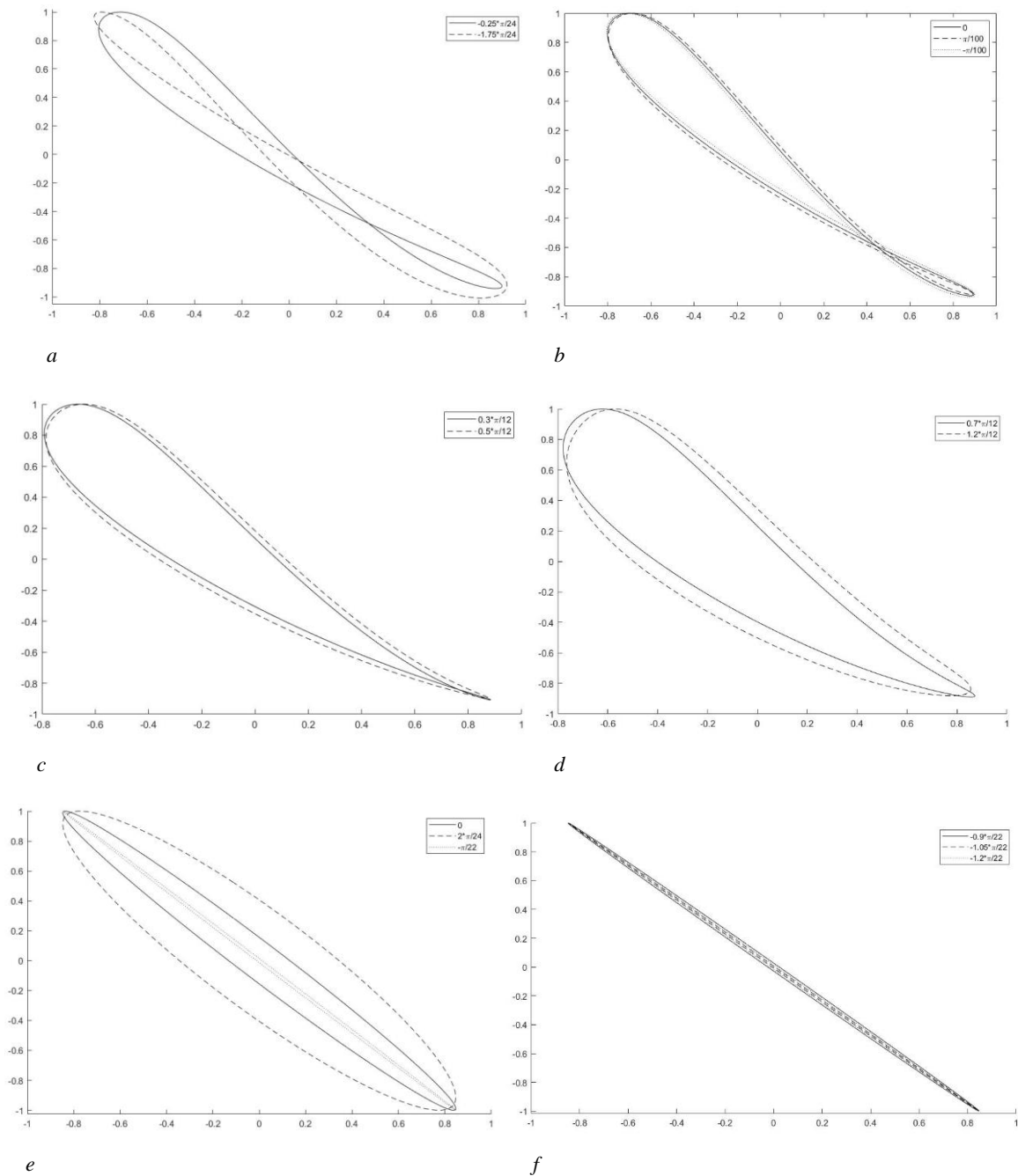
Distortions and translations between classes were reproduced numerically. Observed pattern close to translation class was selected. Three harmonics of FF were discriminated in radial horizontal and vertical channels, average amplitudes  $A_{x,k} = \{105.17, 12.92, 2.59\}$ ,  $A_{y,k} = \{124.19, 7.95, 5.53\}$  and initial phases  $\varphi_{x,k} = \{3.07, -0.72, -3.23\}$ ,  $\varphi_{y,k} = \{0.08, -0.41, 0.12\}$  were estimated as modulus and angle of analytical signals. Phase of 1X of the second channel varied to adjust shape of the pattern to obtain observed interested cases. Results are depicted at figure 3. New classes were introduced: Little\_loop (figure 3, b) quantitatively differs from Eight (figure 3, a), Leaf (figure 3, c) qualitatively differs from Eight, the less loop is degenerated) Infusoria (figure 3, d) quantitatively differs from Leaf, both classes are transient to Ellipse.

It is clear that even little fluctuations of parameters of vibration caused by small fluctuations of operating mode conditions can lead to significant qualitative or quantitative changes of pattern. Significant influence of these changes on classification results has been shown by results of numerical modelling. Classes of patterns introduced before were generated. Phase of 1X component varied to produce variety of pattern shape as it has been shown at figure 3. Circle and Ellipse (figure 3, e) were generated as result of averaging harmonic signals in both channels with different shift. Ellipse\_degenerated (figure 3, f) class represents the case when phase shift between channels goes to zero. Heart and Tornado classes were reproduced as Lissajous figure of two biharmonic signals.

To understand how one can rank real patterns for training of classifier, numerical experiment has been conducted. The purpose was to test three strategies of classification: ranking of quantitatively different patterns as distinct classes, ranking them as the same class, ranking qualitatively different patterns as the same class. Three datasets of images were generated. Each class of patterns contained 100 elements. Shape of patterns was varied in range has been shown at figure 2. Each of datasets was randomly divided into training (25%) and testing (75%) sets, informative features were obtained using Mallat scattering transform (see Appendix A). Classification of patterns using Support Vector Machine (see Appendix B) was tested at independent testing set. The first dataset contained patterns of different classes that are quantitatively and qualitatively different: Circle, Ellipse, Ellipse\_degenerated, Eights, Little\_loop, Leaf, Hearts, Tornado, Infusoria. Other datasets contained classes consists of patterns of distinct classes: elements that have only quantitative differences (Eight and Little\_loop, Leaf and Infusoria, Ellipse and Ellipse\_degenerated), or qualitative differences (Eight and Little\_loop and Leaf). Accuracy of classification in all three cases approached 99% if training set amounted 15% or more of all dataset.

Learning on incomplete training set has been tested. Training set contained only 15 elements of a few classes (Circle, Ellipse, Eights, Hearts, Tornado). Testing set contained 100 elements of the same classes and Ellipse\_degenerated, Little\_loop, Leaf and Infusoria classes generated independently. Quantitatively different from Eight class Leaf and Infusoria were classified as Ellipse. As we noted above, signals with close amplitude and phase relations can produce dissimilar patterns, similar patterns can be produced by signals even with different number of components. Little\_loop has been recognized as Eights. Ellipse\_degenerated was mostly (77%) classified as Eights, the rest 23% were classified as Heart despite they have no visible similarity. If we add Leaf class to learning set, Infusoria classified Leaf. Little\_loop was classified as Eight (78%) or Leaf (22%). Geometric similarity of patterns does not guarantee that they will be closer in space of informative features.





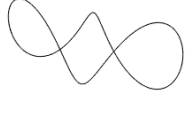
Classification of Additionally, stability of Mallat scattering transform to rotations has been tested. Testing set consisted of rotated by 90 degrees patterns of training set. Accuracy of their classification amounted 76%. Quantitatively and qualitatively different patterns can be ranked as the same class during training of classifier. Even small variation of testing pattern can lead to misclassification. Results of numerical experiments illustrated strategy of ranking real patterns for training of classifier. Classes of images should capture variation of patterns of the same equipment state and difference of patterns along defect severity increasing.








**Figure 3. – Introduced numerical modelled classes of patterns.  
Each line is according to phase shift of 1X signed in legend**

Observed at testbed orbits are presented in table 3. Only regular occurred patterns were selected for each class. Classifier has been trained on images of orbits in horizontal-vertical (HV) plane. Classification of patterns in HV plane, horizontal-axial (HA) and vertical-axial (VA) planes (for vertical parallel misalignment only) has been proposed [30]. Patterns of both horizontal and vertical angular misalignment and horizontal parallel misalignment in HV plane were classified successfully. Accuracy of classification of images amounted 92% if number of elements of training set was 0.25 of number of all elements (9–15 elements). Number of patterns of angular misalignment sets were rated as introduced before classes: Leaf, Eight and Little\_loop, and classifier has failed to select patterns of these classes from set of real data due to variation of form of orbits, that is consistent with numerical experiments. Classes D, H, Glasses and Rhomb contained highly varied patterns. Classes Pretzel2 and Distorted\_Eight captured small distortions that improved discrimination of equipment state classes. High accuracy was achieved after training of classifier on real data. Accuracy of classification of testing set approached 95%. Patterns of vertical parallel misalignment were more stable in HA and VA planes depending on severity.

Table 3. – Examples of observed at testbed classes of patterns

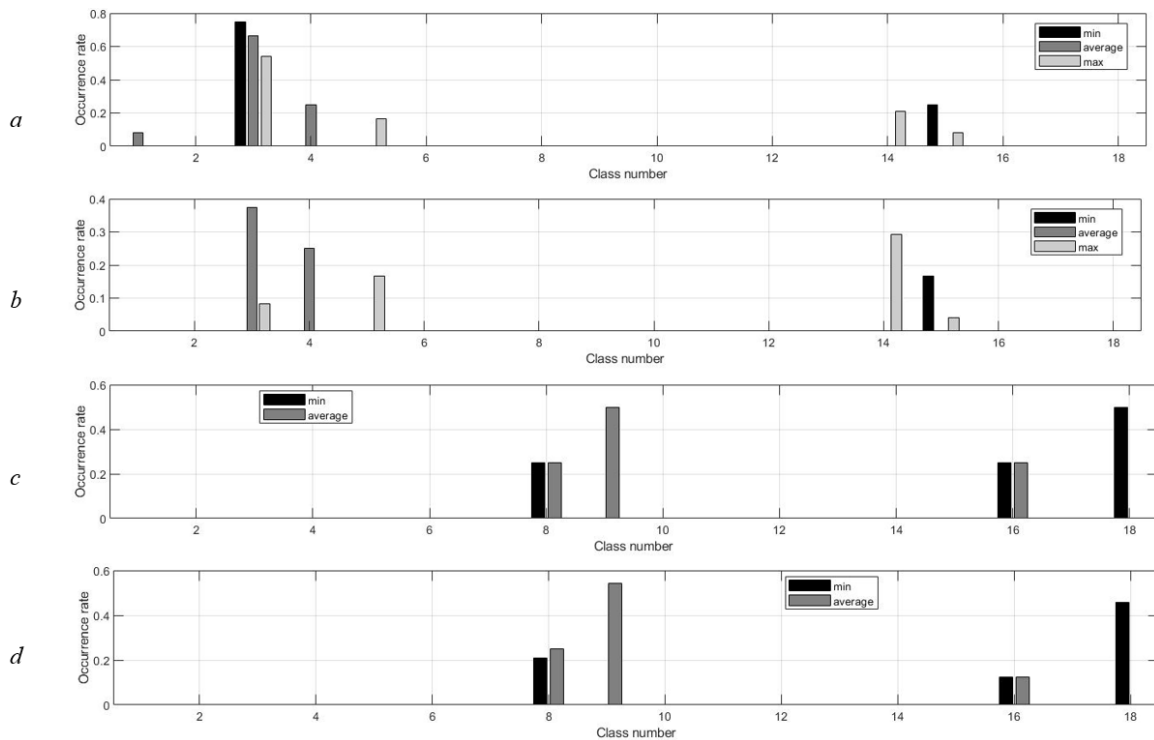
Class	Pretzel	Pretzel2	Worm	H	Glasses
Image					

End of Table 3

Class	Banano	D	Distorted_Eight	H_Vertical parallel1	Rhomb
Image					

Accuracy of classification of manually ranked patterns was 89% for horizontal angular misalignment set, 98% for horizontal parallel and only 72% for vertical angular misalignment sets if training set amounted 25% of dataset. If images were ranked by classes of equipment state, accuracy significantly decreased and amounted 64%. Training set should be the half of dataset to achieve 86% accuracy. Rate of occurrence (estimated by classifier and by manual classification proposed in [30]) of each pattern of shaft orbit across each of equipment state class is presented at figure 4. Each column is a number of observations of the current defect severity that were classified as the current class of orbit divided by total number of observations of the current severity. Severities of the current defect are denoted by color of column. Classes were ordered along of X axis in the following way:

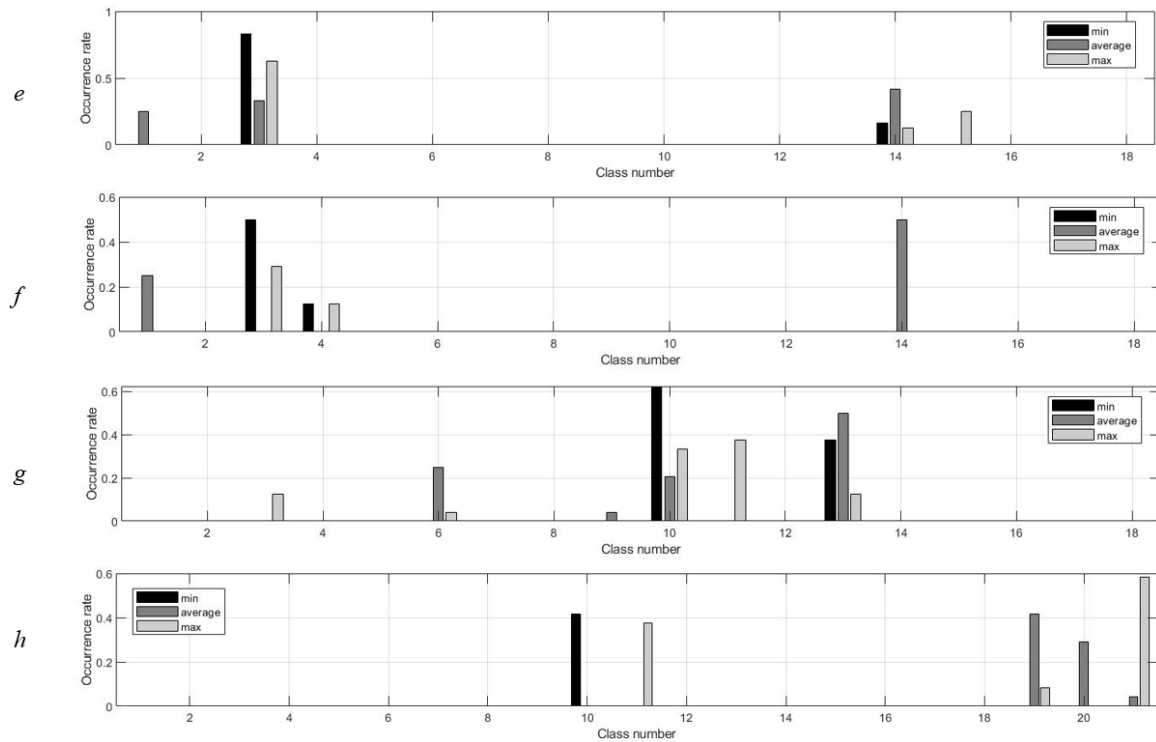
'Banano', 'CIRCLE', 'D', 'Distorted\_Eight', 'Eight\_angular', 'Ellipse', 'Ellipse\_degenerated', 'Glasses', 'H', 'H\_Vertical parallel1', 'H\_Vertical parallel2', 'Hearts', 'Infusoria', 'Leaf\_angular', 'Little\_loop\_\_angular', 'Pretzel', 'Tornado', 'Worm', 'Rhomb' (HA plane), 'Pretzel2' (VA plane), 'Pretzel3' (VA plane).



a, b – horizontal angular misalignment; c, d – horizontal parallel misalignment;  
 a, c, – classes detected by SVM; b, d, – manually classified patterns

Figure 4. – Occurrence rate of each class of pattern across equipment state classes (beginning)





*e, f* – vertical angular misalignment; *g, h* – vertical parallel misalignment;  
*e, g* – classes detected by SVM; *f, h* – manually classified patterns

**Figure 4. – Occurrence rate of each class of pattern across equipment state classes (end)**

As we can see, classes of patterns are discriminable as well as classes of equipment state. The same classes of patterns occurred with different rates in cases of distinct severities of the same defect. It is notable that classifier ranks *each* image, i.e., patterns that were not similar to any class of image were classified too, and results automatic classification may be corrupted. Used in this paper library of SVM can be used for estimation of probabilities of each class of pattern, then probability threshold can be adjusted to trade-off between reduction of number of wrong classified images and missing of potentially right classified images.

**Conclusions.** Lissajous figures were used for visual observation of phase relations of modulated signals [13]. Occurrence rate of spatial patterns is related with type and severity of defect. But patterns depend strong on fluctuations of amplitudes and phases, variation of conditions of equipment operation. Defining of classes of patterns can be complicated. Learning of classifiers on synthesized patterns is not reliable. Reduction of number of informative features is appropriate for automatic signal processing, then expression of amplitude, frequency and phase relations of the components of signals of the orthogonal sensors is more preferable. Phase shifts between harmonics of the same signal as well as between signals of distinct sensors can be used. Phase invariant or phase quasi-invariant are relative phase measurements called inter-component phase relations (ICPR) that characterize phase shift between harmonics of signal caused by influence of wave propagation medium [31]. ICPR can be informative features in various fields [13; 31; 32], it was demonstrated to be effective for discrimination of severity of parallel equipment [31]. Analysis of axial vibration is not widely discussed, but amplitude and phase relations of axial and radial vibration can be useful to discriminate both types of misalignment and estimate its severity. Applied recent methods of signal processing can improve shaft orbit analysis (both automated and manual) as well as analysis of amplitude and phase relations of multichannel vibrational signal.

**Appendix A**

**Mallat scattering transform.** The transform is based on idea of Scattering Network. It consists of a few layers. Linear operator is applied at each layer to signal propagated from the previous one. Non-linear operator is applied to output data of each layer. It can be interpreted as convolutional neural network, whose filters are predefined, but not learned [33; 34]. Combination of both of operators is called propagator. Non-linear operator is modulus, wavelet transform is used as a linear operator. As a result, propagator is non-expansive to distortions, is invariant to translations and rotation. Wavelet transform at each layer is convolution of input signal with translated and rotated mother wavelet [35]:

$$\Psi_{j,\theta}(p) = 2^{-2j} \psi(2^{-j} r_\theta p). \tag{2}$$

The operator  $\Phi$  is called nonexpansive if the following condition holds [33; 34]:

$$\forall (f, h) \in \mathbf{L}^2(\mathbb{R}^d)^2 \quad \|\Phi(f) - \Phi(h)\|_H \leq \|f - h\|, \quad (3)$$

where  $\|f\|$  denotes norm of  $f$  in Hilbert space.

This means that variation of output signal of operator is bounded by diffeomorphism of input signal. Invariant operator to transform  $Lf(x)$  of function  $f(x)$  (e.g., translation:  $L_c f(x) = f(x - c)$ ) is operator that satisfy the condition [33]:  $\Phi(Lf) = \Phi(f)$ . Output signal does not depend on transform of input signal. For example, modulus of Fourier transform is translation invariant, but is instable to deformations at high frequencies. Wavelet transform satisfies condition (2), but is not invariant to translations and rotations. Non-linear operator resolves this problem [33].

**Informative features.** Here we used Matlab implementation of Mallat scattering transform [36]. Wavelets with three degrees of freedom (translations along both axes and rotation) were used. Default setting of framework were applied. Variance of each coefficient was used as informative features [34]. Vector of features was of 701 elements length. High accuracy of classification of images of hand-written digits have been demonstrated [34].

## Appendix B

**Support Vector Machine (SVM).** SVM is a linear supervised learning classification algorithm. It requires training set of  $n$  points:  $(X_1, y_1), \dots, (X_n, y_n)$ , where  $X_i$  is  $p$ -dimensional vector of data points,  $y_i = \{1; -1\}$  is label that indicate class of the current data vector. The  $p$ -dimensional feature space is divided by hyperplane that is assigned by its normal vector  $\omega$  that should be found. It the task can be solved using the following equation:

$$\omega^T X_i + b = 0, \quad (4)$$

where superscript  $T$  denotes transpose.

Such classifier can margin only linearly separable data with no observation errors. If elements cannot be accurately divided on both side of plane, this leads to optimization problem. If classes are linearly nonseparable, so called kernel trick should be used. The approach is to map feature space to another of higher dimensionality, where the data can be separated by hyperplane. Finally, the task can be formulated [37]:

$$0.5 \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^l \xi_i \rightarrow \min_{\omega, b, \xi} \quad \text{subject to } y_i(\omega^T \varphi(X_i) + b) \geq 1 - \xi_i, \quad \xi_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, l, \quad (5)$$

where  $\varphi(X_i)$  maps  $X_i$  into a higher-dimensional space;

$C > 0$  is the regularization parameter.

The decision function is [37]:  $f = \text{sign}(\omega^T \varphi(X) + b)$ .

In SVM implementation [37], used in this paper, parameters of classifier  $C$  and kernel  $\gamma$  are selected automatically using “grid-search” and cross-validation (CV) [38]. In  $\nu$ -fold CV, training set is divided into  $\nu$  subsets. One of them is selected for testing, classifier has been trained using all remained. Accuracy of classification is compared in each case, the best classifier is selected. This procedure is needed to avoid overfitting problem. Accuracy of cross-validated classifiers is compared for each pair of values of  $C$  and  $\gamma$ . In this paper we trained and tested all classifiers at independent set. Quarter of full dataset is randomly selected and used as training set with 5-fold CV (if number of elements is enough).

Multi-class classification is implemented as “one-against-one” approach. In the case of  $k$  classes  $k(k-1)/2$  binary classifiers are constructed [37]. Each classification is considered to be vote, designated class is one having maximum votes [37].

**Accuracy.** Accuracy of binary classification is characterized by four values: true positive (TP), true negative (TN), false positive (FP, type I error), false negative (FN, type II error). Total accuracy can be expressed in various ways. Accuracy (6) is widely used and is estimated in this paper [39]:

$$\text{Accuracy} = (\text{TP} + \text{TN}) / (\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}). \quad (6)$$

Sense of this value is ratio between correctly classified samples and their total number. Overall accuracy estimated as mean of accuracies of all classes.

**Preprocessing of data.** Preliminary scaling of train and testing data is important for classification tasks [38]: it can prevent domination of features in greater numeric ranges and reduce difficulties during calculation. All features should be restricted to the similar range. Increasing of accuracy after scaling has been demonstrated [38]. The similar scaling coefficients should be used for training and testing set [38]. The simplest

solution is min-max: subtract minimum value and divide by maximum. The data is restricted to [0; 1] range. Standardization can reduce influence of noise and outliers: the feature mean is subtracted from each of them, then every feature is divided by its STD. In this paper we used median instead of mean that is additionally reduces sensitivity to outliers.

## REFERENCES

1. Ghafari, S.H. A Fault Diagnosis System for Rotary Machinery Supported by Rolling Element Bearings / S.H. Ghafari.
2. Jordan, M.A. Paper about orbit plots / M.A. Jordan // *Orbit*. – 1993.
3. Shirman, A.R. Practice of vibrational diagnosing and monitoring of equipment state/ A.R. Shirman, A.B. Solovyov. – Moscow : Nauka, 1996. – 276 p. (in Russian)
4. *Vibrational diagnosing / Ye.Z. Madorskiy [et al.] ; ed. G.Sh. Rosenberg*. – St. Petersburg : Federal State educational establishment, 2003. – 284 p. (in Russian)
5. Rusov V.A. Spectral vibrational diagnosing / V.A. Rusov. – Perm : Vibro-center LLC, 1996. – 215 p. (in Russian)
6. Rusov V.A. Diagnosing of defects of rotary equipment relying on vibrational signals / V.A. Rusov. – Perm, 2012. (in Russian)
7. Aherwar, A. Vibration analysis techniques for gearbox diagnostic: A review / A. Aherwar, S. Khalid // *Int J Adv Eng Technol*. – 2012. – Vol. 3. – P. 4–12.
8. Sait, A.S. A Review of Gearbox Condition Monitoring Based on vibration Analysis Techniques Diagnostics and Prognostics / A.S. Sait, Y.I. Sharaf-Eldeen // *Rotating Machinery, Structural Health Monitoring, Shock and Vibration, Volume 5 : Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series / Springer ; ed. T. Proulx*. – New York, NY, 2011. – P. 307–324.
9. Bechhoefer, E. A Review of Time Synchronous Average Algorithms / E. Bechhoefer, M. Kingsley. – 2009. – P. 10.
10. Zhang, X. A new time synchronous average method for variable speed operating condition gearbox / X. Zhang, G. Wen, T. Wu // *J. Vibroengineering*. – 2012. – Vol. 14, № 4. – P. 1766–1774.
11. Kechik, D. Segmented Autoregression Pitch Estimation Method / D. Kechik, I. Davydov // *2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM) : 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM)*. – 2020. – P. 1–6.
12. Al-Khazali, H.A.H. Geometrical and Graphical Representations Analysis of Lissajous Figures in Rotor Dynamic System / H.A.H. Al-Khazali // *IOSR J. Eng*. – 2012. – Vol. 02, № 05. – P. 971–978.
13. Gavrilov A.M. Studying of Lissajous figures for measuring of phase relations in spectrum of triharmonic signal / A.M. Gavrilov, R.O. Sitnikov // *University news. North-caucasian region. Technical sciences series*. – 2006. – No. 3. – P. 34–39. (in Russian)
14. Genkin, M.D. Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms / M.D. Genkin, A.G. Sokolova. – Moscow : Mashinostroenie, 1987. – 288 p. (In Russian)
15. Kosmach, N.V. Approach of vibrational diagnosing of rolling bearing / N.V. Kosmach, Yu.P. Aslamov. – 2020.
16. Rotating Machinery Diagnostics Using Deep Learning on Orbit Plot Images / H. Jeong [et al.] // *Procedia Manuf. : 44th North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 44, June 27 – July 1, 2016, Blacksburg, Virginia, United States*. – 2016. – Vol. 5. – P. 1107–1118.
17. Polar and Orbit Plot Analysis for Unbalance Identification in A Rotating System / A. Sen [et al.] // *IOSR J. Mech. Civ. Eng*. – 2017. – Vol. 14, № 03. – P. 49–56.
18. Orbit Analysis For Imbalance Fault Detection In Rotating Machinery / C. Costa [et al.] // *IOSR J. Electr. Electron. Eng. IOSR-JEEE*. – 2018. – Vol. 13. – P. 43–53.
19. Goldin, A.S. *Vibration of rotary machines / A.S. Goldin*. – Moscow : Mechanical engineering, 1999. – 344 p. (in Russian)
20. Buscarello, R.T. *Practical Solutions to Machinery and Maintenance Vibration Problems / R.T. Buscarello*. – Pub. Fifth edition. – Update international Inc., 2011. – 262 p.
21. Kechik, D.A. Vibrational signal power variance compensation during equipment speed mode changing / D.A. Kechik // *Doklady BGUIR*. – 2020. – Vol. 18, No 5. – P. 27–34.
22. Bently, D.E. *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics / D.E. Bently, C.T. Hatch*. – ASME, Bently Pressurized Bearing Company, 2002. – 726 p.
23. Scheffer, C. *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance / C. Scheffer, P. Girdhar*. – Elsevier, 2004. – 263 p.
24. Kechik, D. Shaft Misalignment Data for: Inter-component Phase Processing of Quasipolyharmonic Signals / D. Kechik, Y. Aslamov, I. Davydov. – 2020. – DOI: 10.17632/pt9mjcvghd.1.
25. Kechik, D. Shaft Angular Misalignment Dataset / D. Kechik, Y. Aslamov, I. Davydov. – 2021. – DOI: 10.17632/kf96jx9dzf.1.
26. Barkov, A.V. Monitoring and diagnostics of rotary equipment relying on its vibration / A.V. Barkov, N.A. Barkova, A.Yu. Azovtsev. – St. Petersburg : SMTU, 2000. – 159 p. (in Russian)
27. Barkov, A.V. *Vibrational diagnosing of machines and equipment. Analysis of vibration. Tutorial / Barkov, N.A. Barkova*. – St. Petersburg : SMTU, 2004. – 156 p. (in Russian)
28. Influence of changes in shaft rotational speed of rotary equipment on frequency-domain processing / Yu.P. Aslamov [et al.] // *Doklady BGUIR*. – 2018. – Vol. 113, No 13. – P. 13–18.
29. Voskoboynikov, Y.E. Filtration of signals and images: Fourier and wavelet algorithms (with examples in Mathcad) / Y.E. Voskoboynikov, A.V. Gochakov, A.B. Kolker. – Novosibirsk : NGASU (Sibstrin), 2010. – 188 p. (In Russian)
30. Kechik, D. Shaft orbits dataset: parallel and angular misalignment / D. Kechik, I. Davydov. – 2021. – DOI: 10.17632/8b33tx79wt.1.

31. Vorobiov, V.I. Inter-component phase processing of quasipolyharmonic signals / V.I. Vorobiov, D.A. Kechik, S.Y. Barysenka // Appl. Acoust. – 2021. – Vol. 177. – 14 p.
32. Barysenka, S.Y. Single-channel speech enhancement using inter-component phase relations / S.Y. Barysenka, V.I. Vorobiov, P. Mowlae // Speech Commun. – 2018. – Vol. 99. – P. 144–160.
33. Mallat, S. Group Invariant Scattering / S. Mallat // Commun. Pure Appl. Math. – 2012. – Vol. 65, № 10. – P. 1331–1398.
34. Bruna, J. Invariant Scattering Convolution Networks / J. Bruna, S. Mallat // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. – 2013. – Vol. 35, № 8. – P. 1872–1886.
35. Oyallon, E. Deep roto-translation scattering for object classification / E. Oyallon, S. Mallat // IEEE. – 2015. – P. 2865–2873.
36. ScatNet: a MATLAB Toolbox for Scattering Networks [Electronic resource]. – Mode of access: <https://github.com/scatnet/scatnet/blob/master/doc/impl/impl.pdf>. – Date of access: 11.10.2020.
37. Chang, C.-C. LIBSVM: A library for support vector machines / C.-C. Chang, C.-J. Lin // ACM Trans. Intell. Syst. Technol. – 2011. – Vol. 2, № 3. – 27 p.
38. Hsu, C.-W. A practical guide to support vector classification / C.-W. Hsu, C.-C. Chang, C.-J. Lin // Journal of Data Analysis and Information Processing. – 2003. – Vol. 8, № 2. – P. 16.
39. Tharwat, A. Classification assessment methods / A. Tharwat // Applied Computing and Informatics. – 2020. – Vol. 17, № 1. – P. 168–192.

Поступила 24.02.2021

### АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ ОРБИТ ВАЛА

**Д.А. КЕЧИК, И.Г. ДАВЫДОВ, И.В. ЛОЩИНИН, К.Д. ЖУКОВСКИЙ**

*В настоящей работе рассматривается классификация пространственных шаблонов орбиты вала. Опробовано применение современных методов обработки сигналов (метод спектральной интерференции и рассеивающее преобразование Малла) в задаче получения пространственных шаблонов, извлечения информативных признаков и классификации. Рассматривалась сильная зависимость пространственных шаблонов от флуктуаций параметров сигнала и непостоянство их формы. Оценивалась эффективность классификации пространственных шаблонов при использовании различных подходов в ходе численного эксперимента и натурального моделирования. Рассмотрена предобработка сигнала и извлеченных информативных признаков. Предложен подход к различению типа и степени выраженности расцентровки валов, основанный на частоте встречаемости различных классов пространственных шаблонов, показана эффективность подхода.*

**Ключевые слова:** *распознавание образов, частотная область, пространственная область, синхронное усреднение, фазовая обработка, вибрационная диагностика, рассеивающее преобразование, вейвлет-преобразование, сверточная сеть, машина на опорных векторах.*

УДК 004.93

## АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ МУЗЫКАЛЬНЫХ ОТРЫВКОВ, НОТ И АККОРДОВ

С.В. АНИСИМОВА, канд. физ.-мат. наук, доц. А.И. ГОЛОВАТЫЙ  
(Белорусский государственный университет, Минск)

Рассмотрены существующие методы распознавания музыки, их применимость к распознаванию акапельного пения, а также способы их улучшения, одним из которых является транскрибирование звука в музыкальную нотацию. Предложены методы выделения нот и аккордов из звукового ряда.

**Ключевые слова:** распознавание музыки, распознавание акапельного пения, выделение нот, выделение аккордов.

Большинство современных приложений для распознавания музыки не умеют сопоставлять акапельное исполнение и оригинал записи. Изучение алгоритма распознавания одного из самых известных приложений, Shazam, дает возможность понять, почему так происходит.

Shazam Entertainment, Ltd была основана в 1999 г. Тогда же появилась идея создания сервиса для распознавания мелодий. На тот момент компания преследовала следующую цель: создать алгоритм, способный распознать мелодию, записанную при помощи простейшего микрофона телефона, отделяя ее от шума. Проблема заключалась в том, что на тот момент никто не делал ничего подобного. В первые годы развития компании, чтобы воспользоваться их приложением, необходимо было позвонить на короткий номер, повернуть телефон микрофоном к источнику звука и ожидать СМС с названием песни и исполнителем. В работе [5] в 2003 г. был описан алгоритм распознавания мелодий, который использует Shazam.

**Принцип работы алгоритма «Shazam».** Сначала записанный трек, который необходимо распознать проходит процедуру, в процессе которой извлекаются хеши. Полученный «отпечаток» мелодии сравнивается с базой данных, затем происходит уточнение хешей, процедура повторяется. Стоит отметить, что в базе данных аудиофайлы уже хранятся в хешированном виде. Выделение хешей включает в себя следующие этапы: на вход алгоритм получает частотно-мощностную временную зависимость; в ней он выделяет пики – наиболее «сильные» (англ. *robustness*) частоты среди шума и линейно аппроксимирует их по принципу суперпозиции; точка рассматривается как математическая с единственной парой координат. Точка является подозрительной на локальный экстремум, если она обладает большей энергией, чем точки в окрестности. Алгоритм составляет так называемую карту «созвездий» – график, на котором отмечены только локальные экстремумы (рисунок 1). В таком виде хранить записанную мелодию гораздо проще, это занимает меньше объема. Кроме того, пользователь записывает только небольшой отрывок аудио, а не всю песню, запись которой вдобавок зачастую изобилует шумами. Проблему шумов также необходимо было решить при создании алгоритма.

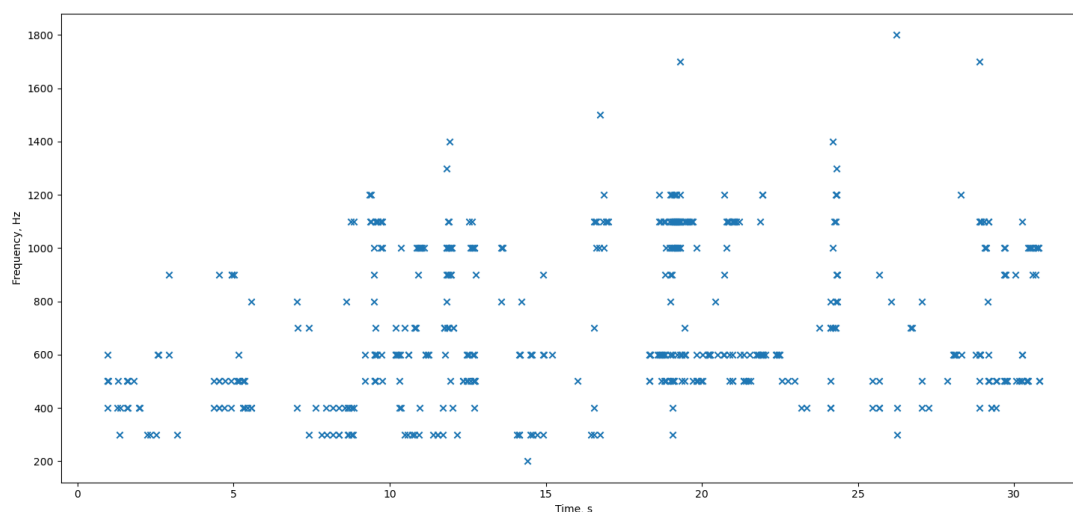


Рисунок 1. – Карта созвездий

Разработчики алгоритма пришли к достаточно простому решению. Они стали выделять точки – «якоря». Каждому якорю ставится в соответствие своя таргетная зона. Каждая точка внутри таргетной зоны

последовательно сопоставляется со своим якорем. Такую пару можно описать двумя частотами (якоря и точки внутри зоны) и временным интервалом между ними. Таким образом и происходит процесс хеширования. Данный алгоритм будем называть «быстрым комбинаторным хешированием», как в оригинальной статье «Fast combinatorial hashing» [5]. Также стоит упомянуть, что каждая строка в хеш-таблице может быть помещена в 32-битное беззнаковое число, что позволяет существенно сэкономить дисковое пространство.

Стоит отметить, что, конечно же, исходного кода самого Shazam в открытом доступе нет, и нет оснований достоверно утверждать, что в ходе выполнения практической части его удалось воспроизвести абсолютно точно. Однако Shazam здесь рассматривался не как конкретная разработка компании Apple Inc, а как «черный ящик», работающий по принципу, описанному выше.

Алгоритм Shazam не может распознать мелодию по отпечатку, получаемому из акапельной записи, так как количество локальных экстремальных точек в отпечатке оригинала будет сильно превосходить их количество в отпечатке напева. Исходя из этого, нами была выдвинута гипотеза о том, что, если применять алгоритм быстрого комбинаторного хеширования в диапазоне человеческого голоса, он должен работать корректно. На практике такой подход показал относительно хорошие результаты по сравнению с применением алгоритма без обрезки.

**Алгоритм хеширования.** В разработанном нами алгоритме хеширования каждая точка на «карте созвездий» является парой ключ-значение – время-частота экстремальных точек, взятых с определенным пороговым значением изменения энергетической характеристики звука (его громкости). Пороговым значением является выбранная разница уровня громкости сигнала между соседними точками в плоскости время – частота, которая считается достаточной для того, чтобы взять точку как экстремальную. С линейным увеличением порогового значения объем занимаемой одной записью памяти уменьшается экспоненциально. Сама «карта созвездий» представляет из себя матрицу булевых переменных. Поиск экстремумов в функции двух переменных был реализован с помощью свойства «diff» класса «DataFrame» библиотеки pandas (открытой python-библиотеки).

**Поисковый алгоритм.** Принцип работы поискового алгоритма: после получения хеш-таблиц оригиналов из базы данных и напетога фрагмента данные в каждой хеш-таблице покрываются объектами класса «Target», которые обладают следующими свойствами:

1) имеют размер 400 Гц на 5 секунд;  
2) имеют свойство «target\_property», являющееся ассоциативным массивом, или хеш-таблицей, в которой хранятся хеши, сформированные как  $df : dt$ , где  $df$  и  $dt$  – разницы частоты и времени между всеми точками объекта типа «Target» и точкой, обладающей наименьшей частотой и временем соответственно (т.е. точкой, имеющей наименьшее расстояние до точки отсчета в системе координат);

3) имеют перегрузку оператора «==». Для перегрузки оператора «==» необходимо выбрать два коэффициента: допустимое отклонение  $dt$  для того, чтобы считать два хеша одинаковыми –  $k_1$ ; необходимое количество совпадающих хешей для того, чтобы считать два объекта типа «Target» одинаковыми –  $k_2$ . Степень схожести записей определяется отношением количества найденных равных объектов к их общему числу в капельной записи. Наибольшей схожестью в среднем являлась схожесть порядка 30–40%. Реализация приведена в [8; 9].

Однако результаты исследований данного алгоритма, которые описаны в [1] были все равно недостаточно хороши, даже с учетом «улучшения» за счет обрезки частотного диапазона до области человеческого голоса, поэтому необходимо было искать другие пути улучшения. Было замечено, что те записи, где тембры голосов акапельного и оригинального исполнителей сильно различались, практически не распознавались. Очевидно, эта особенность является одним из слабых мест этого алгоритма, поэтому оптимальнее было бы построить алгоритм, никак не зависящий от частотного диапазона певца. При этом очевидно, что если исполнитель не фальшивит, то он будет исполнять те же ноты, что и в оригинальной записи, но в другой октаве. Кроме того, исполнитель может петь быстрее, либо медленнее оригинала, однако отношение временных интервалов должно быть одинаковым для сохранения правильного ритмического рисунка композиции. Так, была выдвинута гипотеза о том, что если транскрибировать оригинал и акапельную запись в музыкальную нотацию и проводить сравнение по ним, то точность распознавания может быть повышена.

**Распознавание нот.** Задача распознавания отдельно стоящих нот сводится к двум подзадачам: непосредственному распознаванию ноты и распознаванию нот во временном интервале, т.е. отделении одной ноты от другой.

Алгоритм распознавания отдельно стоящей ноты достаточно прост. На первом этапе выделяется спектр звука с помощью преобразования Фурье (рисунок 2, а). Следующим шагом выделяются точки, подозрительные на локальные экстремумы (в данном случае интересуют только максимумы функции). Для этого реализована функция, в которой для каждой исследуемой точки вычисляется разница с двумя ее соседями. Если оба эти значения положительны, то в список записывается большее из двух значений. После этого выбирается первый экстремум, для которого значение в списке больше определенного, эмпирически выбранного значения толерантности. Далее берется полученное значение частоты и по нему определяется нота.

Чтобы не хранить весь список нот, а также чтобы в дальнейшем иметь возможность сличать одну и ту же мелодию напетую в разных диапазонах, т.е. не зависеть от октавы в которой исполнена нота, она рассчитывается относительно 0-й октавы, то есть субконтроктавы. Поэтому в памяти хранится только небольшой ассоциативный массив на 7 нот:  $\text{note\_dict} = \{ 'E': 20.61, 'F': 21.82, 'G': 24.5, 'A': 27.5, 'B': 30.87, 'C': 32.7, 'D': 36.95 \}$ . Полученная на предыдущем этапе частота делится последовательно на каждое из этих чисел без остатка. Для того чтобы определить, какая именно нота попала на вход алгоритма, остается лишь определить какое из значений после деления является степенью двойки. Для этого достаточно вычислить результат побитовой операции «И» для полученного значения и для значения, на единицу меньшего, чем полученное. Результат применения оператора & будет равен 0 только для степени двойки и нуля.

Так же, вероятно всего, для различных инструментов из-за особенностей их конструкций и звучания необходимо подбирать оконную функцию для выделения спектра. Например, для гитары такой функцией оказалась функция Ханна

$$w[n] = w_0 \left( \frac{L}{N} \left( n - \frac{N}{2} \right) \right) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{2\pi n}{N} \right) \right] = \sin^2 \left( \frac{\pi n}{N} \right), \quad 0 \leq n \leq N.$$

На рисунке 2 видно, какой эффект привносит использование функции Ханна по сравнению со спектром, полученным без использования какой-либо оконной функции.

Этот механизм можно также применять для распознавания идущих подряд нескольких разных нот. Однако в этом случае уже просто выделить спектр сигнала на всем аудиофайле не получится. Для того чтобы понять, как разрешить данную проблему необходимо было рассмотреть амплитудно-временную зависимость, которую несложно получить, так как изначально аудиофайл считывается на входе в алгоритм функцией, которая сохраняет данные именно в таком формате. Нетрудно понять, что для отделения одной ноты от другой необходимо просто выделить сигнал среди шума. Для простоты реализации было принято, что сигнал можно назвать полезным, если он громче среднего по аудиофайлу на протяжении четверти секунды. Однако эти приближения нуждаются в коррекции и более тщательном подборе при анализе «живых данных».

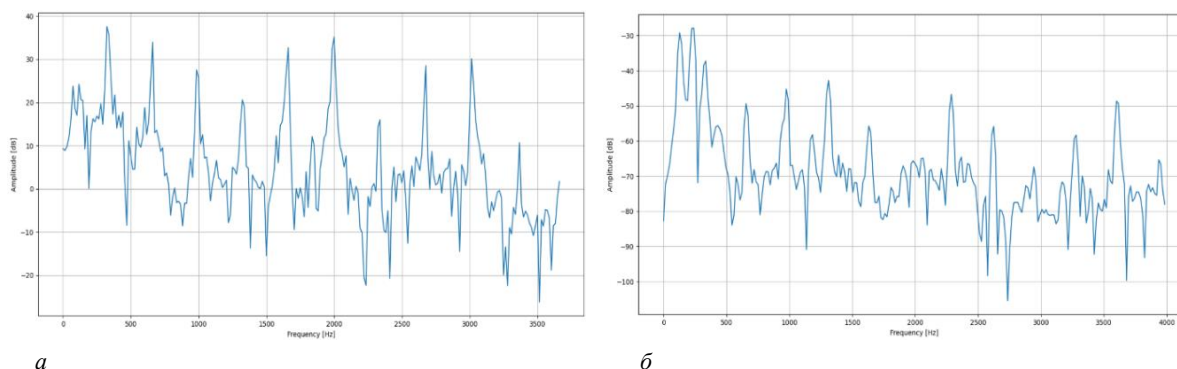


Рисунок 2. – Спектр ноты E4 без применения оконной функции (а) и с использованием функции Ханна для выделения (б)

**Распознавание аккордов.** При написании музыки используются не только одиночные ноты, но и аккорды, состоящие одновременно из нескольких нот, которые воспринимаются человеком как единый звук. Звук, сопоставляемый с определенным аккордом, является суммой гармоник. В реальности каждая последующая гармоника звучит тише предыдущей и хуже различима. Частота звука той или иной ноты определяется по ее основной гармонике.

Большинство современных алгоритмов транскрипции аккордов состоит из двух основных этапов. На первом этапе аудиозапись преобразуется в последовательность признаков векторов. На следующем этапе, используя шаблоны, каждый вектор признаков ставится в соответствие каждому аккорду из заданного пространства аккордов. Существует множество методик сопоставления с образцов на основе шаблонов, скрытых моделей Маркова или более сложных Байесовских сетях. Идея данного подхода заключается в том, чтобы заранее подготовить набор шаблонов, соответствующих набору аккордов в звуковом ряде. Интуитивно каждый шаблон в наборе – это прототип вектора цветности, который соответствует одному аккорду. На вход алгоритма подается звуковая дорожка, в которой, как и в алгоритме «Shazam», выделяются экстремальные точки. Однако для распознавания не берутся все точки, попавшие в карту созвездий, как в предыдущем алгоритме. К распознаванию берутся только те частоты, которые осциллируют вокруг одного значения некоторый промежуток времени. Каждой такой частоте ставится в соответствие с шаблоном нота.

Алгоритмы шаблонного распознавания основаны на сопоставлении конкретного аккорда из заданного аккордного пространства с входным вектором особенностей с помощью минимизации расстояния между векторами. Такую задачу можно решать с помощью алгоритмов кластеризации.

При распознавании нот и аккордов очень важна точность получаемых значений частот, так как один аккорд может состоять из нот с небольшой разницей в частотах. Поэтому для реализации нового алгоритма было принято решение написать выделение спектра, основываясь на быстром преобразовании Фурье, с возможностью самостоятельно задавать количество компонент разложения и получать при этом возможность исследовать влияние применения различных оконных функций.

В общем случае аккорд ведет себя схожим образом с нотами. Функция, описывающая наиболее «сильную» компоненту звука аккорда, также является периодической. Однако, рассматривая спектрограмму аккорда, был замечен интересный эффект: энергетическая мощность гармоник изменяется по какому-то периодическому закону, как при генерации аккорда с помощью программных средств пакета Wolfram Mathematica 11.3, так и при воспроизведении аккорда на гитаре. Это происходит из-за того, что при сложении нескольких близких по частоте волн наблюдается эффект биения.

Биения возникают при сложении нескольких волн одинакового направления, мало отличающихся по частоте [3]:

$$\begin{aligned}x_1 &= a \cos \omega t, \\x_2 &= a \cos(\omega + d\omega)t; \\x &= x_1 + x_2 = \left(2a \cos \frac{d\omega}{2} t\right) \cos \omega t.\end{aligned}$$

Результирующая частота звука рассчитывается как среднее частот нот. На рисунках 3, 4 можно увидеть результирующую функцию суммы периодических функций, составляющих основные гармоники нот аккорда С.

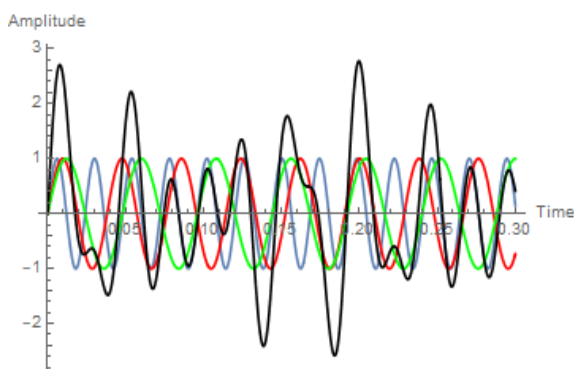


Рисунок 3. – График периодических функций основных гармоник нот аккорда С и их суммы

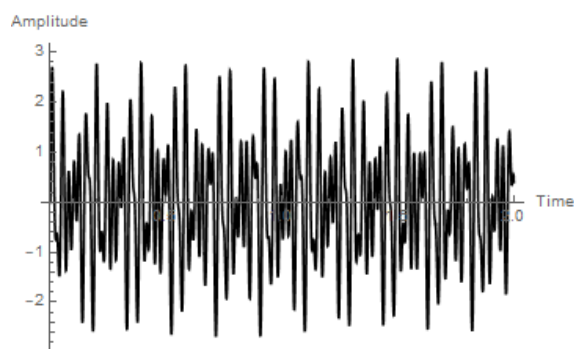


Рисунок 4. – График суммы основных гармоник нот аккорда С

Из этого следует, что при реализации алгоритма не удастся выделять три ноты отдельно и по ним опознавать аккорд. Решением данной проблемы является создание базы признаков аккордов или распознавание аккорда по его результирующей частоте.

На практике оказалось, что оба эти метода применимы. Действительно, иногда в аккорде удается выделить результирующую частоту, однако данный метод нестабилен и подвержен влияниям шумов, а также на его результативность сильно влияет выбранное количество компонент разложения Фурье.

Другим эффективным методом является создание шаблонов характеристик интересующих аккордов. Способов выделения векторов особенностей существует очень много. В работе [6] доказывалась эффективность выделения векторов цветности. Кроме того, можно предложить еще два варианта создания шаблона: создание «звездной карты» по методу «быстрого комбинаторного хеширования», которое было описано в работе [5], и создание вектора особенностей аккордов по методу, рассмотренному во время анализа распознавания отдельных нот с дополнительными оговорками. Если для распознавания отдельной ноты достаточно выделить одну первую основную гармонику, то есть глобальный экстремум, то для распознавания аккордов необходимо было выделить 6–10 локальных экстремумов спектра.

Однако эти точки также не могут быть гарантированно такими же, как и в векторе свойств. Инструмент, на котором исполнен аккорд, может усиливать те или иные частоты в зависимости от свойств его резонаторов, а также свой вклад может вносить записывающее оборудование. Кроме того, сам исполнитель может сыграть аккорд недостаточно чисто. Поэтому из имеющихся эталонных векторов выделяются наиболее схожие компоненты и уже относительно них вычисляется расстояние до изучаемого вектора. Необходимо отметить, что данный алгоритм является устойчивым к смещению диапазона исполнения, так как опирается не на конкретные частные значения частот, а на Евклидову метрику.



**Заключение.** В заключение можно сказать, что при доработке методика распознавания нот и аккордов может быть применена для распознавания акапельного пения. Кроме того, исходя из исследований алгоритма «Shazam» можно сделать вывод, что обрезка частотного диапазона оригинала до диапазона человеческого голоса (до 4000 Гц) может помочь в распознавании музыки. Немаловажным шагом в разработке алгоритма распознавания акапельного пения стал анализ составляющих музыкального ряда, а также методов работы с ними. На данный момент разработаны алгоритмы выделения нот и аккордов, которые необходимы для создания алгоритма распознавания мелодий на основе музыкальной нотации. Для успешной разработки такого алгоритма также необходимо решение для распознавания аккордов среди нот и наоборот.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимова, С.В. Алгоритм распознавания музыкальных композиций по вокальному исполнению / С.В. Анисимова, А.И. Головатый, И.А. Адуцкевич // Информационные радиосистемы и радиотехнологии : материалы респ. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 окт. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В.А. Богущ [и др.]. – Минск, 2020. – С. 185–186.
2. Мефферт, Б. Инструменты обработки сигналов – основы, примеры применения и задачи / Б. Мефферт, О. Хохмут. – Берлин : HUB, 2019. – 320 с.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики : в 3 т. / И.В. Савельев. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1970. – Т. 2 : Механика, колебания и волны, молекулярная физика. – 517 с.
4. Dan Li. Design of far field beamforming problem by window function / Dan Li, Xiaofen Tan, Zhiguo Feng // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 677, iss. 4.
5. Li-Chun Wang. An Industrial-Strength Audio Search Algorithm [Electronic resource] / Li-Chun Wang // ISMIR 2003 : Proceedings of 4th International Conference on Music Information Retrieval, Baltimore, Maryland, USA, October 27–30, 2003. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/220723446\\_An\\_Industrial\\_Strength\\_Audio\\_Search\\_Algorithm](https://www.researchgate.net/publication/220723446_An_Industrial_Strength_Audio_Search_Algorithm). – Date of access: 17.05.2020.
6. Analyzing Chroma Feature Types for Automated Chord Recognition / Nanzhu Jiang [et al.] // Proceedings of the AES 42nd International Conference: Semantic Audio. – Ilmenau, Germany : AES, 2011. – P. 285–294.
7. Веб-сервис для хостинга IT проектов [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://github.com/Allen-Downey/ThinkDSP>. – Дата доступа: 14.06.2013.
8. Веб-сервис для хостинга IT проектов [Электронный ресурс] – Режим доступа [https://github.com/sofiaandrat/soundAnalyze\\_termPaper2020](https://github.com/sofiaandrat/soundAnalyze_termPaper2020). – Дата доступа: 17.05.2020.
9. Веб-сервис для хостинга IT проектов [Электронный ресурс] – Режим доступа [https://github.com/sofiaandrat/Finding\\_termPaper2020](https://github.com/sofiaandrat/Finding_termPaper2020). – Дата доступа: 17.05.2020.

Поступила 30.04.2021

#### ALGORITHMS TO RECOGNIZE MUSICAL EXCERPTS, NOTES AND CHORDS

S. ANISIMOVA, A. HALAVATYI

*The paper discusses existing methods of music recognition, its adaptability to recognition of acapella singing and methods of its improvement. One of the improvement methods is sound transcription to musical notation. Methods of note and accord extraction from sound series were proposed.*

**Keywords:** Music recognition, acapella singing recognition, extraction of notes, extraction of chords.

УДК 620.1.08

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ  
НА ОСНОВЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ**

*канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ, д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ,  
канд. техн. наук, доц. Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ, Т.М. ГЛУХОВА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Предлагается метод моделирования трещинообразования в железобетонных конструкциях, основанный на интеграции нелинейной деформационной модели железобетонного элемента по наклонному сечению, и, как частный случай, сечению нормальному к продольной оси элемента, и метода конечных элементов. В рамках такой интеграции появляется возможность учесть не только изменение жесткостей конечных элементов под действием нагрузки и соответствующее перераспределение внутренних усилий, но и перераспределение напряжений по сечениям, изменение поля углов поворота главных напряжений в процессе распространения нормальных и наклонных трещин. В работе предложен метод комбинированных стратегий, позволяющий эффективно решать систему уравнений равновесия и совместности деформаций расчетной модели.*

**Ключевые слова:** *метод конечных элементов, пластические деформации, наклонные трещины, процесс трещинообразования, перераспределение усилий, изгибная и продольная жесткости.*

**Введение.** Метод конечных элементов (МКЭ) устойчиво вошел в практику расчетов строительных конструкций. В настоящее время существует огромное количество программных продуктов конечно-элементного анализа, разработаны высокоточные стержневые, пластинчатые, объемные конечные элементы, конечные элементы, моделирующие пластические шарниры, элементы с меняющимся поперечным сечением и т.д. МКЭ имеет насыщенную историю, которая началась с работ Дж.У. Рэлея и В. Ритца и получила развитие в работах И.Г. Бубнова, Б.Г. Галеркина, Л.В. Контровича, О. Зенкевича, Р. Галлагера, И.Чанга, А.В. Перельмутера, В.И. Сливкера и многих других.

Для моделирования напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, а также моделирования важного для железобетонных конструкций процесса трещинообразования существует несколько основных подходов. Прежде всего, это упрощенные инженерные методы поиска критических сечений [1]. Недостатком данного подхода является невозможность учета перераспределения усилий в процессах трещинообразования, необходимость пересмотра упрощенных формул при изменении схем армирования, работа с ограниченным рядом простых симметричных сечений. Преимуществом является простота расчетов и достаточная точность.

Также все большую популярность приобретают модели на основе сеток и объемных конечных элементов [2–4]. Преимущества данного подхода очевидны. Появляется возможность моделирования произвольной формы поперечного сечения и армирования, в том числе предварительно напряженной железобетонной конструкции, верификации и эффективной визуализации результатов расчета. Основными недостатками данного подхода являются высокая вычислительная сложность и ресурсоемкость, сложность перехода от конструкции сплошного поперечного сечения к конструкции, состоящей из отдельных блоков, разделенных трещинами, необходимость существенного сгущения сетки в области априорного существования трещин.

**Основная часть.** Предлагаемый метод основан на использовании МКЭ для стержневых систем (в том числе и для учета пластических свойств материалов) и нелинейных расчетных моделей сечений железобетонного элемента в сложном напряженно-деформированном состоянии при одновременном воздействии продольной силы, изгибающего момента и перерезывающей силы. Данный метод позволяет получить параметры напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента: распределение сдвиговых деформаций, главных сжимающих и растягивающих деформаций и напряжений, поле углов поворота направлений главных сжимающих/растягивающих напряжений, визуализировать процесс перераспределения усилий в конструкции, связанный с изменением соответствующих жесткостей конечного элемента, а также влияние процесса перераспределения усилий на процесс трещинообразования.

Нелинейные расчетные модели железобетонного элемента по сечению, наклонному к его продольной оси, и алгоритмы решения систем интегральных сингулярных уравнений исследованы нами в течение последних 10 лет. Они основаны на модифицированной теории полей сжатия, разработанной канадскими учеными Майклом Коллинзом, Фрэнком Векью и Денисом Митчелом. MCFT (Modified Compression Field Theory) вошла в строительные нормы и правила Канады CSA-A23.3 1994 (CSA1994) [5–8].

Система уравнений исследуемой нами модели сложно-деформированного состояния сечения железобетонного элемента представлена в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} M_y = -\iint_C \sigma(\varepsilon(x, y))(y - y_o) dx dy + N(y_{oe} - y_o) \\ M_x = -\iint_C \sigma(\varepsilon(x, y))(x - x_o) dx dy + N(x_{oe} - x_o) \\ N = \iint_C \sigma(\varepsilon(x, y)) dx dy \\ V = \iint_C \tau(x, y) dx dy \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $\sigma(\varepsilon(x, y))$  – нормальные напряжения в бетоне или арматуре,  $\varepsilon(x, y)$  – продольные деформации бетона или арматуры (проекция на ось  $x$  суперпозиции главных сжимающих и главных растягивающих деформаций, полученная с учетом поворота элементарных площадок под действием перерезывающей силы);

$x_o$  и  $y_o$  – расстояние от центра изгиба сечения, нейтральной точки, до осей  $x$  и  $y$  соответственно;

$x_{oe}$  и  $y_{oe}$  – расстояние от места приложения продольного усилия до осей  $x$  и  $y$  соответственно;

$N$  – продольная сила от действия внешней нагрузки;

$M_x, M_y$  – изгибающие моменты, действующие в плоскостях  $xz, yz$ ;

$\tau(x, y)$  – касательные напряжения в бетоне.

Уравнения совместности деформаций выглядят следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \sigma_{c2} \cos^2 \alpha + \sigma_{c1} \sin^2 \alpha + \rho_x \sigma_{sx}, \\ \sigma_y = \sigma_{c2} \sin^2 \alpha + \sigma_{c1} \cos^2 \alpha + \rho_y \sigma_{sy}, \\ \tau_{xy} = (-\sigma_{c2} + \sigma_{c1}) \sin \alpha \cdot \cos \alpha; \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \varepsilon_{c2} \cos^2 \alpha + \varepsilon_{c1} \sin^2 \alpha, \\ \varepsilon_y = \varepsilon_{c2} \sin^2 \alpha + \varepsilon_{c1} \cos^2 \alpha, \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} = (-\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{c1}) \sin \alpha \cdot \cos \alpha, \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $\sigma_{cx}, \sigma_{cy}, \sigma_{c1}, \sigma_{c2}, \tau_{xy}$  – напряжения в бетоне;

$\sigma_{sx}, \sigma_{sy}$  – напряжения в продольной и поперечной арматуре;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  – относительные деформации элементарного участка;

$\theta$  – угол, определяющий положение наклонных трещин и главных напряжений.

Для определения распределения касательных напряжений, обеспечивающих равновесие по перерезывающей силе, нами использовался метод двух сечений [7]. Особенности данной математической модели и алгоритм решения системы уравнений равновесия и совместности деформаций подробно описаны в диссертации Е.Д. Лазовского [9] и в работе Т.М. Глухой [10].

Алгоритм определения напряженно деформированного состояния элементов под воздействием среза с изгибом и продольным сжатием строится нами по следующей схеме:

- 1) задается начальное распределение касательных деформаций;
- 2) по методу двух сечений [7] определяется распределение касательные напряжений, обеспечивающее равновесие по перерезывающей силе;
- 3) для заданного изгибающего момента и усилия продольного сжатия/растяжения находится распределение продольных деформаций;
- 4) по полученным распределениям продольных деформаций разработанным нами методом комбинированных стратегий находится такое распределение деформаций, при котором главные сжимающие напряжения, определенные диаграммным методом, равны значениям, определенным по кругам Мора;
- 5) имея распределения всех составляющих тензора деформаций, определяются внутренние усилия, возникающие в сечении, нормальном к продольной оси элемента;
- 6) если определенные внутренние усилия не удовлетворяют уравнениям равновесия, то соответствующим образом корректируется искомое распределение деформаций и выполняется переход к пункту 2, иначе – успешное завершение итерационного процесса.

Пункт 4 алгоритма является ключевым для решения системы уравнений. Для понимания задачи, разрешаемой в пункте 4, приведем математическое описание зависимости главных сжимающих напряжений, определенных по диаграммам и кругу Мора, с заданным распределением продольных, главных и касательных деформаций.

Угол наклона осей главных напряжений по отношению к продольной оси определяется по формуле

$$\tan \theta_i = \frac{-b_i s \tau_i + \sqrt{4A_{Sw} E_S (\varepsilon_{1,i} - \varepsilon_{x,i}) \cdot (A_{Sw} \varepsilon_{1,i} E_S + \frac{b_i \cdot s \cdot f_{ct,i}}{1 + \sqrt{200 \cdot \varepsilon_{1,i}})} + b_i^2 s^2 \tau_i^2}}{2 \cdot A_{Sw} E_S (\varepsilon_{1,i} - \varepsilon_{x,i})}, \text{ если } \varepsilon_{1,i} > \varepsilon_{cr};$$

$$\tan \theta_i = \frac{-b_i s \tau_i + \sqrt{4A_{Sw} E_S (\varepsilon_{1,i} - \varepsilon_{x,i}) \cdot (A_{Sw} \varepsilon_{1,i} E_S + b_i \cdot \varepsilon_{1,i} \cdot s \cdot E_{c,i}) + b_i^2 s^2 \tau_i^2}}{2 \cdot A_{Sw} E_S (\varepsilon_{1,i} - \varepsilon_{x,i})}, \text{ если } \varepsilon_{1,i} < \varepsilon_{cr}.$$

Относительные деформации по направлению главных сжимающих напряжений

$$\varepsilon_{2,i} = \varepsilon_{x,i} (1 + \tan^2 \theta_i) - \varepsilon_{1,i} \cdot \tan^2 \theta_i.$$

Относительные деформации по направлению оси y

$$\varepsilon_{y,i} = \frac{\varepsilon_{1,i} + \varepsilon_{2,i} \cdot \tan^2 \theta_i}{1 + \tan^2 \theta_i}.$$

Напряжения в поперечной арматуре

$$\sigma_{Sy,i} = \varepsilon_{y,i} \cdot E_S.$$

Главные растягивающие напряжения в бетоне

$$\sigma_{c1,i} = \varepsilon_{1,i} \cdot E_c, \text{ если } \varepsilon_{1,i} < \varepsilon_{cr};$$

$$\sigma_{c1,i} = \frac{f_{ct}}{1 + \sqrt{200 \cdot \varepsilon_1}}, \text{ если } \varepsilon_{1,i} < \varepsilon_{cr}.$$

Касательные напряжения, способные передаться через наклонную трещину,

$$\tau_{ci} = \frac{0,18 \cdot \sqrt{f_c'}}{0,3 + \frac{24 \cdot w}{a_{\max} + 16}}.$$

Ограничиваем значение главных растягивающих напряжений в бетоне

$$\sigma_{c1,i} = \sigma_{c1,i}, \text{ если } \sigma_{c1,i} \leq \tau_{ci} \cdot \tan \theta;$$

$$\sigma_{c1,i} = \tau_{ci} \cdot \tan \theta, \text{ если } \sigma_{c1,i} > \tau_{ci} \cdot \tan \theta.$$

Главные сжимающие напряжения в бетоне по измененной диаграмме деформирования бетона с учетом двухосного напряженного состояния

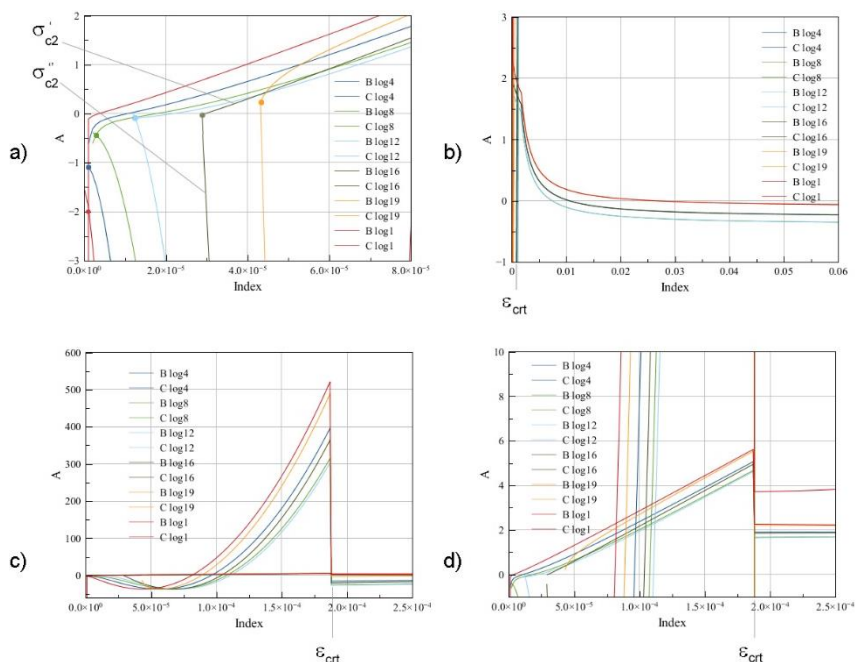
$$(\sigma_{c2,i})' = \sigma_{c2\max,i} \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{\varepsilon_{2,i}}{-0,002} \right) - \left( \frac{\varepsilon_{2,i}}{-0,002} \right)^2 \right].$$

Главные сжимающие напряжения в бетоне из кругов Мора для напряжений

$$(\sigma_{c2,i})'' = \tau_i \cdot \left( \tan \theta + \frac{1}{\tan \theta} \right) - \sigma_{c1,i}.$$

В модели присутствует несколько точек разрыва поверхности решения для главных сжимающих напряжений. Во-первых, наличие области в окрестности нуля, для которой значение является невычислимым (точка разрыва второго рода). Во-вторых, характеристическим значением продольной деформации на растяжение является предельная деформация на растяжение  $\varepsilon_{cr}$ , определяющая скачкообразное изменение напряжения в результате трещинообразования (точка разрыва первого рода), выражающееся в замене математического определения угла наклона направления главных напряжений.

Проиллюстрируем данную ситуацию на семействе графиков (рисунок 1). Наглядно видно, что для определения границ области, в которой локализовано решение, необходимо применять различные стратегии поиска границ и решения как такового.



*a* – точки совпадения значений главных сжимающих напряжений, определенных диаграммным методом и геометрическим способом по кругу Мора; *b* – характер зависимости при больших значениях деформаций, соответствующих главным сжимающим напряжениям; *c* – скачкообразное изменение напряжения при достижении деформацией значения  $\epsilon_{crit}$ ; *d* – аналогичный скачок для напряжений, определенных по кругу Мора

Рисунок 1. – Зависимость главных сжимающих напряжений от деформаций при заданных распределениях продольных и сдвиговых деформаций для значений изгибающего момента до момента образования трещины

Для «больших» изгибающих моментов характер зависимости меняется. Точки решения «уходят» в область, значительно превышающую точку разрыва, что видно из рисунка 2.

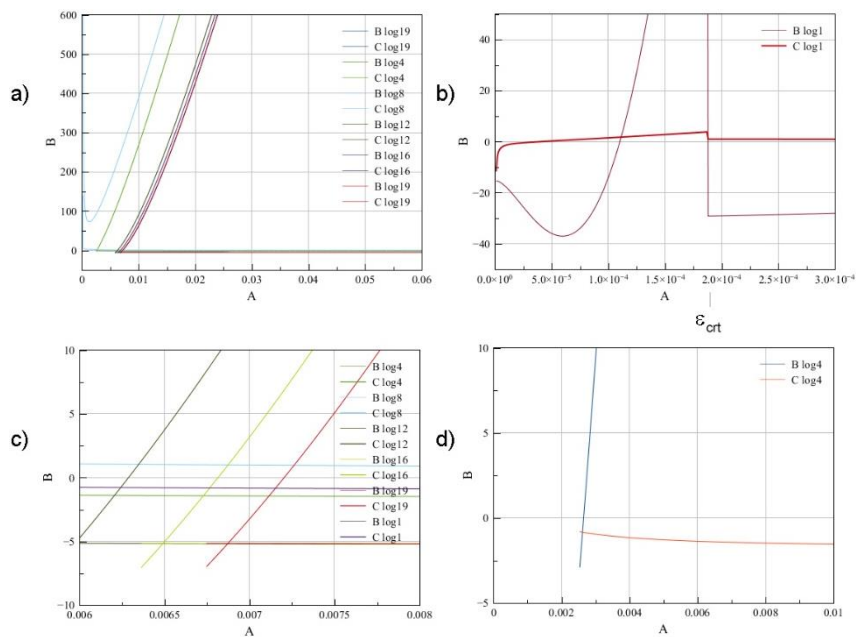


Рисунок 2. – Зависимость главных сжимающих напряжений от деформаций при заданных распределениях продольных и сдвиговых деформаций для «больших» значений изгибающего момента

С учетом выявленных особенностей математической модели разработан алгоритм поиска решения для задачи определения распределения деформаций, соответствующих главным сжимающим напряжениям, комбинирующий различные стратегии поиска границ области решения и решения как такового:

- 1) методом последовательных приближений ищем нижнюю границу области определения функции главных сжимающих напряжений, определяемых из круга Мора;
- 2) если найденная нижняя граница меньше  $\varepsilon_{crit}$ , то априорная верхняя граница принимается равной  $\varepsilon_{crit}$ , иначе принимается как максимально возможная сжимающая деформация (0,06).
- 3) методом дихотомии корректируем верхнюю границу области решения (область отрицательных значений) главных сжимающих напряжений, определяемых диаграммным методом;
- 4) методом секущих в пределах определенной области решения ищем точку совпадения искомым напряжений.

Данный алгоритм реализован нами на языке программирования C++. Сравнительные тесты с канадским программным комплексом Response-2000 [11] университета Торонто, показал, что предложенный нами алгоритм обладает более высокой скоростью сходимости и точностью расчета, дает более стабильные результаты расчета (отсутствие «выколотых» точек на графиках распределений) на всей области определения.

С целью реализации предложенной конечно-элементной модели в рамках исследования разработана библиотека функций по формированию, расчету и визуализации результатов расчета пространственных стержневых конструкций, построенных на сжато-изогнутых стержневых конечных элементах. Для плоского случая с 6 степенями свободы матрица жесткости и вектор реакций имеет следующий вид:

$$[k]_j = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EJ}{l^3} & \frac{6EJ}{l^2} & 0 & -\frac{12EJ}{l^3} & \frac{6EJ}{l^2} \\ 0 & \frac{6EJ}{l^2} & \frac{4EJ}{l} & 0 & -\frac{6EJ}{l^2} & \frac{2EJ}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EJ}{l^3} & -\frac{6EJ}{l^2} & 0 & \frac{12EJ}{l^3} & -\frac{6EJ}{l^2} \\ 0 & \frac{6EJ}{l^2} & \frac{2EJ}{l} & 0 & -\frac{6EJ}{l^2} & \frac{4EJ}{l} \end{bmatrix}, \{f\}_j = \begin{Bmatrix} \frac{q_x L}{2} \\ \frac{q_y L}{2} \\ q_y L^2 \\ -\frac{12}{q_x L} \\ \frac{q_x L}{2} \\ \frac{q_y L}{2} \\ \frac{q_y L^2}{12} \end{Bmatrix}, \{q\}_j = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix},$$

где  $EJ$  – изгибная жесткость сечения;

$EA$  – продольная жесткость сечения;

$L$  – длина конечного элемента;

$u, v, \theta$  – горизонтальное, вертикальное перемещения и угол поворота узлов конечного элемента.

При формировании глобальной матрицы жесткости, локальные матрицы умножаются на матрицы трансформаций с целью приведения их к глобальной системе координат и соответствующим степеням свободы глобальной системы. Далее локальные матрицы объединяются по правилу суперпозиции по глобальным степеням свободы. К глобальному вектору  $\{f\}$  добавляются сосредоточенные узловые нагрузки и граничные условия. Полученную систему линейных алгебраических уравнений решают прямыми или итерационными методами.

Традиционно изгибная жесткость железобетонного элемента определяется как произведение изгибающего момента на радиус кривизны нейтральной оси элемента. Однако для усиленного под нагрузкой элемента мы оперируем понятием кривизны и момента до и после усиления. В таком случае изгибная и продольная жесткость определяется интегрированием:

$$EJ_y = -\iint_c E(x, y)(y - y_0)^2 dx dy;$$

$$EA = -\iint_c E(x, y) dx dy.$$

Основное уравнение метода конечных элементов для вычисления перемещений имеет вид

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \{F\},$$

где  $\{\delta\}$  – вектор перемещений;

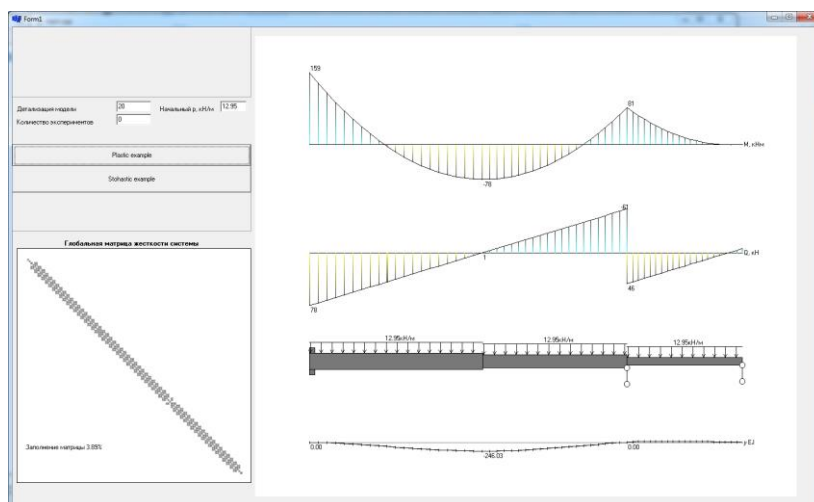
$\{F\}$  – вектор внешней нагрузки;

$[K]$  – глобальная матрица жесткости системы.

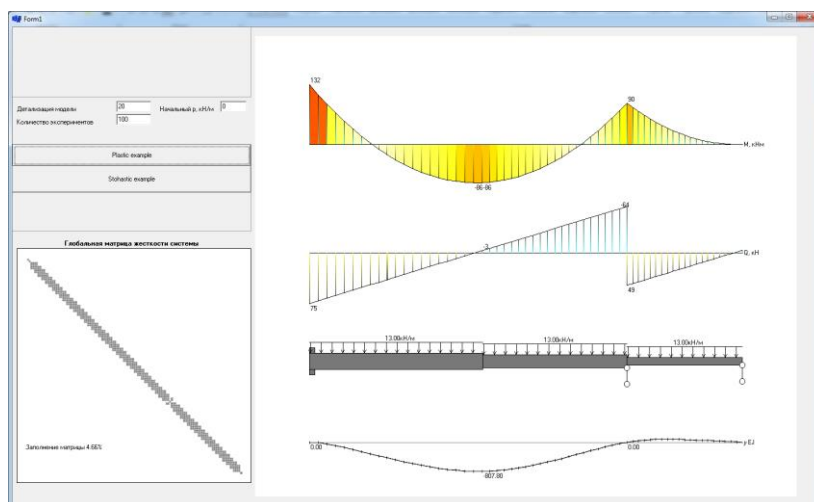
Вектор внутренних усилий отдельного конечного элемента определяют как произведение локальной матрицы жесткости и вектора перемещений узлов конечного элемента.

Построенная конечно элементная модель подвергается адаптивной дискретизации: дальнейшему автоматическому разбиению с шагом, соответствующим среднему расстоянию между трещинами. Каждому конечному элементу назначается диаграмма зависимости изгибающей жесткости от изгибающего момента и продольной силы в виде кусочно-линейной 3D-интерполяции по выделенным характеристическим точкам зависимости, полученной в модуле нелинейного моделирования.

В процессе моделирования нагружения организуется цикл последовательного увеличения нагрузок с фиксацией минимальной жесткости каждого сечения. Результаты моделирования выводятся в виде анимации расчетной схемы, анимации изменения эпюр моментов, перерезывающей силы и прогиба. На эпюре моментов цветом иллюстрируется изменение жесткости конечных элементов. Процесс анимации останавливается при достижении предельного момента, определенного в материале, в каком-либо конечном элементе. Отличия в эпюрах моментов, определенных по линейной и нелинейной модели, могут достигать 30%. Результат моделирования 3-пролетной неразрезной балки показан на рисунке 3.



а



б

Рисунок 3. – Результат расчета по линейной (а) и нелинейной (б) моделям. Отличие в определении максимального момента составило 16,98%

Кроме этого мы видим, что замена областей трещинообразования единственным пластическим шарниром, устанавливаемым в середине пролета или над опорами, не отражает реального процесса перераспределения напряжений и, соответственно, усилий. Данное обстоятельство имеет и экспериментальное подтверждение в целом ряде исследований, выполненных в ИИЦ Полоцкого государственного университета.

Определив для каждого конечного элемента внутренние усилия, по нелинейной деформационной модели мы имеем возможность вычислить распределение деформаций и напряжений по сечению железобетонного элемента и построить поле соответствующих параметров в конструкции в целом. Пример вычисленных полей приводится на рисунке 4.

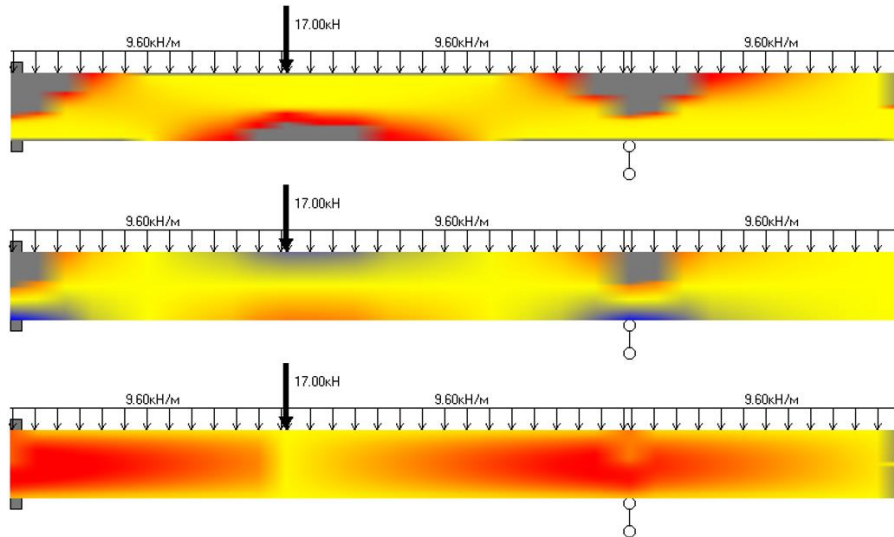


Рисунок 4. – Поля угла наклона  $\alpha$  направления главных растягивающих напряжений, нормальных (проекция на ось  $x$ ) напряжений  $\sigma_x$ , касательных напряжений  $\tau$

Анализ выполненных исследований показал, что в большинстве литературных источников [9] ширина раскрытия наклонной трещины  $w$  (мм) определяется из относительного удлинения поперечной арматуры  $\varepsilon_{sy}$ , мм/мм, на определенном участке  $l$ , мм:

$$w = \varepsilon_{sy} l . \quad (4)$$

Длину участка  $l$ , на котором определяется деформация поперечной арматуры, разные научные школы предлагают принимать по-разному. По ЕКБ-ФИБ – это расстояние между наклонными трещинами, мм:

$$S_{m\theta} = \frac{1}{\frac{\sin \theta}{S_{mx}} + \frac{\cos \theta}{S_{my}}} ,$$

где  $S_{mx}$ ,  $S_{my}$  – шаг наклонных трещин соответственно в продольном, поперечном направлениях, мм:

$$S_{mx} = 2 \left( C_x + \frac{S_x}{10} \right) + 0,25k_1 \frac{\varnothing_x}{\rho_{sx}} ; S_{my} = 2 \left( C_y + \frac{s}{10} \right) + 0,25k_1 \frac{\varnothing_y}{\rho_{sw}}$$

где  $C_x$ ,  $C_y$  – расстояние от центра тяжести сечения до центра тяжести соответственно продольной, поперечной арматуры, мм;

$\theta$  – угол наклона главных напряжений по отношению к продольной оси элемента, рад;

$S_x$  – расстояние между стержнями продольной арматуры, мм;

$s$  – шаг поперечной арматуры, мм;

$k_1$  – коэффициент, учитывающий форму поверхности арматурных стержней (профильная/гладкая);

$\varnothing_x$ ,  $\varnothing_y$  – диаметр соответственно продольной, поперечной арматуры, мм;

$\rho_{sx}$  – степень продольного армирования, мм<sup>2</sup>/мм<sup>2</sup>;

$\rho_{sw}$  – степень поперечного армирования, мм<sup>2</sup>/мм<sup>2</sup>;



$A_{sx}$  – площадь сечения продольной арматуры, мм<sup>2</sup>;

$h$  – высота сечения элемента, мм;

$b$  – ширина сечения элемента, мм;

$A_{sw}$  – площадь сечения поперечной арматуры, мм<sup>2</sup>;

$$\rho_{sx} = \frac{A_{sx}}{hb}; \quad \rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{bs};$$

Более поздние публикации ЕКБ-ФИБ рекомендуют вместо относительного удлинения поперечной арматуры  $\varepsilon_{sy}$  принимать относительные деформации по направлению главных растягивающих напряжений в бетоне  $\varepsilon_{c1}$ , мм/мм. Таким образом, выражение (4) приобретает вид  $w = \varepsilon_{c1} S_{m\theta}$ .

Однако обращаем внимание на то, что в области трещинообразования определить угол наклона главных напряжений по отношению к продольной оси элемента  $\theta$  не представляется возможным, поскольку напряжения в бетоне отсутствуют в связи с тем, что деформации в бетоне растянутой зоны превысили предельную деформацию на растяжение. Поэтому мы фиксируем угол поворота, предшествовавший моменту образования трещины.

С учетом изменения жесткостей конечных элементов под нагрузкой и перераспределения усилий, фиксации углов поворота главных напряжений, а следовательно, направлений образующихся трещин, нами реализован алгоритм пластического расчета трещинообразования в железобетонной конструкции.

Сравнение картин трещинообразования, полученных пластическим и упругим методами расчета, приводится на рисунке 5.

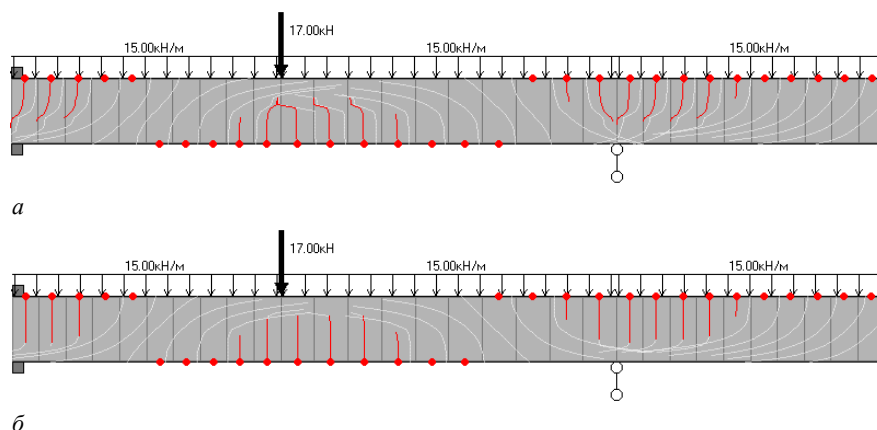


Рисунок 5. – Сравнение расчетных картин трещинообразования пластическим (а) и упругим (б) методами. Углы наклона главных напряжений показаны контур-линиями

### Заключение.

1. В результате выполненного исследования построена система конечно-элементного анализа пространственных статически неопределимых строительных конструкций с учетом физической нелинейности, использующей реальные графики зависимости жесткости железобетонного элемента от вектора внутренних усилий.

2. Эксперименты показали, что моделирование физической нелинейности путем искусственного точечного позиционирования специальных конечных элементов, имитирующих пластический шарнир, некорректно, поскольку для оценки реального напряженно-деформированного состояния существенное снижение изгибной и продольной жесткости происходит по всей длине нагруженных конечных элементов и процесс трещинообразования идет на достаточно протяженных участках конструкции.

3. Исследована зависимость точности моделирования от степени дискретизации модели и количества шагов последовательного наращивания нагрузок.

4. Построены алгоритмы аппроксимации и визуализации поля деформаций и поля напряжений в железобетонном элементе на основе расчета серии сечений (нормальных и наклонных к продольной оси элемента).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Herbrand, Martin (2017). Shear strength models for reinforced and prestressed concrete members. DOI: 10.18154/RWTH-2017-06170.
2. Xenos, D., Modelling the failure of reinforced concrete with nonlocal and crack band approaches using the damage-plasticity model CDPM2 [Electronic resource] / D. Xenos, P. Grassl // Finite Elements in Analysis and Design. – 2016. – Vol. 117–118. – P. 11–20. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2016.04.002>.

3. Uncertainty of the smeared crack model applied to RC beams [Electronic resource] / A. Rimkus [et al.] // Engineering Fracture Mechanics (IF 3.426). – 2020. – Vol. 233. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107088>.
4. Sasmal, S. Nonlinear FE simulations of structural behavior parameters of reinforced concrete beam with epoxy-bonded FRP [Electronic resource] / S. Sasmal, S. Kalidoss // J. of the Mechanical Behavior of Materials. – 2015. – Vol. 24, № 1-2. – P. 35–46. – DOI: <https://doi.org/10.1515/jmbm-2015-0004>.
5. Collins, M.P. Pre-stressed Concrete Structures / M.P. Collins, D. Mitchell. – N.J. : Prentice-Hall Inc. : Englewood Cliffs, 1991. – 766 p.
6. General Shear Design Method / M.P. Collins [et al.] // ACI Struct. Journ. – 1996. – V. 93, № 1. – P. 36–45.
7. Vecchio, F.J. Analysis based on the Modified Compression Field Theory / F.J. Vecchio // IABSE Colloq. On Structural Concrete. – 1991. – V. 62. – P. 321–326.
8. Vecchio, F.J. The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear / F.J. Vecchio, M.P. Collins // ACI Journal. – 1986. – Vol. 83, № 2, – P. 219–231.
9. Лазовский, Е.Д. Усиление изгибаемых железобетонных элементов в зоне среза : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Е.Д. Лазовский ; Бел. нац. техн. ун-т. – Минск, 2014. – 24 с.
10. Глухова, Т.М. Комбинирование стратегий поиска решений в задачах расчета систем нелинейных сингулярных уравнений / Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2013. – № 4. – С. 22–27.
11. Bentz, E.C. Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members : PhD Thesis / E.C. Bentz ; Department of Civil Engineering, University of Toronto. – 2000. – 310 p.

Поступила 13.05.2021

## MODELING OF CRACKING IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BASED ON DEFORMATION CALCULATION MODEL

*D. GLUKHOV, D. LAZOUSKI, Y. LAZOUSKI, T. GLUKHOVA*

*The article proposes a method for modeling crack formation in reinforced concrete structures, based on the integration of a nonlinear deformation model of a reinforced concrete element and the finite element method. Within the framework of such integration, it becomes possible not only to take into account the change in the stiffness of finite elements under the action of the load and the corresponding redistribution of internal forces, but also to take into account the redistribution of stresses over the sections, the change in the field of rotation of the principal stresses in the process of crack propagation. The paper proposes a method of combined strategies that makes it possible to effectively solve the system of equations of equilibrium and compatibility of deformations of the design model.*

**Keywords:** *finite element method, plastic deformations, inclined cracks, crack formation process, redistribution of forces, bending and longitudinal stiffness.*

УДК 004.932

## ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

**С.И. РОГОВСКИЙ, О.В. ТАНАНА, Н.В. ВАБИЩЕВИЧ,**  
канд. физ.-мат. наук, доц. С.А. ВАБИЩЕВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассмотрены вопросы использования цифровой обработки изображений поверхности полимера при испытаниях на микротвердость для определения геометрических размеров отпечатков, зоны разрушения и деформации. Построен алгоритм обработки изображения и реализована программа обработки изображений. Результаты моделирования могут быть использованы при испытаниях полимерных пленок на микротвердость для определения прочностных характеристик: микротвердости, трещиностойкости, удельной энергии отслаивания пленки.*

**Ключевые слова:** обработка изображения, программирование, поверхность, микроиндентирование, прочностные характеристики.

**Введение.** Информационные технологии широко распространены во всех сферах жизнедеятельности человека. Они дают возможность быстро и наиболее точно проводить расчеты, обрабатывать информацию и исключить субъективность в анализе результатов. Однако при организации научно-исследовательской работы далеко не всегда достаточно возможностей стандартных пакетов программных продуктов для анализа графической информации. Кроме того, актуальность исследований в области цифровой информации постоянно возрастает, что связано с высокой информативностью и доступностью ее получения. Все это свидетельствует о необходимости создания специализированных программных продуктов, позволяющих обрабатывать специфическую информацию, полученную в виде фотографии или видеоснимков.

Целью настоящей работы является разработка программы, позволяющей получить информацию о прочностных характеристиках материалов на основании анализа отпечатков, образующихся при микроиндентировании образцов.

**Физические аспекты проекта.** Современный процесс производства полупроводниковых приборов предусматривает ряд технологических обработок, в результате которых, помимо прочих, изменяются механические свойства материалов, что, в свою очередь, может приводить к появлению микротрещин, царапин, сколов и иных дефектов поверхности. Указанные явления и процессы приводят к повышению процента выбраковки готовой продукции и снижают экономическую эффективность производства приборов. Установлено, что механические свойства полупроводников зависят от изменения их дефектно-примесного состава, который существенно изменяется при технологических обработках. С целью оптимизации условий и режимов проведения указанных обработок необходимо проводить постоянный контроль прочностных характеристик материалов на каждом этапе производства и разрабатывать научно обоснованные методики изготовления полупроводниковых структур, которые учитывали бы изменение механических свойств используемого материала.

Для определения прочностных характеристик твердых материалов используются различные методы, однако методом, наиболее приближенным к реальному технологическому процессу, является микроиндентирование, т.к. оно позволяет наиболее точно моделировать контактное взаимодействие абразивных частиц с обрабатываемым материалом. Измерения микротвердости проводятся по стандартной методике [1]. При этом на испытываемую поверхность образца наносятся 30–50 отпечатков под действием статической нагрузки, приложенной к индентору. По измеренным диагоналям отпечатков и длине образовавшихся микротрещин определяют микротвердость, микрохрупкость, трещиностойкость материала, а также удельную энергию отслаивания пленки.

Размеры отпечатков и трещин в современных условиях можно получать как в результате проведения непосредственных экспериментов по микроиндентированию, так и на основании анализа цифровых фотографий изображений отпечатков. Однако и в том и в другом случае необходимо учитывать ряд условий, снижающих субъективность в проведении измерений. Так, например, практически невозможно точно измерить длину трещин от индентора, которые имеют сложную форму. Оценка балла микрохрупкости также может носить субъективный характер. Повышение эффективности проведения указанных выше измерений и расчетов возможно в результате их автоматизации с применением информационных технологий. В частности, существует необходимость создания программного продукта для распознавания цифровых изображений, позволяющего проводить на основании анализа фотоснимков полный

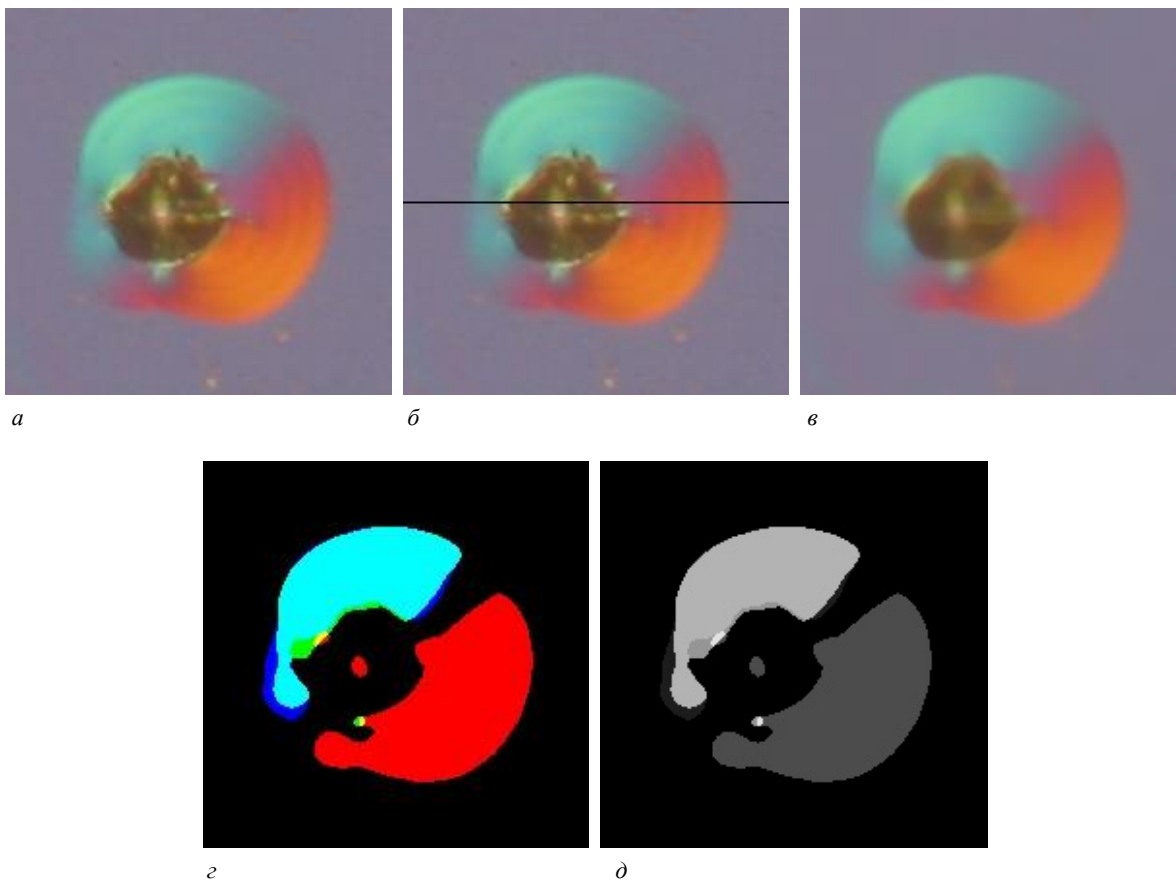
расчет прочностных характеристик материала. В качестве среды разработки программного продукта был выбран язык программирования Python. Схема обработки и анализа данных цифровых изображений включала в себя следующие этапы:

- анализ входных данных изображения;
- обработка входных данных;
- использование медианного фильтра;
- применение функции пороговых значений;
- поиск контуров изображения;
- отображение контуров на изображении;
- вычисление геометрических параметров объекта фотографирования.

Рассмотрим более подробно этапы обработки изображения.

**Входные данные изображения.** Входными данными являются фотоизображения отпечатков при индентировании полимера, нанесенного на кремниевую подложку (рисунок 1, *a*). Изображение получено методом дифференциально-интерференционного контраста [2], позволяющего выявить неровности поверхности полимера. В центре наблюдается отпечаток пирамиды индентора в полимерной пленке, окруженный навалами полимера. Зона навалов имеет сферическую форму. Изображение состоит из набора пикселей. Если представить изображение в виде сетки, то каждый квадрат в сетке содержит один пиксель, где квадрат с координатами  $[0, 0]$  – это левый верхний пиксель. Размер изображения составляет  $200 \times 200$  пикселей, что в совокупности составляет 40000 пикселей. Все пиксели в изображении представлены в цветовом пространстве RGB (red, green, blue – красный, зеленый, синий), где одно значение для красной компоненты, одно для зеленой и одно для синей. Каждая из трех компонент представлена целым числом в диапазоне от 0 до 255 включительно, которое указывает как «много» цвета содержится.

Если провести линию по центру изображения (рисунок 1, *б*) и взять все значения компонент RGB, можно получить гистограмму значений цвета (рисунок 2, *a*). На гистограмме можно увидеть, как изменяются значения компонент в зависимости от цветов на этой линии.

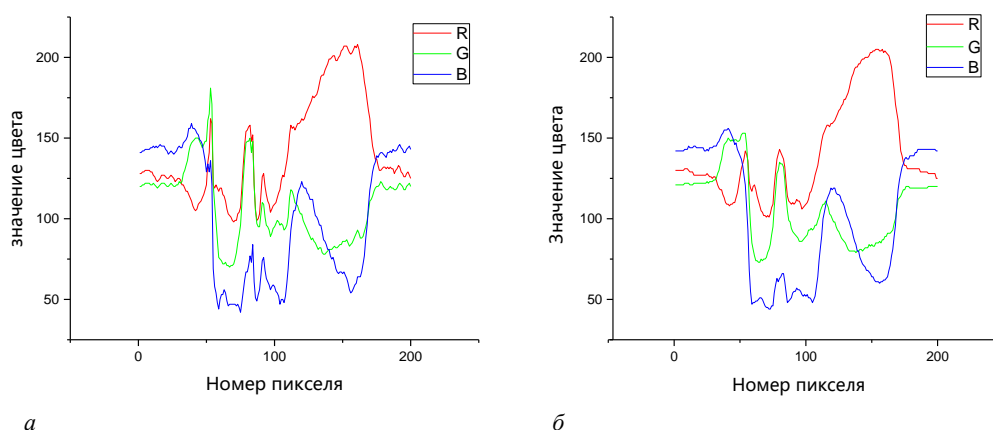


*a* – входное изображение; *б* – изображение после использования медианного фильтра;  
*в* – изображение с линией, по которой берется значение компонент;  
*г* – изображение после применения функции пороговых значений; *д* – бинарное изображение

Рисунок 1. – Этапы обработки входного изображения

**Обработка входных данных.** Для обработки данных изображений выбрана библиотека OpenCV и язык программирования Python [3]. OpenCV (Open Source Computer Vision Library) – одна из самых популярных библиотек для приложений по компьютерному зрению. OpenCV-Python – это Python-версия интерфейса для OpenCV. Наличие кода на языке C/C++ данной версии библиотеки в бэкенде гарантирует быстроту ее работы, а Python-обертка во фронтенде обеспечивает легкость настройки и развертывания. Благодаря этому OpenCV-Python является отличным решением для высоконагруженных вычислительных программ по компьютерному зрению. Также в библиотеке содержится огромное количество алгоритмов, есть интерфейсы для многих языков программирования – Java, Ruby, Matlab, Lua, C/C++.

**Фильтрация исходных данных.** Входное изображение содержит шум, который мешает анализу изображения. Существует много различных типов шумов, таких как гауссовский шум, шум «соли» и «перца» и т.д. Мы можем удалить этот шум из изображения, применив фильтр, который его удаляет или, по крайней мере, сводит к минимуму его влияние. Существует множество различных фильтров, например, усредняющий фильтр (box filter), медианный фильтр (median filter), фильтр типов волн (модовый фильтр, mode filter), фильтр Гаусса (Gaussian filter) и др. Для удаления шума в нашем алгоритме обработки используем медианный фильтр. Медианный фильтр – один из видов цифровых фильтров, который широко используется в цифровой обработке сигналов и изображений для уменьшения уровня шума. Медианное сглаживание применяется в алгоритмах обнаружения краев, потому что при определенных условиях оно сохраняет края, удаляя шум. В результате применения фильтра гистограмма значений RGB стала более ровной (рисунок 2, б).



*a* – цвета на исходном изображении; *б* – цвета на изображении после фильтра

Рисунок 2. – Визуальное представление цветов на изображении

**Применение пороговых значений.** Для определения контура следа предлагается функция пороговых значений, разделяющая фон и искомый след. Фон характеризуется постоянными значениями цветов, а для следа характерно резкое изменение значений цвета относительно фона. По гистограмме можно определить, где находится фон и нужный след. Для отделения следа от фона используется функция пороговых значений `cv2.threshold()`. Функция принимает изображение, пороговое значение от 0 до 255, максимальное значение, которое присваивается значениям пикселей, тип порогового преобразования. Как указано выше, изображение состоит из компонент RGB и каждая компонента имеет значения от 0 до 255. Если установить в программе пороговое значение 140, то все значения компонент выше 140 примут значения 255, а компоненты со значениями ниже 140 примут значение 0. После применения функции пороговых значений на изображении след имеет более отчетливый контур (см. рисунок 1, з). Т.е. фон стал черным и принял значения 0, а область внутри следа стала более яркой и приняла соответствующее значение.

**Поиск контуров.** Контур объекта – это его видимый край, который отделяет след от фона. В действительности большинство методов анализа изображений работают именно с контурами, а не с пикселями как таковыми. Библиотека OpenCV реализует удобные методы для детектирования и манипуляции с контурами изображения. Для поиска контуров используется функция `cv2.FindContours()`. Данная функция принимает три значения: изображение, режим группировки и метод упаковки:

1) *режимы группировки:*

CV2.RETR.LIST – выдает все контуры без группировки;

CV2.RETR.EXTERNAL – выдает только крайние внешние контуры;

CV2.RETR.CCOMP – группирует контуры в двухуровневую иерархию. На верхнем уровне – внешние контуры объекта. На втором уровне – контуры отверстий, если таковые имеются. Все остальные контуры попадают на верхний уровень;

CV2.RETR.TREE – группирует контуры в многоуровневую иерархию;

2) *методы упаковки:*

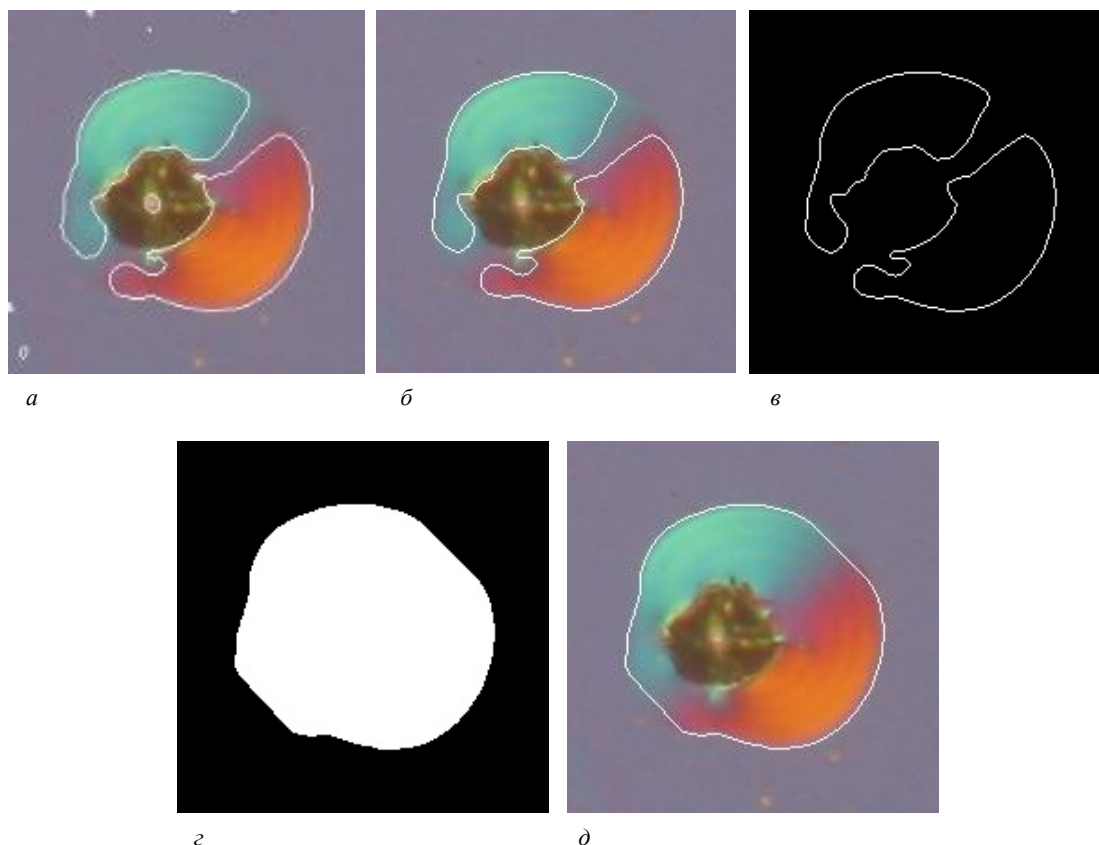
CV.CHAIN.APPROX.NONE – упаковка отсутствует и все контуры хранятся в виде отрезков, состоящих из двух пикселей;

CV2.CHAIN.APPROX.SIMPLE – склеивает все горизонтальные, вертикальные и диагональные контуры;

CV2.CHAIN\_APPROX\_TC89\_L1, CV2.CHAIN\_APPROX\_TC89\_KCOS – применяет к контурам метод упаковки (аппроксимации) Teh-Chin.

Согласно своему формату функция поиска контуров *cv2.FindContours()* принимает изображение, представленное в цветовом пространстве градаций серого (полутонное). Чтобы перевести изображение в цветовое пространство градаций серого применяется функция *cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR\_BGR2GRAY)*. Данная функция с использованием специальных флагов преобразовывает изображение в другое цветовое пространство согласно заданному флагу. В библиотеке OpenCV доступно более 150 флагов преобразования. После применения функции поиска контуров изображение готово для обработки (см. рисунок 1, д). Полученные контуры следа нужно отобразить на исходном изображении при помощи функции *cv2.drawContours()*. Функция принимает изображение, контур, цвет контура (заданный в палитре RGB), толщину контура в пикселях.

Результат отображений контура на изображении представлен на рисунке 3, а. На изображении выделилось несколько небольших ненужных контуров, которые следует убрать. При отображении контуров на изображении их необходимо отсортировать по площади. При помощи функции *cv2.contourArea()* можно получить значение площади. Функция принимает все контуры и выдает значение площади в пикселях, после чего нужно убрать все ненужные контуры, отсортировав их по площади. Функция площади задается выражением  $S = cv2.contourArea(contours[i])$ .



**а** – изображение с нанесенным контуром;  
**б** – изображение с нанесенным контуром после сортировки контуров по размеру;  
**в** – след полученного контура на черном фоне;  
**г** – след объекта на черном фоне после соединения контуров;  
**д** – исходное изображение с нанесенным контуром

**Рисунок 3. – Этапы поиска и отображения контуров на исходном изображении**

Из-за неравномерного освещения мы получили несколько контуров (см. рисунок 3, в), которые нужно объединить в один. Контур состоит из точек, и при соединении точек контура получили объект, который совпал со следом (см. рисунок 3, г). Полученный след совпадает с исходным обрабатываемым

изображением (см. рисунок 1, а), контур к которому является целью обработки. Для получения полного контура остается применить функцию поиска контуров и отобразить полученный контур на исходном изображении. Результат показан на рисунке 3, д.

Реализация данного алгоритма поиска контура может быть использована для определения геометрических параметров отпечатков при индентировании полимеров, что дает возможность рассчитать некоторые прочностные характеристики:

– оконтуривание отпечатка дает возможность определить две диагонали отпечатка, набрать статистику распределения отпечатков, определить среднее значение и рассчитать микротвердость полимера [4];

– определение контура радиальной трещины позволяет найти длину трещины, статистическое распределение длин трещин и с учетом величины микротвердости рассчитать трещиностойкость  $K_{Ic}$  (коэффициента интенсивности напряжений) материала [5];

– нахождение размеров разрушенной области позволяет рассчитать удельную энергию отслаивания пленки, являющуюся характеристикой адгезии полимерной пленки к основе [6].

**Заключение.** Таким образом, реализован алгоритм обработки цветных изображений, полученных при фотографировании поверхности полимера после испытаний на микротвердость, имеющий своей целью определение геометрических размеров отпечатков, контуров областей навалов, длин трещин и других объектов. Это имеет существенное значение для объективного определения прочностных характеристик материалов и для автоматизации процесса измерения в материаловедении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Литвинов, Ю.М. Методология определения механических свойств полупроводниковых материалов с помощью метода непрерывного вдавливания индентора / Ю.М. Литвинов, М.Ю.Литвинов // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2004. – № 4. – С. 11–16.
2. Анисович, А.Г. Оптические эффекты при микроскопии неметаллических материалов / А.Г.Анисович // Литье и металлургия. – 2017. – № 1. – С.110–114.
3. Bradski, G. Learning OpenCV. Computer vision with the OpenCV library / G.Bradski, A.Kaehler // O'Reilly Media, Inc. – 2008. – 580 p.
4. Физико-механические свойства облученных пленок диазохинон-новолачного фоторезиста на кремнии / С.А.Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2020. – № 12. – С. 60–64.
5. Прочностные свойства структур фоторезист – кремний,  $\gamma$ -облученных и имплантированных ионами  $B^+$  и  $P^+$  / С.А. Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2016. – № 12. – С. 30–36.
6. Adhesion of diazoquinon-novolac photoresist films with implanted boron and phosphorus ions to single-crystal silicon / S.A. Vabishchevich [et al.] // High energy chemistry. – 2020. – V. 54, № 1. – P. 46–50.

Поступила 12.05.2021

#### IMAGE PROCESSING FOR DETERMINING STRENGTH PARAMETERS OF POLYMER FILMS

*S. RAHOUSKI, V. TANANA, N. VABISHCHEVICH, S. VABISHCHEVICH*

*The issues of using digital processing of images of the polymer surface during microhardness tests to determine the geometric dimensions of indentations, zones of destruction and deformation are considered. An image processing algorithm has been built and an image processing program has been implemented. The simulation results can be used when testing polymer films for microhardness to determine the strength characteristics: microhardness, crack resistance, specific peeling energy of the film.*

**Keywords:** *image processing, programming, surface, microindentation, strength characteristics.*

## ФИЗИКА

УДК 546.28:621.315

### ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ПЛЕНОК ДИАЗОХИНОН-НОВОЛАЧНОГО ФОТОРЕЗИСТА НА ПЛАСТИНАХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

канд. физ.-мат. наук, доц. С.А. ВАБИЩЕВИЧ, Н.В. ВАБИЩЕВИЧ  
(Полоцкий государственный университет);

канд. физ.-мат. наук Д.И. БРИНКЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доц. В.С. ПРОСОЛОВИЧ  
(Белорусский государственный университет, Минск)

Методом микроиндентирования исследованы коэффициент вязкости разрушения  $K_{IC}$  и эффективная энергия разрушения  $\gamma$  пленок позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста марки ФП9120 на кремнии. Показано, что оба параметра трещиностойкости увеличиваются с ростом нагрузки и существенно образом возрастают при снижении толщины фоторезистивной пленки. У нанесенных на пластины кремния с ориентацией (100) пленок ФП9120 оба параметра трещиностойкости выше на 50–80%, чем у пленок на кремнии с ориентацией (111). Ионная имплантация приводит к увеличению трещиностойкости фоторезистивной пленки, причем при имплантации фосфора эффект проявляется сильнее, чем при внедрении  $V^+$ . После гамма-облучения коэффициент вязкости разрушения  $K_{IC}$  снижается примерно в 2–3 раза для всех исследовавшихся пленок. Отмеченные выше особенности микропрочностных свойств пленок фоторезиста на кремнии обусловлены адгезионными процессами, протекающими у границы раздела фоторезист/кремний при облучении гамма-квантами  $^{60}Co$  и ионной имплантации.

**Ключевые слова:** диазохинон-новолачный резист, микроиндентирование, трещиностойкость, коэффициент вязкости разрушения, гамма-облучение, имплантация.

**Введение.** Одним из основных технологических процессов современной электроники является фотолитография (ФЛ) – метод получения определенного рисунка на поверхности полупроводниковой пластины [1]. Роль ее постоянно возрастает. Так, если при формировании элементной базы по  $n$ -МОП технологии применяется до 10 операций фотолитографии, из которых маскирование ионного легирования обеспечивают три, то в БИКМОП технологии применяется уже порядка 22 операций ФЛ, из которых маскирование обеспечивают более десяти [2]. Основными материалами для осуществления литографических процессов служат резисты – органические многокомпонентные полимерные композиции, чувствительные к воздействию какого-либо высокоэнергетического излучения (оптического, рентгеновского, потока ионов или электронов). Различают негативные и позитивные резисты. В позитивных фоторезистах проэкспонированные светом области изменяют свои свойства и становятся растворимыми в щелочах. Наиболее широкое применение в технологических процессах микроэлектроники получили позитивные двухкомпонентные фоторезисты на базе светочувствительного диазохинона и новолачной смолы, используемой в качестве основы. Одной из наиболее важных характеристик фоторезистивных пленок на подложке монокристаллического кремния является их устойчивость к механическим воздействиям. Ранее в [2–5] показано, что ионная имплантация и гамма-облучение могут существенно изменять спектральные характеристики фоторезистивных пленок и их адгезию к монокристаллическому кремнию. В настоящей работе методом индентирования исследованы физико-механические свойства (трещиностойкость и эффективная энергия разрушения) облученных и имплантированных ионами  $V^+$  и  $P^+$  пленок позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста марки ФП9120.

**Методика измерений.** Пленки диазохинон-новолачного резиста марки ФП9120 толщиной от 1,0 до 5,0 мкм наносились на поверхность монокристаллических пластин (диаметр 100 мм) кремния различных марок (таблицы 1, 2) методом центрифугирования. Толщина пленки резиста  $h_{пл}$  определялась скоростью вращения и составляла 1,0 мкм при скорости вращения  $\nu = 8300$  об/мин;  $\sim 1,8$  мкм – при  $\nu = 2900$  об/мин;  $\sim 2,5$  мкм – при  $\nu = 1200$  об/мин. Пленки толщиной  $h = 5,0$  мкм формировались в две стадии при скорости вращения  $\nu = 1800$  об/мин на обеих стадиях. Толщина пленок контролировалась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 по пяти фиксированным точкам (центр, верх, низ, слева, справа) на каждой пластине, при этом отклонения от среднего значения для всех исследуемых образцов (независимо от ориентации и легирования пластины) не превышали 2%, что близко к погрешности измерений.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине  $\alpha = 136^\circ$ . Нагрузка  $P$  на индентор варьировалась



в пределах от 1 до 100 г. Измерения микротвердости  $H$  проводились по восстановленному отпечатку с использованием стандартной методики согласно ГОСТ 9450-76. Для надлежащей визуализации отпечатка измерения выполнялись на микроскопе Axiovert-10 в поляризованном свете [6]. Параметры, определяющие трещиностойкость пленок диазохинон-новолачного резиста (коэффициент вязкости разрушения  $K_{1C}$  и эффективная энергия разрушения  $\gamma$ ), рассчитывались по средней длине радиальных трещин в углах отпечатков согласно следующим формулам [7]:

$$K_{1C} = 0,016 \left( \frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{L^{\frac{3}{2}}};$$

$$\gamma = \frac{K_{1C}^2}{2E},$$

где  $E$  – модуль Юнга (для пленки фоторезиста принимался равным 8 ГПа);  
 $L$  – длина трещины,  
 $H$  – микротвердость пленки.

Длина трещины расслоения принималась равной расстоянию от центра отпечатка до границы разрушения сферической области. Для каждого отпечатка длина трещины расслоения определялась из среднего значения от двух диаметров  $d_{cp}$  сферы разрушения. Затем рассчитывалось среднее значение длины трещины расслоения для всей серии отпечатков данной нагрузки [8]. Значение микротвердости  $H$  полимера для расчетов  $K_{1C}$  выбиралось равным 0,35 ГПа, что соответствовало значениям  $H$  для нагрузок 2–5 г, при которых индентор не прокалывает слой полимера и не достигает границы полимер – подложка. Этот выбор обусловлен тем, что подложка оказывает существенное влияние на величину микротвердости твердотельных композиций пленка – подложка [9–11]. В случае «мягкой» пленки на «твердой» подложке пластическая деформация локализуется в пленке, и микротвердость композиции пленка – подложка существенно возрастает лишь при глубине проникновения индентора, равной толщине пленки.

При каждом измерении на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков. Поскольку ожидаемый эффект мог быть невелик, для обработки экспериментальных данных использовались стандартные методы математической статистики [12]. Было показано, что имеет место нормальный (гауссов) закон случайного распределения величин микротвердости и трещиностойкости. Во всех случаях вычислялась средняя квадратичная ошибка

$$s_n = \sqrt{\sigma_n^2/n}$$

среднего значения трещиностойкости, где  $\sigma_n$  – дисперсия измеренных значений  $K_{1C}$  при  $n = 50$ . Анализ полученных экспериментальных данных для резистивных пленок на пластинах монокристаллического кремния в соответствии с критерием Стьюдента показал, что погрешность измерения коэффициента вязкости разрушения  $K_{1C}$  и эффективной энергии разрушения  $\gamma$  составляла ~ 10% (с доверительной вероятностью 0,95).

Имплантация ионами  $P^+$  (энергия 100 кэВ) и  $V^+$  (энергия 60 кэВ) в интервале доз  $\Phi = 5 \times 10^{14} - 1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$  в режиме постоянного ионного тока (плотность ионного тока  $j = 4 \text{ мкА/см}^2$ ) проводилась при комнатной температуре в остаточном вакууме не хуже  $10^{-5} \text{ Па}$  на ионно-лучевом ускорителе «Везувий-6». Облучение гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  осуществлялось при комнатной температуре и атмосферном давлении на установке МРХ- $\gamma$ -25М. Мощность поглощенной дозы составляла  $0,12 \pm 0,008 \text{ Гр/с}$ . Интервал поглощенных доз – от 1 до 300 кГр.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Трещиностойкость пленок позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 (коэффициент вязкости разрушения  $K_{1C}$  и эффективная энергия разрушения  $\gamma$ ) повышалась с ростом нагрузки для всех исследовавшихся образцов (рисунки 1–3). Такая зависимость указанных параметров противоположна зависимости параметров трещиностойкости пластин монокристаллического кремния, в которых наблюдалось снижение  $K_{1C}$  и  $\gamma$  при увеличении нагрузки [13]. Отметим, что коэффициент вязкости разрушения  $K_{1C}$  и эффективная энергия разрушения  $\gamma$  исследовавшихся структур фоторезист – кремний были в 2–3 раза ниже, чем аналогичные параметры трещиностойкости пластин монокристаллического кремния [14]. Как и для микротвердости [8], снижение нагрузки приводило к существенному уширению кривых случайного распределения величин коэффициента вязкости разрушения  $\Delta K_{1C}/K_{1C}$ . Так, если при  $P = 10\text{--}20 \text{ г}$  значения  $\Delta K_{1C}/K_{1C}$  для разных образцов составляли ~ 10–15%, то для нагрузок 1–2 г разброс значений коэффициента вязкости разрушения увеличивался до 50–70%. С учетом этого в таблицах 1 и 2 приведены значения параметров  $K_{1C}$  и  $\gamma$  для нагрузки 10 г, когда разбросы измеренных значений невелики.

Из сравнения экспериментальных данных, приведенных в таблицах 1 и 2 для фоторезистивных пленок, нанесенных на пластины монокристаллического кремния марки КЭФ 4,5, видно, что оба параметра

трещиностойкости существенным образом возрастают при снижении толщины пленки. Отметим также, что параметры трещиностойкости  $K_{1c}$  и  $\gamma$  несколько выше (на 50–80%) у пленок фоторезиста, нанесенных на пластины кремния с ориентацией (100), по сравнению с пленками на поверхности кремния с ориентацией (111). Это характерно для фоторезистивных пленок разной толщины (см. таблицы 1, 2). Существенной зависимости коэффициента вязкости разрушения  $K_{1c}$  и эффективной энергии разрушения  $\gamma$  от типа легирующей примеси и ее концентрации в пленках разной толщины замечено не было (см. таблицы 1, 2).

Таблица 1. – Трещиностойкость пленок толщиной 1,8 мкм, нанесенных на различные подложки кремния. Нагрузка 10 г

Подложка	Ориентация	Тип примеси	Удельное сопротивление, Ом·см	$K_{1c} \cdot 10^{-5}$ , Па/м <sup>1/2</sup>	$\gamma$ , Па/м
КДБ-12	100	бор	12	0,66	0,28
КЭС 0,01	111	сурьма	0,01	0,48	0,12
КЭФ 4,5	100	фосфор	4,5	0,62	0,16

Таблица 2. – Трещиностойкость пленок толщиной 1,0 мкм, нанесенных на различные подложки кремния. Нагрузка 10 г

Подложка	Ориентация	Тип примеси	Удельное сопротивление, Ом·см	$K_{1c} \cdot 10^{-5}$ , Па/м <sup>1/2</sup>	$\gamma$ , Па/м
КДБ-10	111	бор	10	1,1	1,6
КДБ-12	100	бор	12	1,9	2,8
КЭФ 4,5	100	фосфор	4,5	2,0	3,6

Полученные экспериментальные данные могут быть обусловлены следующими причинами. Как отмечалось выше, на прочностные свойства структур существенное влияние оказывает подложка [10; 11]. В случае «мягкой» пленки на «твердой» подложке, который наблюдался и в нашем исследовании, прочностные характеристики композиции пленка – подложка должны существенно возрастать, когда индентор достигает границы раздела пленка – подложка. В наших экспериментах глубина проникновения индентора в фоторезистивную пленку варьировалась от 0,9–1,0 мкм при нагрузке 1 г до 2,8–3,2 мкм при  $P = 50$  г. Т.о., для пленок фоторезиста толщиной 1 мкм практически во всем диапазоне использовавшихся нагрузок индентор проникает через границу раздела пленка – подложка, и кремниевая подложка оказывает существенное влияние на прочностные характеристики композиции пленка – подложка. Указанным обстоятельством обусловлено возрастание обоих параметров трещиностойкости при снижении толщины пленки и возрастании нагрузки. В пленках фоторезиста толщиной 2,5 мкм индентор пересекает границу раздела пленка – подложка только при максимальной использовавшейся нагрузке 50 г, что обуславливает более низкие значения величин трещиностойкости в указанных пленках по сравнению с пленками толщиной 1,0 мкм. Влияние ориентации кремниевой подложки на трещиностойкость фоторезистивной пленки обусловлено, вероятнее всего, лучшей адгезией фоторезиста к пластинам с ориентацией (100).

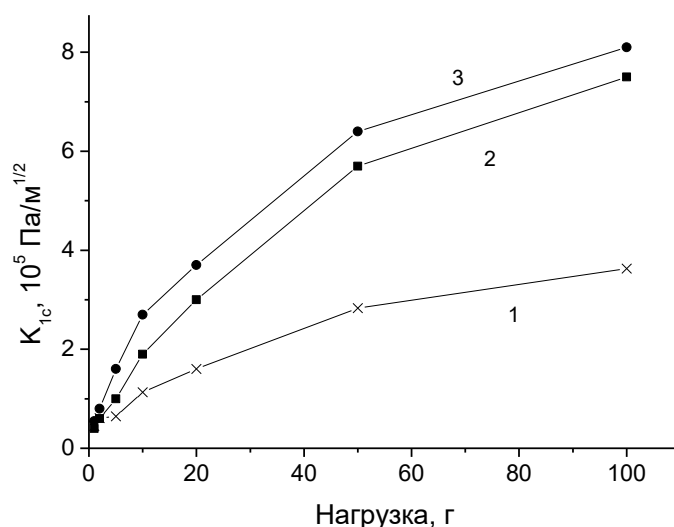
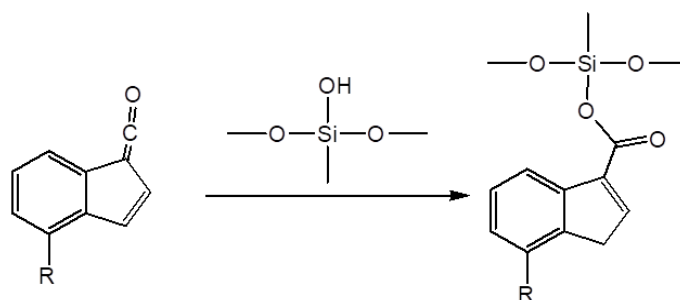


Рисунок 1. – Зависимость трещиностойкости от нагрузки для пленок ФП9120 на пластинах кремния марки КДБ 10(111) толщиной 1,0 мкм исходных (1) и имплантированных ионами  $P^+$  (2) и  $B^+$  (3) флюенсом  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>

Ионная имплантация приводила к увеличению трещиностойкости фоторезистивной пленки. Особенно это заметно на примере тонких пленок фоторезиста – после имплантации как бора, так и фосфора коэффициент вязкости разрушения  $K_{1C}$  возрастал при всех использованных нагрузках (см. рисунок 1), причем при имплантации фосфора (кривая 3 на рисунке 1) эффект проявлялся сильнее, чем при имплантации бора (кривая 2 на рисунке 1). Заметной дозовой зависимостью эффекта увеличения трещиностойкости отмечено не было. Аналогично ведет себя и эффективная энергия разрушения  $\gamma$ .

Указанный экспериментальный результат обусловлен усилением в процессе ионной имплантации адгезии полимерной пленки к кремниевой подложке, наблюдавшимся ранее в работе [4]. Такое увеличение адгезии фоторезиста обусловлено, как показано в [15], образованием при имплантации ионов бора  $B^+$  и фосфора  $P^+$  сложноэфирных сшивок (новой связи  $Si-O-C$ ) между гидроксильными группами на поверхности оксидного слоя кремниевой пластины и карбоксильной группой 1-Н-инден-3-карбоновой кислоты, являющейся производной нафтохинондиазида – одного из основных компонентов фоторезиста ФП9120, по реакции



Кроме того, следует учитывать образование в процессе имплантации приповерхностного углеродистого слоя, снимающего упругие напряжения в резистивной пленке и препятствующего развитию трещин [16].

Эффект, противоположный ионной имплантации, на трещиностойкость фоторезистивных пленок оказывает облучение гамма-квантами  $^{60}Co$ . После гамма-облучения коэффициент вязкости разрушения  $K_{1C}$  фоторезистивной пленки снижался примерно в 2 раза вне зависимости от толщины фоторезистивной пленки (сравн. кривые 1 и 2 на рисунках 2, 3). Снижение трещиностойкости наблюдалось и при облучении пленок, имплантированных ионами  $P^+$  и  $B^+$  (кривые 3 и 4 на рисунках 2, 3). Причем это снижение было более выражено, чем при облучении неимплантированных пленок. Так для имплантированных  $P^+$  образцов толщиной 1,0 мкм коэффициент вязкости разрушения  $K_{1C}$  при нагрузке 50 г после гамма-облучения снижался более чем в 2 раза – с  $6,2 \cdot 10^5 \text{ Па/м}^{1/2}$  (кривая 3 на рисунке 1) до  $2,3 \cdot 10^5 \text{ Па/м}^{1/2}$  (кривая 4 на рисунке 2). Аналогичное снижение  $K_{1C}$  наблюдалось также после облучения имплантированных  $B^+$  пленок. Существенного влияния типа подложки (марки кремния) на трещиностойкость гамма-облученных структур фоторезист – кремний не обнаружено.

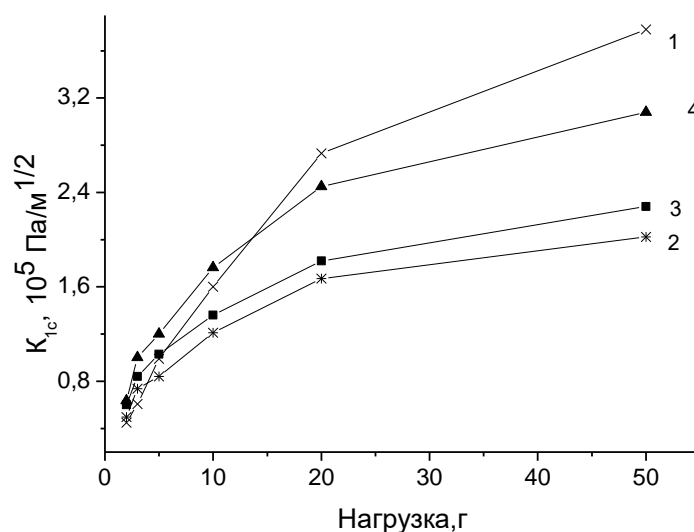
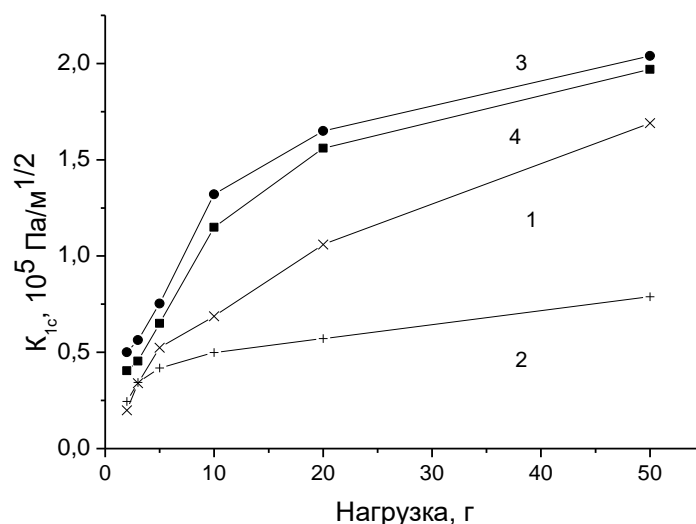


Рисунок 2. – Зависимость трещиностойкости от нагрузки для исходных (1) и гамма-облученных (2–4) пленок ФП9120 на пластинах КДБ 10(111). Толщина пленок 1,0 мкм. Часть образцов перед облучением была имплантирована ионами  $P^+$  (кривая 4) и  $B^+$  (кривая 3) флюенсом  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

Приведенные выше экспериментальные результаты могут быть обусловлены двумя причинами. Во-первых, сшивание молекул резиста в процессе гамма-облучения, наблюдавшееся ранее в работе [17], может приводить к снижению пластичности полимерной пленки и, соответственно, к снижению ее трещиностойкости. Кроме того, сшивка молекул может приводить к возникновению упругих напряжений, которые также способствуют снижению трещиностойкости пленки. Во-вторых, гамма-облучение приводит к разрушению нестабильной 1-Н-инден-3-карбоновой кислоты и, соответственно, разрыву связей в Si-O-C группе на границе раздела фоторезист – кремний [18]. Указанный процесс приводит к снижению при гамма-облучении адгезии фоторезистивной пленки к кремниевой подложке и снижению трещиностойкости композита фоторезист – кремний. В имплантированных пленках адгезия и, соответственно, трещиностойкость выше, поэтому влияние гамма-облучения на такие пленки выше, что полностью соответствует полученным экспериментальным результатам.



**Рисунок 3.** – Зависимость трещиностойкости от нагрузки для исходных (1) и гамма-облученных (2–4) пленок ФП9120 на пластинах КДБ 10(111). Толщина пленок 2,5 мкм. Часть образцов перед облучением была имплантирована ионами P<sup>+</sup> (кривая 3) и V<sup>+</sup> (кривая 4) флюенсом 1·10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup>

**Заключение.** В настоящей работе методом индентирования экспериментально показано, что трещиностойкость (коэффициент вязкости разрушения  $K_{1c}$  и эффективная энергия разрушения  $\gamma$ ) пленок позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста марки ФП9120 на кремнии увеличивается с ростом нагрузки. Трещиностойкость существенным образом возрастает при снижении толщины фоторезистивной пленки. У нанесенных на пластины кремния с ориентацией (100) пленок ФП9120 оба параметра трещиностойкости выше на 50–80%, чем у пленок на кремнии с ориентацией (111). Ионная имплантация приводит к увеличению трещиностойкости фоторезистивной пленки, причем при имплантации P<sup>+</sup> эффект проявляется сильнее, чем при внедрении V<sup>+</sup>. После гамма-облучения коэффициент вязкости разрушения  $K_{1c}$  снижается примерно в 2–3 раза для всех исследовавшихся пленок. Отмеченные выше особенности микропрочностных свойств пленок фоторезиста на кремнии обусловлены адгезионными процессами, протекающими у границы раздела фоторезист – кремний при гамма-облучении и ионной имплантации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы : в 2-х ч. / У. Моро. – М. : Мир, 1990. – 632 с. – Ч. 2.
2. Ионная имплантация позитивных фоторезистов / Д.И. Бринкевич [и др.] // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 193–199.
3. Radiation-Stimulated Transformation of the Reflectance Spectra of Diazoquinone–Novolac Photoresist Films Implanted with Antimony Ions / A.A. Kharchenko [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – V. 14, №. 3. – P. 558–561.
4. Adhesion of diazoquinon-novolac photoresist films with implanted boron and phosphorus ions to single-crystal silicon / S.A. Vabishchevich [et al.] // High energy chemistry. – 2020. – V. 54, № 1. – P. 46–50.
5. Radiation-Induced Processes in Diazoquinone–Novolac Resist Films under Irradiation with <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -Rays / S.D. Brinkevich [et al.] // High Energy Chemistry. – 2021. – V. 55, N. 1 – P. 65–74.
6. Микротвердость пленок полиимида и полиэтилентерефталата, облученных гамма-квантами <sup>60</sup>Co / Д.И. Бринкевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2017. – № 12. – С. 30–34.
7. Колесников, Ю.В. Механика контактного разрушения / Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. – М. : Наука, 1989. – 220 с.

8. Физико-механические свойства облученных пленок диазохинон-новолачного фоторезиста на кремнии / С.А. Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2020. – № 12. – С. 60–64.
9. Шугуров, А.Р. Особенности определения механических характеристик тонких пленок методом нано-индентирования / А.Р. Шугуров, А.В. Панин, К.В. Осколков // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, № 6. – С. 1007–1012.
10. Наноиндентирование и деформационные характеристики наноструктурных боридонитридных пленок / Р.А. Андриевский [и др.] // Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42, № 9. – С. 1624–1627.
11. Панин, А.В. Исследование механических свойств тонких пленок Ag на кремниевой подложке методом наноиндентирования / А.В. Панин, А.Р. Шугуров, К.В. Осколков // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 11. – С. 1973–1977.
12. Бринкевич, Д.И. Физико-механические свойства эпитаксиальных слоев GaP / Д.И. Бринкевич, Н.В. Вабищевич, С.А. Вабищевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 92–97.
13. Бринкевич, Д.И. Микропрочностные свойства монокристаллического кремния, выращенного при наложении на расплав сложных электромагнитных полей / Д.И. Бринкевич, Н.В. Вабищевич, С.А. Вабищевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2012. – № 4. – С. 77–82.
14. Микропрочностные свойства приповерхностных слоев имплантированных монокристаллов кремния / С.А. Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2012. – № 12. – С. 79–88.
15. Mechanism of the Adhesive Interaction of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films with Monocrystalline Silicon / S.D. Brinkevich [et al.] // J. of Appl. Spectrosc. – 2020. – V. 87, № 4. – P. 647–651.
16. Грасси, Н. Деструкция и стабилизация полимеров. / Н. Грасси, Дж. Скотт. – М. : Мир, 1988. – 246 с.
17. Модификация спектров нарушенного полного внутреннего отражения пленок диазохинон-новолачного резиста при облучении  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  / С.Д. Бринкевич [и др.] // Химия высоких энергий. – 2021. – Т. 55, № 1. – С. 66–75.
18. Прочностные свойства структур фоторезист-кремний,  $\gamma$ -облученных и имплантированных ионами  $\text{B}^+$  и  $\text{P}^+$  / С.А. Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2016. – № 12. – С. 30–36.

Поступила 07.05.2021

## CRACK RESISTANCE OF DIAZOQUINONE-NOVOLACH PHOTORESIST FILMS ON MONOCRYSTALLINE SILICON PLATES

S. VABISHCHEVICH, N. VABISHCHEVICH, D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH

*The fracture toughness coefficient  $K_{1C}$  and the effective fracture energy  $\gamma$  of films of FP9120 positive diazoquinone-novolach photoresist on silicon have been investigated by the microindentation method. It is shown that both parameters of crack resistance increase with increasing load and significantly increase with decreasing thickness of the photoresist film. For FP9120 films deposited on silicon wafers with orientation (100), both parameters of crack resistance are higher by 50–80% than films on silicon with (111) orientation. Ion implantation leads to an increase in the crack resistance of the photoresist film, and the effect is more pronounced upon the implantation of phosphorus than upon the introduction of  $\text{B}^+$ . After gamma irradiation, the fracture toughness coefficient  $K_{1C}$  decreases by ~ 2–3 times for all studied films. The aforementioned features of the microstrength properties of photoresist films on silicon are due to adhesion processes occurring at the photoresist/silicon interface during irradiation with  $^{60}\text{Co}$  gamma quanta and ion implantation.*

**Keywords:** diazoquinone-novolac resist, microindentation, crack resistance, fracture toughness coefficient, gamma-irradiation, implantation.

УДК 621.371: 550.837.6

**ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ***канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, С.В. КАЛИНЦЕВ**(Полоцкий государственный университет)**д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. БОГУШ**(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

*Приводится анализ применения двухчастотных электромагнитных волн с использованием мощного низкочастотного сигнала для поиска и оконтуривания границ углеводородных залежей. Исследованы характеристики анизотропной среды над залежами на основании полученного отклика от воздействия двухчастотного сигнала. Проанализированы вещественные и фазовые составляющие комбинированных элементов тензора диэлектрической проницаемости, абсолютные, мнимые и фазовые характеристики поверхностного импеданса среды над углеводородами. Проведен анализ характеристик среды над углеводородами для электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями в зависимости от частоты, коэффициента отношения амплитуд сигналов и удельной проводимости. Установлено, что по амплитудным и фазовым характеристикам компонентов тензора диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над углеводородами может осуществляться диагностика сред с целью повышения производительности геологоразведочных работ и точности определения границ залежей углеводородов.*

**Ключевые слова:** *углеводородная залежь, электромагнитная волна, двухчастотный сигнал.*

**Введение.** Совершенствование и разработка новых методов поиска углеводородных залежей (УВЗ) является актуальным направлением в современной поисковой геофизике [1–3]. Активное внедрение электромагнитных методов (ЭММ) и технических средств для поиска углеводородов (нефти и газа) обусловлены научным и практическим интересами по решению данных задач для обеспечения экономик стран важнейшим источником энергии. В соответствии с этим тенденции развития ЭММ в поисковой геофизике направлены на решение задач внедрения эффективных методов георазведки с высоким уровнем точности и достоверности обнаружения месторождений углеводородов. Реализация этих методов на практике обусловлена их высокой информативностью. Функциональные зависимости компонентов тензоров диэлектрической проницаемости среды над залежами углеводородов дают дополнительные возможности для георазведки.

В данной статье исследовалось применение двухчастотных сигналов для модернизации и разработки ЭММ поиска УВЗ на основе исследования характеристик электромагнитных волн (ЭМВ) над залежами. Результаты применения методов поиска, идентификации месторождений УВЗ представлены во многих работах. Различные модификации способов вертикального зондирования широко используются для поиска углеводородов [4]. В работе [5] исследованы электрофизические и электрохимические процессы над залежами углеводородов на основе электродинамического моделирования среды над залежью по аналогии исследуемой среды с плазмоподобными образованиями на базе квазигидродинамического подхода.

Радиоволновые методы поиска [6] широко применяются для решения поставленных задач. Различные варианты электромагнитных зондирований при поисках углеводородов в транзитной зоне Каспийского моря получили широкое распространение, на основании их опыта применения наработаны разнообразные методики зондирования УВЗ [7]. Исследование компонентов составляющих поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ с учетом влияния на самый верхний слой от всех ниже расположенных слоев проведено в работе [8]. Метод на основе электрорезонансных зондирований широко используется для определения свойств геологического профиля местности [9]. Методы исследования свойств объектов при морских измерениях, основанные на сравнении статистических свойств устанавливаемых электрических полей, предполагают получение необходимой информации для различения сред [10]. Используются исследования нефтегазовых резервуаров, выявляемые на основе аномалии поля в анизотропной среде [11]. Модификации способов поиска УВЗ с использованием амплитудно-модулированных сигналов построены на обнаружении месторождений углеводородов по регистрации амплитудных и фазовых компонент поверхностного импеданса геологического профиля [12; 13]. Универсальный способ для мониторинга коллектора и геотермальных исследований может применяться на практике для решения задач электроразведки [14]. Различные модификации способов вертикального зондирования широко используются для поиска углеводородов [15]. Применение для поиска УВЗ метода 3D-электроразведки становлением поля [16] приводит к расширению функциональных зависимостей диэлектрической проницаемости среды над углеводородами от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

**Методика проведения исследований.** Применение двухчастотных ЭМВ для определения свойств анизотропных сред над УВЗ основано на использовании функциональных зависимостей компонентов

тензоров диэлектрической проницаемости среды над углеводородами [1]. Для формирования ЭМВ для исследования свойств среды над УВЗ выберем двухчастотный сигнал вида

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t, \quad (1)$$

где  $A_1, A_2, \omega_1, \omega_2$  – соответственно амплитуды и частоты данных ЭМВ.

Режимы измерений определяются коэффициентами соотношения амплитуд двух волн и их частот:

$$k_E = \frac{A_2}{A_1}, \quad k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (2)$$

поэтому процесс распространения двухчастотного сигнала (1) над средой с наличием углеводородов представляет интерес с точки зрения анализа взаимодействия ЭМВ с анизотропными средами, образующимися над залежами и скоплениями углеводородов, в зависимости от диэлектрической проницаемости и удельной проводимости пород, находящихся над УВЗ и определяющих электродинамический отклик. Различные возможных вариантов построения систем поиска позволяет формировать ЭМВ с различными соотношениями параметров. В данной статье проведен анализ распространения ЭМВ над средой расположения УВЗ для мощного низкочастотного (НЧ) сигнала с коэффициентами

$$k_E \ll 1, \quad k_\omega \ll 1. \quad (3)$$

Проведено исследование электродинамических характеристик среды на основе тензора диэлектрической проницаемости среды в режиме двухчастотных сигналов [1]:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \right. \\ &\quad \left. - j \left[ \frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_E) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \frac{2j\tilde{\omega}_1 v_i \omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\left[ (v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2 \right] \omega_2} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \frac{1}{(v_i^2 + \tilde{\omega}_1^2)} - j \left[ \frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_E) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$  – компоненты тензора;

$\tilde{\omega}_1$  – частотная составляющая, характеризующая данный режим зондирования;

$\omega_{\Pi i}$  – плазменная частота;

$\omega_{\Gamma i}$  – гиротропная частота;

$v_i$  – частота столкновения частиц;

$\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\sigma_r$  – удельная проводимость среды;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

$\alpha = \omega_2 - \omega_1 = \omega_2(1 - k_\omega)$  – разность частот двух ЭМВ.

Проводился анализ комбинационных составляющих тензора диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над УВЗ.

Методика исследований заключается в определении компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ  $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$  и компонентов поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{11}$  и  $\dot{Z}_{12}$ .

**Результаты исследований.** Расчет компонентов тензоров диэлектрической проницаемости производится на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [1]:

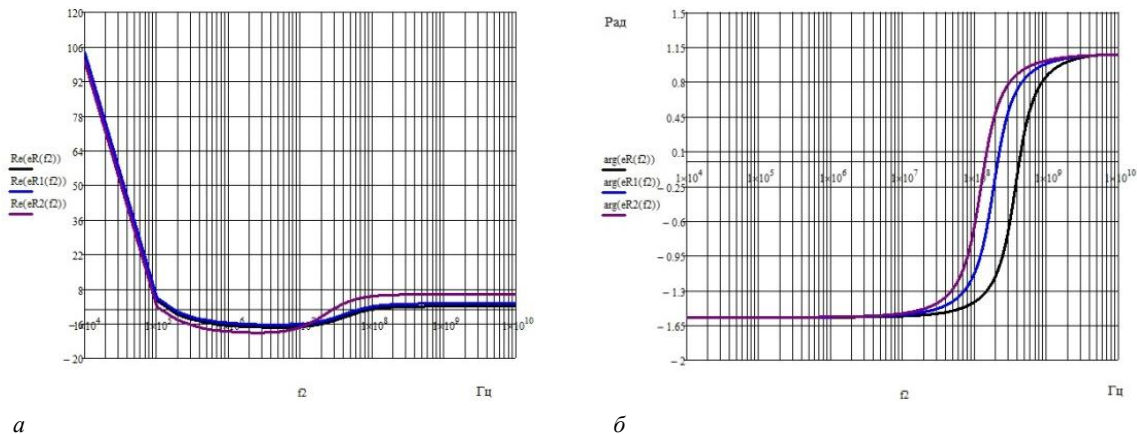
– залегания УВЗ на глубинах  $h = 2,0 - 3,5$  км;

– значений диэлектрической проницаемости вмещающих пород  $\varepsilon_r = 1 - 30$  и электрической проводимости  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1$  См/м;

– концентрации частиц  $N_e = N_n = (10^{16} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$ ;

– частоты столкновения частиц  $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$  рад/с.

Проведен анализ выражений (4) для компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ. Вещественные значения для компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой круговой поляризацией приведены на рисунке 1. Как видно из рисунка, вещественная составляющая  $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$  имеет две точки перехода через нуль на частотах  $f_{2ц}$  и  $f_{2п}$ , соответствующих электронному циклотронному и электронному плазменному резонансам. Частота электронного циклотронного резонанса лежит в пределах 100–200 кГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она смещается влево по оси абсцисс. Частота электронного плазменного резонанса соответствует 20–100 МГц и с увеличением диэлектрической проницаемости также уменьшается. Таким образом, для принятых значений параметров среды следует выделить частотный диапазон высокочастотной составляющей 100 кГц – 100 МГц, где  $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$  является отрицательной. Фазовые характеристики постоянны в диапазоне частот 10 кГц – 10 МГц и 3–10 ГГц. Применение верхней частоты зондирования, лежащей между указанными диапазонами, сопровождается ростом фазы от  $-1,6$  до  $1,1$  рад с переходом через нуль на частотах 100–400 МГц. Увеличение диэлектрической проницаемости среды смещает данную точку влево.



*a* – действительная часть суммарной компоненты; *б* – фазовая составляющая суммарной компоненты;

$\text{Re}(eR(f_2)), \text{arg}(eR(f_2))$  для  $\varepsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$ ;

$\text{Re}(eR1(f_2)), \text{arg}(eR1(f_2))$  для  $\varepsilon_r = 200, k_\omega = 10^{-3}, k_E = 10^{-1}$ ;

$\text{Re}(eR2(f_2)), \text{arg}(eR2(f_2))$  для  $\varepsilon_r = 30, k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$

Рисунок 1. – Зависимости компонентов тензора от частоты  $f_2^1$

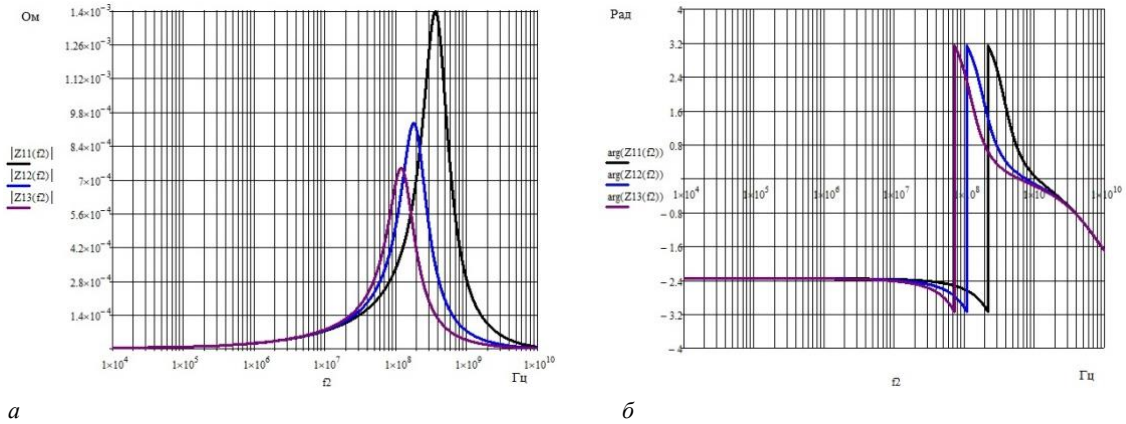
Вещественные значения для компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ для двухчастотных ЭМВ приведены соответственно на рисунке 2. Наблюдаются ярко выраженные максимумы модуля поверхностного импеданса среды на частотах 100–400 МГц. С увеличением значения диэлектрической проницаемости среды частота резонанса смещается влево и значение компоненты уменьшается. Фазовые характеристики поверхностного импеданса не меняются в диапазоне частот 10 кГц – 10 МГц. На участке 10–200 МГц происходит уменьшение фазы. Представляют интерес частоты 70–200 МГц, характеризующиеся скачкообразным ростом фазы. В оставшемся диапазоне значений высокочастотной компоненты происходит уменьшение значений до отрицательных с переходом через нуль при 500 МГц – 1 ГГц.

Значения модуля и фазы поверхностного импеданса анизотропной среды над углеводородами зависят от происходящих физико-химических процессов в самой залежи и в среде, определяющей околозалежное пространство, от состава кристаллической структуры скелета и термодинамических условий залегания (значения давления и температуры), влияющих на электрические свойства вмещающих пород и сред над УВЗ. Дополнительно были проанализированы амплитудные и фазовые составляющие компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ  $Z_{12}$  (рисунок 3). Выполняется условие симметричности, т.е.  $Z_{11} = Z_{22}$  и  $Z_{12} = Z_{21}$ . Следует отметить, что для данной компоненты также существуют точки резонансов, выраженные

<sup>1</sup> Здесь и далее на рисунках  $\dot{Z}_{11} = Z_{11}, \dot{Z}_{12} = Z_{12}, \dot{Z}_{21} = Z_{21}, \dot{Z}_{22} = Z_{22}$ .

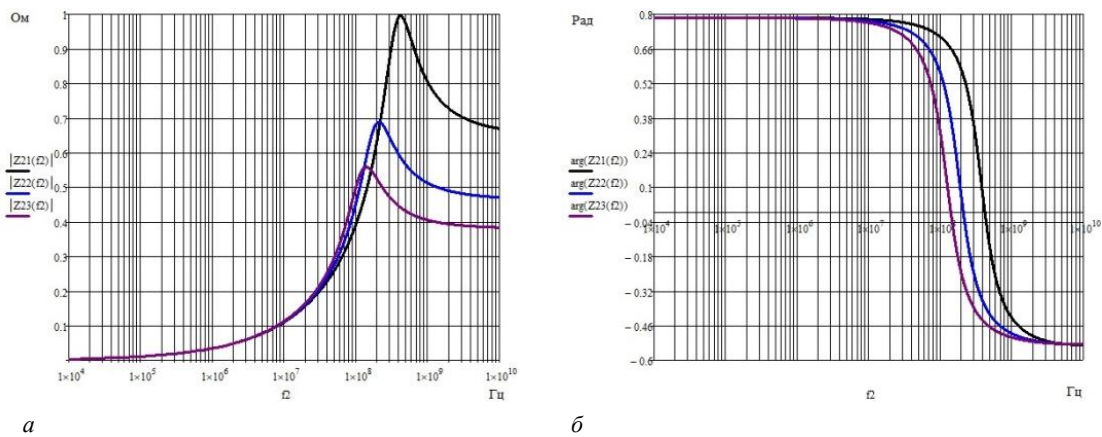


не так существенно, как для предыдущего случая. Они характерны для того же диапазона частот 100–400 МГц. После прохождения точек резонансов величины сопротивления уменьшаются, принимая стабильный характер в сантиметровом диапазоне. Фазовые характеристики постоянны при частотах 10 кГц – 10 МГц и в сантиметровом диапазоне. Наиболее интересен отрезок частот между указанными диапазонами с точкой перехода через нуль для 100–400 МГц.



***a*** – модуль  $\dot{Z}_{11}$ ; ***б*** – фазовая составляющая  $\dot{Z}_{11}$ ;  
 $|Z11(f2)|, \arg(Z11(f2))$  для  $\epsilon_r = 10, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$ ;  
 $|Z12(f2), \arg(Z12(f2))$  для  $\epsilon_r = 20, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$ ;  
 $|Z13(f2), \arg(Z13(f2))$  для  $\epsilon_r = 30, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$

**Рисунок 2.** – Зависимости модуля  $\dot{Z}_{11}$  и его фазы от частоты  $f_2$



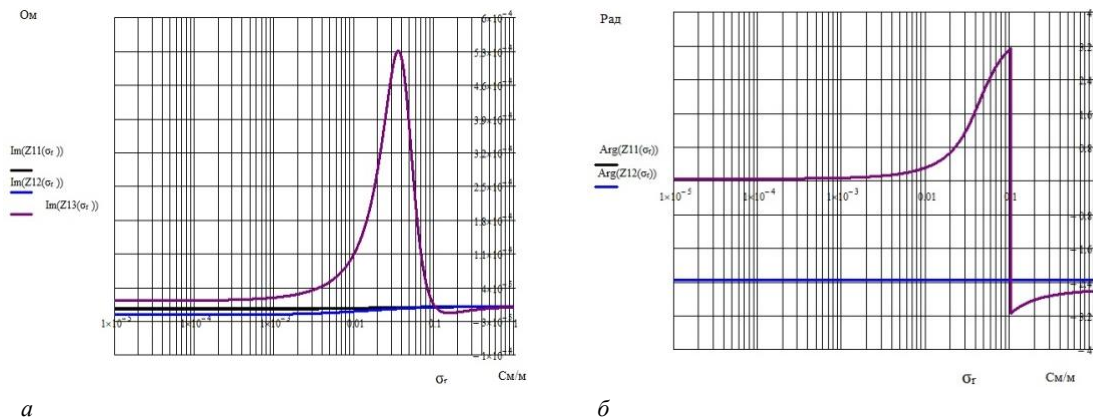
***a*** – модуль  $\dot{Z}_{21}$ ; ***б*** – фазовая составляющая  $\dot{Z}_{21}$ ;  
 $|Z21(f2), \arg(Z21(f2))$  для  $\epsilon_r = 10, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$ ;  
 $|Z22(f2), \arg(Z22(f2))$  для  $\epsilon_r = 20, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$ ;  
 $|Z23(f2), \arg(Z23(f2))$  для  $\epsilon_r = 30, k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$

**Рисунок 3.** – Зависимости модуля  $\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21}$  и его фазы от частоты  $f_2$

Дополнительно были проанализированы зависимости мнимых составляющих и фазовых характеристик компонент поверхностного импеданса при изменении удельной проводимости среды (рисунок 4). Установлено, что низкие значения частоты  $f_2$  не влияют на амплитудную компоненту мнимой составляющей, за исключением  $f_2 = 10^9$  Гц, когда наблюдается резонансный всплеск при значениях проводимости 0,01–0,1 См/м. Аналогично влияние удельной проводимости сказывается на фазе составляющей поверхностного импеданса. Уникальным значением является величина 0,1 См/м, когда происходит скачкообразное изменение фазы от положительных значений до отрицательных.

При определении комбинационных составляющих компонентов диэлектрической проницаемости среды над углеводородами важную роль играют физико-геологические свойства пород-коллекторов,

которые в свою очередь определяются минералогическим и гранулометрическим составом пород, особенностями структурно-текстурного строения скелета. Дополнительно были проанализированы зависимости мнимой составляющей  $\dot{Z}_{21}$  при изменении удельной проводимости среды и модуля  $\dot{Z}_{11}$  при изменении коэффициента отношения амплитуд (рисунок 5). По графикам видно, что низкие значения частот зондирования не влияют ни на амплитудные, ни на фазовые характеристики, за исключением  $f_2 = 10^9$  Гц, когда происходит резкое изменение данных характеристик проводимости с отрицательных (емкостных) на положительные (индуктивные). Точка перехода лежит в районе 0,03–0,04 См/м. При увеличении удельной проводимости происходит уменьшение величины поверхностного импеданса.



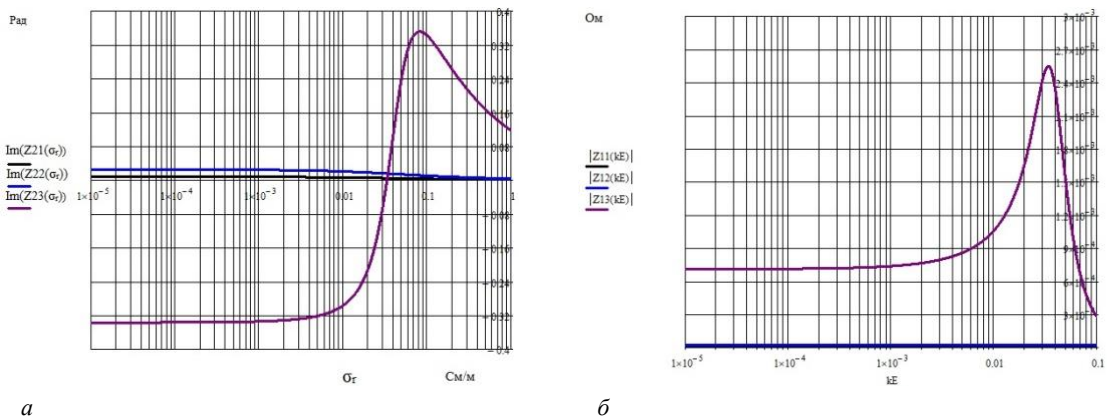
*a* – модуль  $\dot{Z}_{11}$ ; *б* – фазовая составляющая  $\dot{Z}_{11}$ ;

$\text{Im}(Z11(\sigma_r))$ ,  $\text{arg}(Z11(\sigma_r))$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^5$  Гц;

$\text{Im}(Z12(\sigma_r))$ ,  $\text{arg}(Z12(\sigma_r))$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^6$  Гц;

$\text{Im}(Z13(\sigma_r))$ ,  $\text{arg}(Z13(\sigma_r))$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^9$  Гц

Рисунок 4. – Зависимости мнимой составляющей и фазы при изменении удельной проводимости среды



*a* – мнимая составляющая  $\dot{Z}_{11}$ ; *б* – модуль  $\dot{Z}_{11}$ ;

$\text{Im}(Z21(\sigma_r))$ ,  $|Z11(k_E)|$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^5$  Гц;

$\text{Im}(Z22(\sigma_r))$ ,  $|Z12(k_E)|$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^6$  Гц;

$\text{Im}(Z23(\sigma_r))$ ,  $|Z13(k_E)|$  для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$ ,  $f_2 = 10^9$  Гц

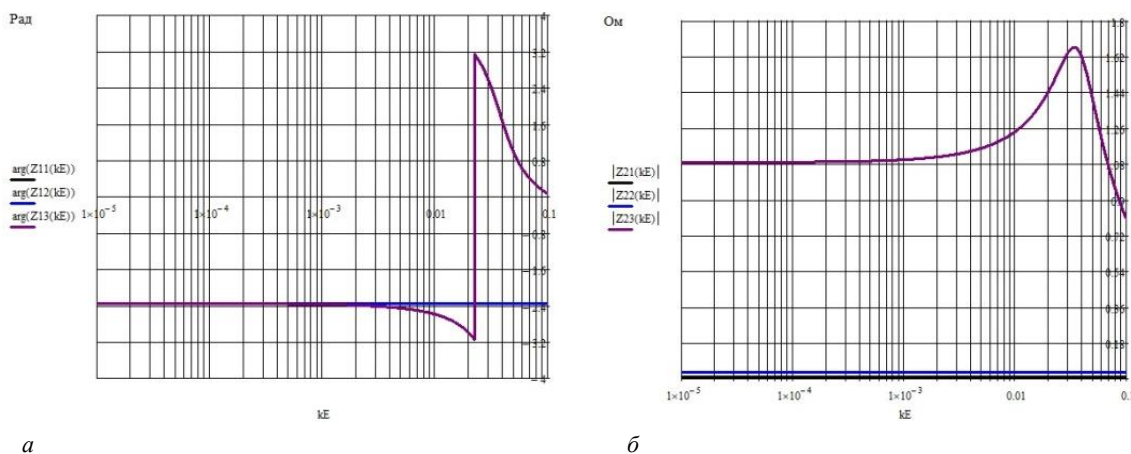
Рисунок 5. – Зависимости поверхностного импеданса

Зондирование анизотропных сред двухчастотными ЭМВ в режимах с правой и левой круговыми поляризациями позволяет повысить производительность методов электроразведки и повысить информативность за счет получения дополнительных данных по исследуемому геологическому профилю местности. Определение диэлектрической проницаемости, удельной проводимости среды и глубины слоя возможно на основании дополнительной априорной информации, получаемой с помощью перемещения передатчика и приемника по территории исследуемого профиля. Процедура диагностики среды над УВЗ осуществляется по методике решения обратной задачи за счет набора конкретных значений расстояний

и конкретизации электродинамических моделей УВЗ с учетом влажности слоев, климатических факторов и особенностей измерений сезонного характера.

Системы поиска на основе двухканальных схем определения комбинационных составляющих позволяют учитывать характер пористости и проницаемости сред, характеристики цементирующих веществ и механические свойства пород скелета, количество пластовой воды в порах, ее минерализацию и ряд других факторов.

Было проанализировано влияние вариации диапазона изменения характеристик зондирующих сигналов (коэффициентов  $k_E$ ), показанных на рисунках 6.



**а** – фазовая составляющая  $\dot{Z}_{21}$ ; **б** – модуль  $\dot{Z}_{21}$ ;

$\arg(Z11(k_E)), |Z21(k_E)|$  для  $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}, f_2 = 10^5$  Гц;

$\arg(Z12(k_E)), |Z22(k_E)|$  для  $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}, f_2 = 10^6$  Гц;

$\arg(Z13(k_E)), |Z23(k_E)|$  для  $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}, f_2 = 10^9$  Гц

**Рисунок 6. – Зависимости поверхностного импеданса**

При значениях  $k_E$  в диапазоне от 0,01 до 0,1 происходит резонансный рост компоненты, свидетельствующий о том, что возможность перестройки системы поиска углеводородов дает возможность повысить информативность методов георазведки углеводородов. Аналогично при таких же значениях коэффициентов отношения амплитуд происходит скачкообразное изменение (рост) величины модуля поверхностного импеданса.

**Закключение.** Проведенный анализ комбинационных составляющих компонентов диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над углеводородами показал следующее:

- частота электронного циклотронного резонанса для режима НЧ взаимодействия лежит в пределах 100–200 кГц, частота электронного плазменного резонанса соответствует 20–100 МГц и для других значений параметров среды может смещаться в диапазон более высоких частот, включая сантиметровый;
- наблюдаются ярко выраженные максимумы модуля поверхностного импеданса  $\dot{Z}_{11}$  среды на частотах 100–400 МГц;
- для компоненты  $\dot{Z}_{21}$  также существуют точки резонансов, выраженные однако не так существенно, как для предыдущего случая. Они характерны для того же диапазона частот 100–400 МГц;
- фазовые характеристики могут быть применены для дифференциации сред, так как они характеризуются скачкообразным ростом фазы;
- влияние удельной проводимости и коэффициентов отношения амплитуд может принести дополнительную информативность методов поиска и выделения УВЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
2. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic) / С.Н. Henke [et al.] // Interpretatio.– 2020. – Vol. 8. – № 4. – P. 15–24.
3. Степуленок, С.В. Взаимодействие амплитудно-частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородными залежами / С.В. Степуленок, В.Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2009. – № 9. – С. 103–108.

4. Time lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles / T. Holten [et al.] // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2016. – Vol. 35. – P. 971–975.
5. Moskvichew, V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
6. Способ радиоволнового зондирования и устройство для его осуществления : пат. RU 2152060 / В.К. Томилин, Г.П. Астафьев, В.И. Луконин. – Опубл. 27.06.2000.
7. Опыт применения электромагнитных зондирований при поисках углеводородов в транзитной зоне Каспийского моря / А.А. Петров [и др.] // Геофизика. – № 2. – 2010. – С. 60–64.
8. Adamovskiy, E. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits / E. Adamovskiy, V. Yanushkevich // 8 Junior researchers conference European and national dimension in research : in 3 p. / PSU. – Novopolotsk : PSU, 2016. – P. 3 : Technology. – P. 179–183.
9. Levashov, S.P. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations [Electronic resource] / S.P. Levashov // 66nd EAGE Conference and Technical Exhibition, Paris, France, 7–10 June 2003. – (CD-ROM Abstracts volume).
10. Маловичко, М.С. Сравнение статистических свойств устанавливаемых электрических полей при морских измерениях / М.С. Маловичко // Геофизика. – 2008. – № 5. – С. 59–64.
11. Frasher, A. Self-potential anomalies as possible indicators in search for oil and gas reservoirs / A. Frasher // 57th EAGE Conf. and Tech. Exhib., Glasgow, 29 May–2 June 1995. – Glasgow, UK. – P. 8.
12. Гололобов, Д.В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала. // Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинин / Доклады БГУИР. – Минск, 2010. – № 6(52). – С. 13–17.
13. Гололобов, Д.В. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмopodobного типа / Д.В. Гололобов, О.В. Орлова, В.Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 98–101.
14. Geldmacher, I. A Fit-for-purpose electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration / I. Geldmacher, K. Strack // GRC Transactions. – 2017. – Vol. 41. – P. 1649–1658.
15. Helwig, S.L. Vertical-vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition / S.L. Helwig, W. Wood, B. Gloux // Geophysical Prospecting. – 2019. – Vol. 67. – № 6. – P. 1582–1594.
16. Anderson, C. An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source / C. Anderson, J. Mattsson // First Break. – 2010. – Vol. 28, iss. 5. – P. 71–75.

Поступила 25.03.2021

## APPLICATION OF TWO-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVES FOR DETERMINING THE PROPERTIES OF A MEDIUM OVER HYDROCARBONS

V. YANUSHKEVICH, S. KALINTSEV, V. BOGUSH

*The article analyzes the application of two-frequency electromagnetic waves using a powerful low-frequency signal to search and delineate the boundaries of hydrocarbon deposits. The characteristics of the anisotropic medium above the deposits were investigated on the basis of the received response from the effect of a two-frequency signal. The real and phase components of the combined elements of the dielectric constant tensor, the absolute, imaginary and phase characteristics of the surface impedance of the medium over hydrocarbons are analyzed. The analysis of the characteristics of the medium over hydrocarbons for electromagnetic waves with right and left circular polarizations is carried out depending on the frequency, the ratio of signal amplitudes and conductivity. It has been established that, based on the amplitude and phase characteristics of the components of the dielectric constant tensor and surface impedance of the medium over hydrocarbons, it is possible to diagnose the media while increasing the productivity of exploration and the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits.*

**Keywords:** hydrocarbon reservoir, electromagnetic wave, dual-frequency signal.

УДК 621.315

## ВРЕМЯ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПЛАСТИНАХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ С ПЛЕНКАМИ ДИАЗОХИНОН-НОВОЛАЧНОГО ФОТОРЕЗИСТА

канд. физ.-мат. наук, доц. С.А. ВАБИЩЕВИЧ, Н.В. ВАБИЩЕВИЧ,

(Полоцкий государственный университет);

канд. физ.-мат. наук Д.И. БРИНКЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доц. В.С. ПРОСОЛОВИЧ,

канд. физ.-мат. наук М.И. ТАРАСИК

(Белорусский государственный университет, Минск)

Время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$  в пластинах монокристаллического кремния с нанесенными на его поверхность пленками диазохинон-новолачного резиста марок ФП9120 и SPR700 измерялось фазовым методом с применением бесконтактной СВЧ-техники трехсантиметрового диапазона. Установлено, что в центре пластины значения времени жизни несколько выше, чем у края. Поверхностное время жизни  $\tau_s$  было ниже объемного  $\tau_v$ . Длительное хранение приводило к снижению времени жизни, наиболее выраженному в случае  $\tau_s$ . Это связано, предположительно, с накоплением в кремниевой пластине быстро-диффундирующих глубоких примесей. Имплантация ионов бора и фосфора приводила к снижению значений  $\tau_v$ , обусловленному нагревом (до  $\sim 70^\circ\text{C}$ ) кремниевой пластины в процессе имплантации. Поверхностное время жизни  $\tau_s$  в процессе облучения  $\gamma$ -квантами дозой выше 1 кГр снижается более интенсивно, чем объемное  $\tau_v$ , что, вероятнее всего, связано с обрывом связей Si–O–C на границе раздела фоторезист/кремний.

**Ключевые слова:** кремний, диазохинон-новолачный резист, время жизни, гамма-облучение.

**Введение.** Время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$  является одним из важнейших электрофизических параметров, определяющих быстродействие полупроводниковых приборов и регламентируемых межгосударственными стандартами [1]. Исследование рекомбинационных свойств предоставляет существенную информацию при изучении дефектов структуры полупроводниковых материалов и структур.

Литография – один из основных технологических процессов микро- и наноэлектроники [2]. Она многократно повторяется на различных стадиях производства. Так, при формировании элементной базы по БИКМОП технологии применяется до 22 операций фотолитографии [3]. Именно технические параметры литографии, ее производительность и экономичность определяют стоимость изделий электроники и эффективность производства. В качестве масок в процессах субмикронной и нанолитографии современной электроники широко используются позитивные двухкомпонентные фоторезисты на базе светочувствительного хинондиазида и новолачной смолы, используемой в качестве основы, – так называемые ДХН-резисты [2; 3]. Хинондиазид является ингибитором растворения новолачной смолы в 0,1–0,3 М щелочном проявителе и разлагается при облучении излучением видимого диапазона [3]. Для снижения времени жизни в полупроводниковых приборах широко используется облучение  $\gamma$ -квантами.

Учитывая вышеизложенное, целью настоящей работы явилось исследование времени жизни неравновесных носителей в пластинах монокристаллического кремния с нанесенными на его поверхность пленками диазохинон-новолачного резиста марок ФП9120, S1813 и SPR-700, а также влияние на указанный параметр  $\gamma$ -облучения.

**Методика эксперимента.** Время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$  измерялось фазовым методом с применением бесконтактной СВЧ-техники трехсантиметрового диапазона [4]. Возможность регистрации параметров полупроводников на СВЧ связана с поглощением электромагнитной энергии свободными носителями заряда или поворотом плоскости поляризации волны, вызванным движением свободных носителей заряда. СВЧ-мощность поступает в измерительный узел и поглощается в полупроводниковом образце вследствие образования резонансной системы «измеряемый участок образца – щель волновода». Синусоидально модулированный оптический луч, сфокусированный на участке образца в месте концентрации СВЧ-энергии, изменяет с частотой модуляции степень поглощения СВЧ-мощности на измеряемом участке образца. С помощью детектора выделяется электрический сигнал, подаваемый после усиления на один из каналов фазометра, на второй канал которого подается опорное напряжение с синусоидального генератора питания светодиода.

В этом случае время жизни определялось из соотношения

$$\tau = \frac{tg \Delta\varphi}{\omega},$$

где  $\Delta\varphi$  – угловой сдвиг между фазами фотопроводимости образца, регистрируемой бесконтактно, и светового потока, возбуждающего фотопроводимость;

$$\omega = 2\pi f,$$

где  $f$  – частота модуляции светового потока.

Модуляция светового потока проводилась с помощью низкочастотного генератора сигналов ГЗ -112/1. Угловой сдвиг фаз  $\Delta\varphi$  регистрировался измерителем разности фаз Ф2-16. При выборе источников оптического возбуждения для измерения времени жизни учитывались следующие обстоятельства: в диапазоне длин волн 360–1000 нм находится окно прозрачности диазохинон-новолачного фоторезиста [5]; край фундаментального поглощения монокристаллического кремния при комнатной температуре ~ 900 нм. Учитывая изложенное выше, для измерения объемного времени жизни  $\tau_v$  использовался светодиод с длиной волны  $\lambda = 950$  нм. Измерение времени жизни  $\tau_s$  приповерхностного слоя кремния осуществлялось на длине волны  $\lambda = 630$  нм.

Пленки диазохинон-новолачного фоторезиста (ФР) марок ФП9120, S1813 и SPR-700 наносились на поверхность монокристаллических пластин кремния марки КЭФ4,5 методом центрифугирования [6]. Толщина пленки резиста  $h_{\text{пл}}$  определялась скоростью вращения пластины и составляла: 1,0 мкм при скорости вращения  $\nu = 8300$  об/мин; ~ 1,8 мкм – при  $\nu = 2900$  об/мин; ~ 2,5 мкм – при  $\nu = 1200$  об/мин. Пленки толщиной  $h = 5,0$  мкм формировались в две стадии при скорости вращения  $\nu = 1800$  об/мин на обеих стадиях. Облучение гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  осуществлялось при комнатной температуре и атмосферном давлении на установке МРХ- $\gamma$ -25М. Мощность поглощенной дозы составляла  $0,12 \pm 0,008$  Гр/с. Интервал поглощенных доз – от 1 до 300 кГр. Имплантация ионами  $\text{P}^+$  (энергия 100 кэВ) и  $\text{V}^+$  (энергия 60 кэВ) дозой  $1 \times 10^{16}$  см $^{-2}$  в режиме постоянного ионного тока (плотность ионного тока 4 мкА/см $^2$ ) проводилась при комнатной температуре на ионно-лучевом ускорителе «Везувий-6» (остаточный вакуум ~  $10^{-5}$  Па).

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** В таблице 1 приведены экспериментальные данные по измерению объемного  $\tau_v$  и поверхностного  $\tau_s$  времен жизни неосновных носителей заряда в пластинах кремния с нанесенными на их поверхность пленками диазохинон-новолачных фоторезистов различных марок. В статье используется терминология в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 22622-77. Измерения проводились как со стороны фоторезистивного слоя, так и с обратной (так называемой «нерабочей») стороны. Образцы № 5–8 перед измерениями хранились длительное время (более года), а образцы № 1–4 измерялись не позднее месяца после изготовления.

Таблица 1. – Объемное  $\tau_v$  и поверхностное  $\tau_s$  времена жизни неосновных носителей заряда в пластине кремния марки КЭФ-4,5 при освещении со стороны фоторезиста и с обратной стороны

№ образца	Положение на пластине	Марка ФР	Толщина ФР, мкм	$\tau_v$ , мкс	$\tau_v$ , мкс	$\tau_s$ , мкс	$\tau_s$ , мкс
				со стороны ФР	с обратной стороны	со стороны ФР	с обратной стороны
1	край	ФП9120	1,8	77	69	72	68
	центр			103	93	96	82
2	край	SPR 700	1,2	95	74	90	71
	центр			101	94	96	81
3	край	SPR 700	1,8	9,0	3,5	8,7	< 1
	центр			11,3	8,7	10,8	< 1
4	край	S1813	1,8	6,1	5,9	< 1	< 1
	центр			7,7	7,1	< 1	< 1
5	край	ФП9120	1,0	14,0	12,9	< 1	< 1
	центр			13,1	13,0	< 1	< 1
6	край	ФП9120	1,8	14,0	13,1	< 1	< 1
	центр			13,1	13,0	< 1	< 1
7	край	ФП9120	2,5	11,1	11,0	< 1	< 1
	центр			12,1	11,8	< 1	< 1
8	край	ФП9120	5,0	9,6	9,6	< 1	< 1
	центр			10,5	9,8	< 1	< 1

В центре пластины значения времени жизни несколько выше. Особенно это заметно для образцов 1 и 2 с высоким временем жизни. Существенной зависимости величин  $\tau_v$  и  $\tau_s$  от марки фоторезиста не обнаружено (сравн. образцы 1 и 2 таблицы 1). Толщина пленки фоторезиста также не оказывала заметного влияния на значения времени жизни. Следует отметить, что как объемное  $\tau_v$ , так и поверхностное  $\tau_s$  времена жизни при измерении с обратной стороны пластины были несколько ниже, чем при измерении с рабочей стороны с нанесенной пленкой фоторезиста. Вероятнее всего, это обусловлено большей

шероховатостью обратной стороны пластины, что приводит к более высокой концентрации дефектов и, соответственно, к снижению времени жизни.

Поверхностное время жизни  $\tau_s$  практически для всех образцов было ниже объемного  $\tau_v$ . Особенно отчетливо это проявлялось при измерении со стороны фоторезиста в образцах № 1 и 2, имеющих высокое время жизни (см. таблицу 1). Это обусловлено тем, что в приповерхностной области концентрация дефектов и примесей с глубокими уровнями существенно выше, чем в объеме полупроводника.

В свежеприготовленных образцах время жизни было несколько выше, чем в хранившихся длительное время. На наш взгляд, снижение измеренных значений времени жизни в длительно хранившихся образцах обусловлено накоплением в кремниевой пластине быстродиффундирующих глубоких примесей. На это указывает то, что поверхностное время жизни  $\tau_s$  при хранении снижалось до значений ниже предела детектирования применявшейся методики 1 мкс. По нашему мнению, основным параметром, определяющим величины времен жизни  $\tau_v$  и особенно  $\tau_s$ , является обработка (очистка) пластин перед нанесением пленки фоторезиста. Об этом свидетельствует сравнение образцов 2 и 3, наиболее наглядно проявившееся при измерении с обратной стороны, на которой не было пленки фоторезиста. С обратной стороны  $\tau_s$  в этих образцах различались на 2 порядка. Вероятнее всего, это связано с качеством очистки поверхности пластины от загрязнений.

На следующем этапе было исследовано влияние внешних воздействий – ионной имплантации в слой фоторезиста толщиной 5 мкм (таблица 2) и  $\gamma$ -облучения. Отметим, что проецированный пробег ионов бора и фосфора в слое фоторезиста составлял  $\sim 400$  мкм, т.е. ионы заведомо не достигали границы раздела фоторезист/кремний. Небольшое снижение значений  $\tau_v$  в имплантированных образцах по сравнению с исходным обусловлено, вероятнее всего, влиянием нагрева (до  $\sim 70$  °С) кремниевой пластины в процессе имплантации. Влияние на измерение  $\tau_v$  карбонизированного в результате ионной имплантации слоя полимера, по-видимому, незначительно, поскольку аналогичные изменения значений времени жизни наблюдались при измерении с обратной стороны пластины, на которой не было пленки фоторезиста.

Таблица 2. – Объемное  $\tau_v$  и поверхностное  $\tau_s$  времена жизни неосновных носителей заряда в пластине кремния марки КЭФ4,5 при освещении со стороны фоторезиста ФП9120 толщиной 5,0 мкм и с обратной стороны пластины. Имплантация дозой  $1 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> осуществлялась со стороны фоторезиста

Образец	$\tau_v$ , мкс	$\tau_v$ , мкс	$\tau_s$ , мкс	$\tau_s$ , мкс
	со стороны ФР	с обратной стороны	со стороны ФР	с обратной стороны
Исходный	7,0	6,5	< 1	< 1
Имплантированный P <sup>+</sup>	4,0	3,9	< 1	< 1
Имплантированный B <sup>+</sup>	4,9	4,5	< 1	< 1

Высокое время жизни ( $\sim 100$  мкс), пригодное для исследования влияния  $\gamma$ -облучения, имели только образцы, вырезанные с пластин № 1 и 2 (см. таблицу 1). На рисунках 1–3 представлены изменения в процессе  $\gamma$ -облучения обратного времени жизни  $\Delta(1/\tau) = 1/\tau_{\text{обл}} - 1/\tau_{\text{исх}}$ , где  $\tau_{\text{исх}}$  – значения времени жизни в исходных пластинах,  $\tau_{\text{обл}}$  – то же после облучения образцов, вырезанных из центра этих пластин. Во всех случаях время жизни неосновных носителей заряда после облучения снижалось, а значения  $1/\tau$ , соответственно, возрастали. При дозах  $\sim 2 - 4$  кГр значения  $1/\tau_{\text{обл}}$  выходят на насыщение и в дальнейшем изменяются слабо.

На рисунке 1 показано изменение в процессе облучения обратного поверхностного  $1/\tau_s$  (линия 1) и объемного  $1/\tau_v$  (линия 2) времен жизни при измерении со стороны пленки фоторезиста. Снижение поверхностного времени жизни  $\tau_s$  при дозах  $\Phi \leq 1$  кГр менее выражено по сравнению с объемным  $\tau_v$ . Однако при увеличении дозы картина иная. При  $\Phi > 1$  кГр  $\gamma$ -облучение более интенсивно влияет на величину поверхностного времени жизни – зависимость  $\Delta(1/\tau)$  от  $\Phi$  для поверхностного  $\tau_s$  лежит выше, чем для объемного времени жизни  $\tau_v$  для обеих марок фоторезиста (см. рисунок 1). Это указывает на то, что дефектообразование вблизи границы раздела фоторезист/кремний вне зависимости от марки фоторезиста протекает более интенсивно, чем в объеме полупроводника.

Следует также отметить более высокую устойчивость к облучению границы раздела фоторезист/кремний по сравнению с границей раздела воздух/кремний. На рисунках 3, а, б кривые дозовых зависимостей поверхностного времени жизни  $\Delta(1/\tau_s)$ , измеренные со стороны фоторезиста, при всех использованных дозах лежат ниже тех же зависимостей, измеренных с обратной стороны пластины (граница раздела воздух/кремний). Марка фоторезиста не оказывала существенного влияния (сравн. рисунок 3, а и б). Для объемного времени жизни  $\tau_v$  различия между измерениями со стороны фоторезиста и с обратной стороны пластины слабо выражены для обеих марок фоторезистов (рисунок 2, а, б). Это свидетельствует

о том, что радиационная трансформация пленки диазохинон-новолачных резистов оказывает на измерение времени жизни существенно меньшее влияние, чем процессы у границы раздела фоторезист/кремний.

Объяснить полученные экспериментальные результаты можно, принимая во внимание следующее. В работах [7–9] методами микротвердости и измерения спектров нарушенного полного внутреннего отражения показано, что облучение  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  приводит к снижению адгезии диазохинон-новолачного фоторезиста к кремнию, обусловленному разрывом связей Si–O–C на границе раздела фоторезист/кремний, в результате чего могут образовываться рекомбинационно-активные центры. Указанное обстоятельство может приводить к дополнительному снижению величины поверхностного времени жизни  $\tau_s$  в процессе облучения [9; 10].

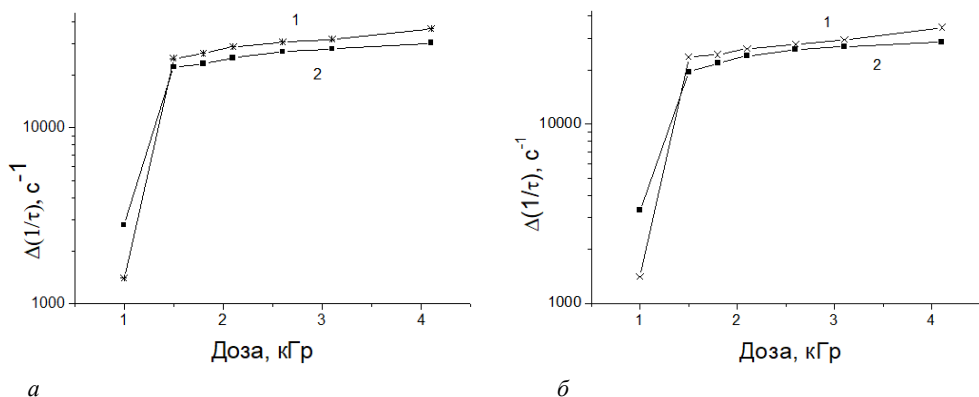


Рисунок 1. – Дозовые зависимости обратного поверхностного  $1/\tau_s$  (1) и объемного  $1/\tau_v$  (2) времен жизни, измеренных со стороны пленок фоторезиста марок ФП9120 (а) и SPR700 (б)

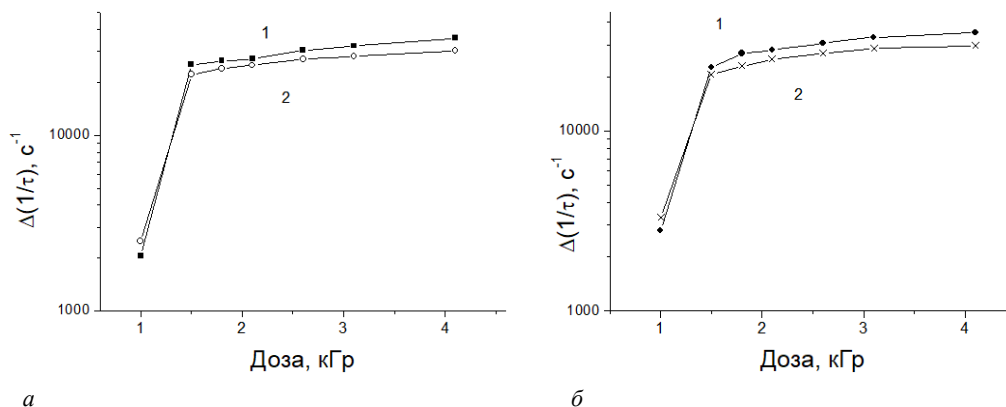


Рисунок 2. – Дозовые зависимости обратного объемного  $1/\tau_v$  времени жизни, измеренного с обратной стороны пластины (1) и со стороны пленок фоторезиста (2) марок ФП9120 (а) и SPR700 (б)

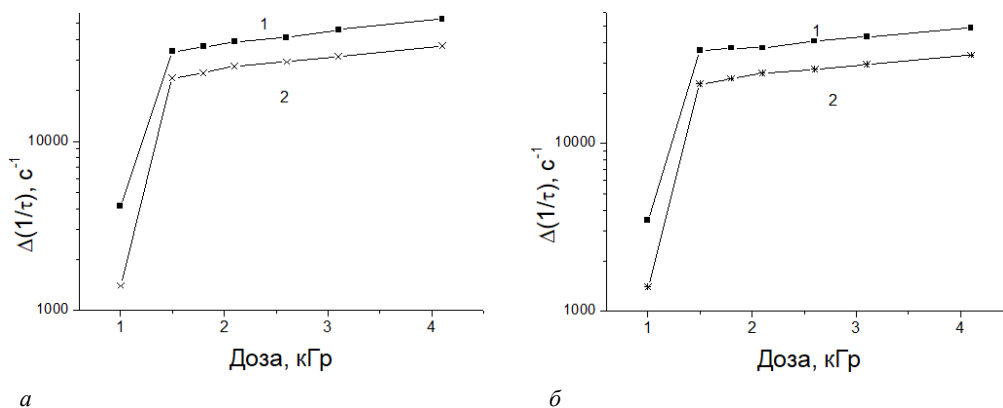


Рисунок 3. – Дозовые зависимости обратного поверхностного  $1/\tau_s$  времени жизни, измеренного с обратной стороны пластины (1) и со стороны пленок фоторезиста (2) марок ФП9120 (а) и SPR700 (б)



**Заключение.** Таким образом, при исследовании времени жизни неосновных носителей заряда в пластинах кремния с пленками фоторезистов марок ФП9120 и SPR700 установлено, что в центре пластины значения времени жизни несколько выше, чем у края. Поверхностное время жизни  $\tau_s$  было ниже объемного  $\tau_v$ . Длительное хранение приводит к снижению времени жизни, наиболее выраженному в случае  $\tau_s$ . Это связано, предположительно, с накоплением в кремниевой пластине быстродиффундирующих глубоких примесей. Имплантация ионов бора и фосфора приводила к снижению значений  $\tau_v$ , обусловленному, вероятнее всего, нагревом (до  $\sim 70$  °С) кремниевой пластины в процессе имплантации. Поверхностное время жизни  $\tau_s$  в процессе облучения  $\gamma$ -квантами дозой выше 1 кГр снижается более интенсивно, чем объемное  $\tau_v$ , что, вероятнее всего, связано с обрывом связей Si–O–C на границе раздела фоторезист/кремний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Диоды полупроводниковые. Методы измерения эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда : ГОСТ 18986.7-73. – М. : Издательство стандартов, 1973. – 6 с.
2. Моро, У. Микролитграфия. Принципы, методы, материалы : в 2-х ч. / У. Моро. – М. : Мир, 1990. – 632 с. – Ч. 2.
3. Ионная имплантация позитивных фоторезистов / Д.И. Бринкевич [и др.] // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 193–199.
4. Бураков, А.В. Бесконтактный измеритель времени жизни неравновесных носителей заряда / А.В.Бураков, С.Н. Якубеня, А.М.Янченко // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – № 4. – С. 226.
5. Радиационно-стимулированная трансформация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионов сурьмы / А.А. Харченко [и др.] // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2020. – № 6. – С. 14–18.
6. Модификация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионами бора и фосфора / Д.И. Бринкевич [и др.] // Микроэлектроника – 2019. – Т. 48, № 3. – С. 235–239.
7. Mechanism of the Adhesive Interaction of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films with Monocrystalline Silicon / S.D. Brinkevich [et al.] // J. of Applied Spectroscopy. – 2020. – Vol. 87, № 4. – P. 647–651. – DOI 10.1007/s10812-020-01049-4.
8. Физико-механические свойства облученных пленок диазохинон-новолачного фоторезиста на кремнии / С.А. Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2020. – № 12. – С. 60–64.
9. Radiation-Induced Processes in Diazoquinone–Novolac Resist Films under Irradiation with  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -Rays / S.D. Brinkevich [et al.] // High Energy Chemistry. – 2021. – Vol. 55, № 1. – P. 65–74.
10. Адгезионные и прочностные свойства пленок диазохинон-новолачного фоторезиста на кремнии, облученных гамма-квантами / С.А. Вабищевич [и др.] // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 окт. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 161–166.

Поступила 18.05.2021

**THE LIFETIME OF CHARGE CARRIERS IN PLATES OF SINGLE CRYSTALLINE SILICON WITH FILMS OF A DIAZOQUINON-NOVOLAC PHOTORESIST**

**S. VABISHCHEVICH, N. VABISHCHEVICH,  
D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH, M. TARASIK**

*The lifetime of nonequilibrium charge carriers  $\tau$  in monocrystalline silicon wafers with films of diazoquinone-novolac resist FP9120 and SPR700 deposited on its surface was measured by the phase method using contactless microwave technology in the three-centimeter range. It was found that the lifetime values at the center of the plate are slightly higher than at the edge. The surface lifetime  $\tau_s$  was lower than the bulk lifetime  $\tau_v$ . Long-term storage led to a decrease in the lifetime, which was most pronounced in the case of  $\tau_s$ . This is presumably due to the accumulation of fast-diffusing deep impurities in the silicon wafer. The implantation of boron and phosphorus ions led to a decrease in the values of  $\tau_v$  due to heating (up to  $\sim 70$  °С) of the silicon wafer during implantation. The surface lifetime  $\tau_s$  during irradiation with  $\gamma$ -quanta with a dose higher than 1 kGy decreases more intensively than the bulk  $\tau_v$ , which is most likely due to the breaking of Si–O–C bonds at the photoresist/silicon interface.*

**Keywords:** silicon, diazoquinone-novolac resist, lifetime, gamma irradiation.

УДК 621.371: 550.837.6

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ РЕЖИМЫ ЗОНДИРОВАНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ДВУХЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОИСКА УГЛЕВОДОРОДОВ**

*канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, С.Н. АБРАМЕНКО, С.В. КАЛИНЦЕВ  
(Полоцкий государственный университет)  
д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. БОГУШ  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

*Приводится анализ воздействия двухчастотных электромагнитных волн в режиме мощного высокочастотного сигнала на анизотропную среду над углеводородами. Исследованы компоненты тензоров диэлектрической проницаемости среды над залежами. Предложено внедрение различных методов и аппаратуры для поиска углеводородов на основе анализа вещественных и фазовых составляющих комбинированных элементов тензора диэлектрической проницаемости среды над углеводородами. Исследованы характеристики среды над углеводородами для электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями в зависимости от частоты, коэффициента отношения амплитуд сигналов и удельной проводимости. Рекомендованы режимы зондирования анизотропных сред над углеводородами для повышения производительности геологоразведочных работ и точности определения границ залежей углеводородов.*

**Ключевые слова:** углеводородная залежь, электромагнитная волна, двухчастотный сигнал.

**Введение.** В настоящее время разработка методов поиска и оконтуривания углеводородных залежей (УВЗ) на основе анализа электрофизических и электрохимических процессов над анизотропными средами, образующимися над скоплениями нефти и газа (углеводородов) предполагает построение электродинамической модели среды и нахождение отклика на воздействие зондирующих сигналов [1; 2]. Аналогия исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием позволяет использовать для изучения взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ существующие решения при изучении плазмы и плазмоподобных сред на основе квазигидродинамического подхода с использованием многочастичных электронно-ионных токов и феноменологически заданных частот столкновений. Выбор метода георазведки определяет методику проведения натуральных испытаний и повышает точность определения границ и уровень идентификации месторождений УВЗ [3].

Различные модификации способов вертикального зондирования находят широкое применение для поиска углеводородов [4]. Тенденции развития поисковой геофизики направлены на решение задач внедрения эффективных методов георазведки с высоким уровнем точности и достоверности обнаружения месторождений УВЗ [5]. Данные методы электромагнитной разведки содержат уникальную информацию об установленных на данный момент сведениях о характеристиках электромагнитных полей над УВЗ. Активное внедрение различных методов и аппаратуры для поиска углеводородов обусловлено научным и практическим интересами по решению данных задач для создания надежного инструмента при поиске, оконтуривании и идентификации залежей нефти и газа с помощью электромагнитных методов георазведки [6]. Современное состояние науки и техники дает оценку возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах [7].

Исследование компонентов составляющих поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ с учетом влияния на самый верхний слой от всех ниже расположенных слоев проведено в работе [8]. Сейсмические методы с учетом совершенствования и разработки новых методик поиска углеводородов являются актуальным направлением в современной поисковой геофизике [9]. Реализация этих методов на практике обусловлена их высокой информативностью. Методы исследования свойств объектов при морских измерениях, основанные на сравнении статистических свойств устанавливаемых электрических полей, предполагают получение необходимой информации для различения сред [10]. Для определения свойств геологического профиля местности широко используется метод на основе выявления аномалий поля в анизотропной среде [11]. Активно применяются на практике способы для решения задач электроразведки [12]. Использование амплитудно-модулированных сигналов и модификации на основании этого способов поиска УВЗ построены на обнаружении месторождений углеводородов по регистрации амплитудных и фазовых компонент поверхностного импеданса геологического профиля [13]. Универсальные способы для мониторинга коллектора и геотермальных исследований применяются в поисковой геофизике для решения задач электроразведки [14]. Различные модификации способов и аппаратуры для вертикального зондирования находят широкое применение для поиска углеводородов [15]. Совместная инверсия морских магнитотеллурических и гравиметрических данных с учетом сейсмических ограничений используется в современных системах поиска полезных ископаемых [16]. Применение для поиска УВЗ методов радиокомплексирования [17] приводит к расширению функциональных зависимостей диэлектрической

проницаемости среды над углеводородами от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

**Взаимодействие ЭМВ со средой над УВЗ.** Распространение двухчастотных ЭМВ в среде над УВЗ рассмотрено в работе [2]. Вместе с тем для реализации новых методов георазведки представляет интерес анализ процесса взаимодействия двухчастотных ЭМВ с анизотропными средами в режиме мощного высокочастотного (ВЧ) сигнала. Компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды в данном режиме имеют вид [2]

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_2}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left( \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_2}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 v_i^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_2^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 v_i^2} \right] \right), \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 v_i^2} - \frac{2j\tilde{\omega}_2 v_i \omega_{\Pi i} \omega_{\Gamma i}}{[(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 v_i^2] \omega_2} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_2}{\omega_2} - \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_2}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_2^2} - j \left[ \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_2^2 + v_i^2} \right] \right\}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$  – компоненты тензора;

$\tilde{\omega}_2$  – частотная составляющая, характеризующая режим ВЧ зондирования;

$\omega_{\Pi i}$  – плазменная частота;

$\omega_{\Gamma i}$  – гиротропная частота;

$v_i$  – частота столкновения частиц;

$\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\sigma_r$  – проводимость среды;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

$\alpha = \omega_2 - \omega_1 = \omega_2(1 - k_\omega)$  – разность частот двух ЭМВ с амплитудами и частотами  $A_1, A_2, \omega_1, \omega_2$ .

Режимы измерений задаются коэффициентами соотношения амплитуд двух волн и их частот

$$k_E = \frac{A_2}{A_1}, \quad k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (2)$$

для режима ВЧ выбираются коэффициенты

$$\begin{cases} k_E \gg 1, \\ k_\omega \ll 1. \end{cases} \quad (3)$$

Проводился анализ комбинационных составляющих тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для параметров среды над залежами углеводородов [1]:

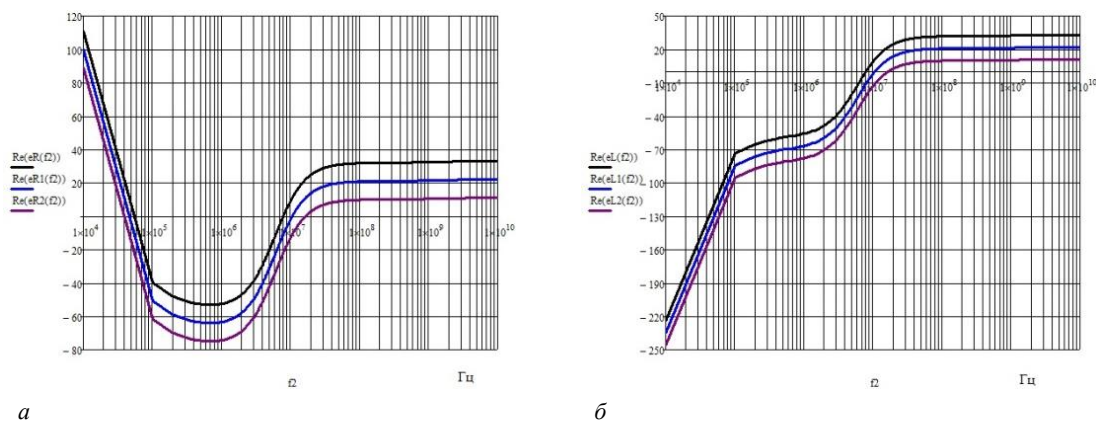
– значений диэлектрической проницаемости вмещающих пород  $\epsilon_r = 1 - 30$  и электрической проводимости  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1$  См/м;

– концентрации частиц  $N_e = N_n = (10^{16} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$ ;

– частоты столкновения частиц  $v = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$  рад/с.

**Результаты исследований.** Проведен анализ выражений (1) для компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ. Вещественные значения для компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями приведены на рисунке 1. Как видно из рисунка 1, на частотах  $f_{2\Pi}$  и  $f_{2\Pi}$ , соответствующих электронному циклотронному и электронному плазменному резонансам, вещественная составляющая  $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$  имеет две точки перехода через нуль. Частота электронного циклотронного резонанса лежит в пределах 30–50 кГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она смещается вправо по оси абсцисс. Частота электронного плазменного резонанса соответствует 8–20 МГц и с увеличением диэлектрической проницаемости также уменьшается. Таким образом, в данном режиме зондирования для принятых значений параметров среды следует выделить частотный диапазон высокочастотной составляющей 30 кГц – 20 МГц, где  $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$  является отрицательной. Вещественная составляющая разностной компоненты переходит через нуль в диапазоне частот 8–20 МГц. Увеличение диэлектрической проницаемости среды смещает данную точку влево. В диапазоне низких частот данная компонента отрицательна и на частотах более 20 МГц постоянна. Значения составляющих тензора анизотропной среды над углеводородами зависят от физико-химических процессов

в самой залежи и условий залегания (значения давления и температуры), влияющих на электрические свойства вмещающих пород и сред над УВЗ, поэтому частота электронного плазменного резонанса может смещаться в область 100 МГц – 1 ГГц.



**а** – действительная часть суммарной компоненты; **б** – действительная составляющая разностной компоненты;

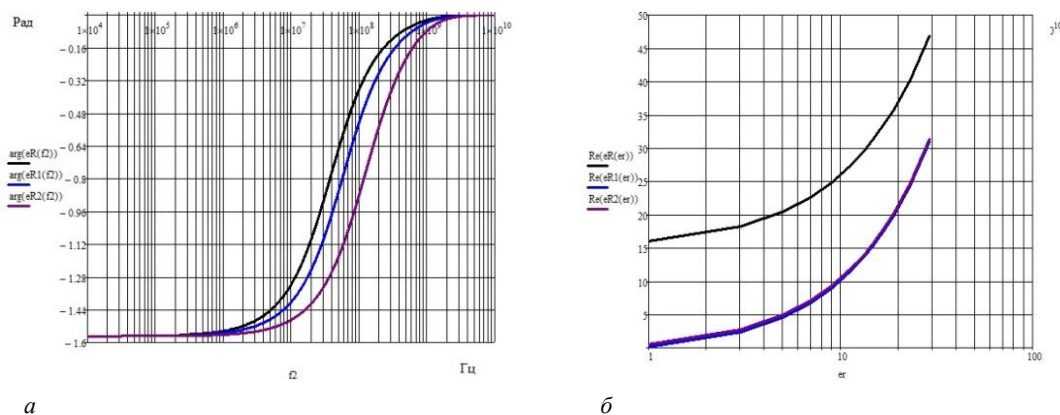
$\text{Re}(eR(f_2)), \text{Re}(eL(f_2))$  для  $\varepsilon_r = 30, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10$ ;

$\text{Re}(eR1(f_2)), \text{Re}(eL1(f_2))$  для  $\varepsilon_r = 20, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10$ ;

$\text{Re}(eR2(f_2)), \text{Re}(eL2(f_2))$  для  $\varepsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10$

**Рисунок 1.** – Зависимости компонентов тензора от частоты  $f_2^1$

Фазовые и амплитудные характеристики для составляющей с правой поляризацией ЭМВ для двухчастотных сигналов приведены на рисунке 2. Наблюдается рост фазовой составляющей на частотах 1 МГц – 1 ГГц. С увеличением значения диэлектрической проницаемости среды частота увеличения фазы смещается влево. Фазовые характеристики суммарной компоненты не меняются в диапазоне частот 10 кГц – 1 МГц и на участке 1 ГГц – 10 ГГц. Значения суммарной компоненты с ростом диэлектрической проницаемости увеличиваются, причем с ростом значений высокочастотной компоненты происходит уменьшение значений вещественной составляющей.



**а** – фазовая часть суммарной компоненты; **б** – действительная составляющая суммарной компоненты;

$\text{arg}(eR(f_2))$  – для  $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, \varepsilon_r = 30, \text{Re}(eR(er))$  для  $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, f_2 = 10^5$  ГГц;

$\text{arg}(eR1(f_2))$  – для  $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, \varepsilon_r = 20, \text{Re}(eR1(er))$  для  $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, f_2 = 10^7$  ГГц;

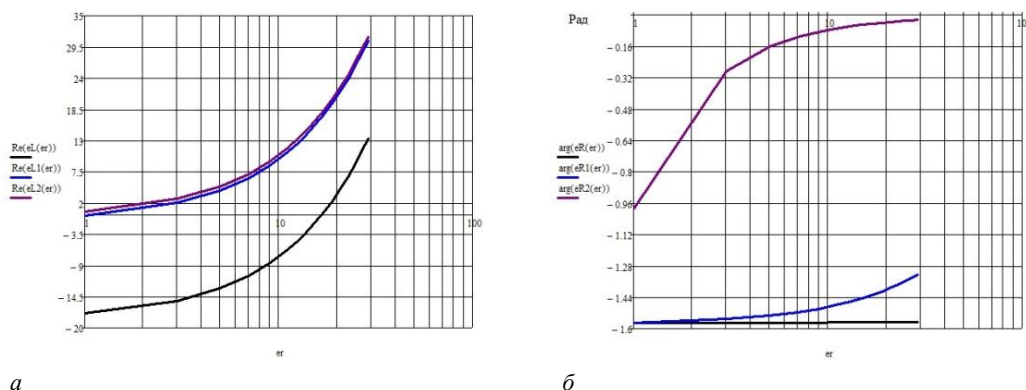
$\text{arg}(eR2(f_2))$  – для  $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, \varepsilon_r = 10, \text{Re}(eR2(er))$  для  $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, f_2 = 10^9$  ГГц

**Рисунок 2.** – Зависимости вещественной составляющей суммарной компоненты

Дополнительно были проанализированы амплитудные и фазовые составляющие компонент среды над УВЗ для левой и правой поляризации (рисунок 3). Закон изменения вещественной составляющей для левой поляризации ЭМВ такой же, как и для правой, только с ростом значений высокочастотной компоненты происходит увеличение значений вещественной составляющей. Фаза для ЭМВ с правой

<sup>1</sup> Здесь и далее на рисунках  $k_\omega = k_w$ .

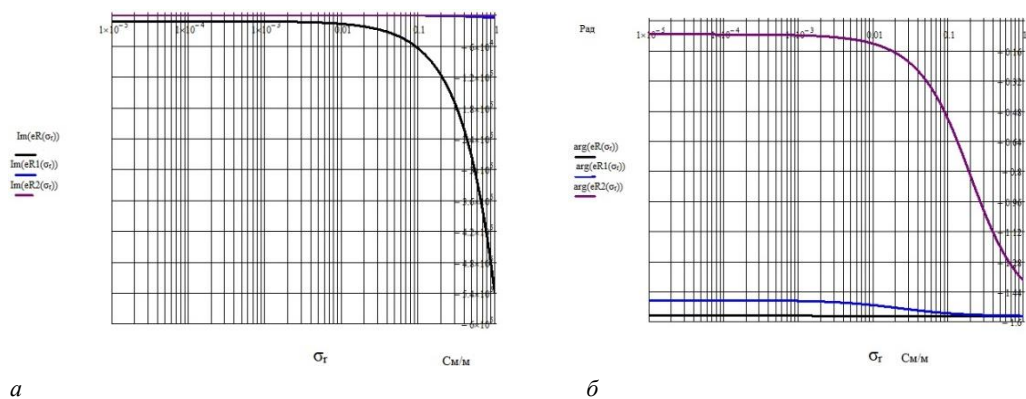
поляризацией увеличивается при увеличении диэлектрической проницаемости наполнителя вмещающих пород над УВЗ. Увеличение частоты зондирования дает большую информативность методов поиска.



***a*** – действительная часть разностной компоненты; ***б*** – фазовая составляющая суммарной компоненты;  
 $\text{Re}(eL(er)), \text{arg}(eR(er))$  для  $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, f_2 = 10^5 \text{ Гц}$ ;  
 $\text{Re}(eL1(er)), \text{arg}(eR1(er))$  для  $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, f_2 = 10^7 \text{ Гц}$ ;  
 $\text{Re}(eL2(er)), \text{arg}(eR2(er))$  для  $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, f_2 = 10^9 \text{ Гц}$

**Рисунок 3.** – Зависимости вещественной составляющей компонент ЭМВ от диэлектрической проницаемости

Проведено моделирование зависимостей мнимых составляющих и фазовых характеристик компонент суммарной составляющей от удельной проводимости среды (рисунок 4). Установлено, что низкие значения частоты  $f_2$  влияют на амплитудную компоненту мнимой составляющей при значениях проводимости 0,01–1 См/м. Аналогично влияние удельной проводимости сказывается на фазе составляющей правой поляризации. В данном диапазоне значений проводимостей происходит резкое изменение фазы при частоте сигнала  $f_2 = 10^9 \text{ Гц}$ .

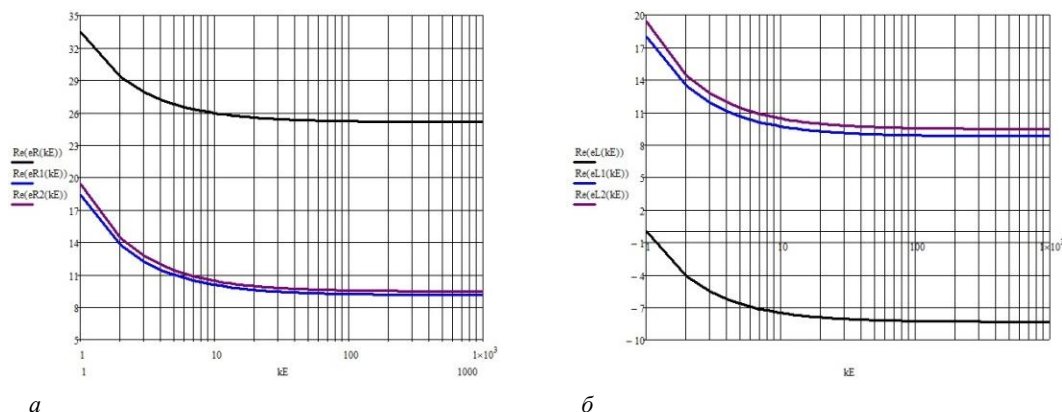


***a*** – мнимая составляющая; ***б*** – фазовая составляющая;  
 $\text{Im}(eR(\sigma_r)), \text{arg}(eR(\sigma_r))$  для  $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, f_2 = 10^5 \text{ Гц}$ ;  
 $\text{Im}(eR1(\sigma_r)), \text{arg}(eR1(\sigma_r))$  для  $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, f_2 = 10^6 \text{ Гц}$ ;  
 $\text{Im}(eR2(\sigma_r)), \text{arg}(eR2(\sigma_r))$  для  $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10, f_2 = 10^9 \text{ Гц}$

**Рисунок 4.** – Зависимости мнимой составляющей и фазы при изменении удельной проводимости среды

Зондирование анизотропных сред двухчастотными ЭМВ в режимах с правой и левой круговыми поляризациями позволяет исследовать физико-геологические свойства пород-коллекторов, минералогический и гранулометрический состав пород, структурно-текстурное строение скелетов. Дополнительная априорная информация получается с помощью перемещения передатчика и приемника по территории исследуемого профиля. При определении комбинационных составляющих компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородами повышаются производительность методов электроразведки и информативность за счет получения дополнительных данных по исследуемому геологическому профилю местности. Процедура диагностики среды над УВЗ осуществляется по методике решения обратной задачи за счет набора конкретных значений расстояний и конкретизации электродинамических моделей УВЗ с учетом влажности слоев, климатических факторов и особенностей измерений сезонного характера.

Системы поиска на основе двухканальных схем определения комбинационных составляющих позволяют использовать характеристики сигналов согласно рисунку 5. Представляет интерес отрезок значений коэффициента отношения амплитуд 1–10. Вариация данного параметра одинаково влияет и на суммарную компоненту и на разностную с тем лишь отличием, что с ростом частоты зондирования характер изменения компонент противоположный. Данное обстоятельство позволяет учитывать характер пористости и проницаемости анизотропных сред, характеристики и виды цементирующих веществ, механические свойства пород скелетов, процент пластовой воды в порах, ее минерализацию и ряд других факторов.



а

б

**а** – действительная часть суммарной компоненты; **б** – действительная составляющая разностной компоненты;

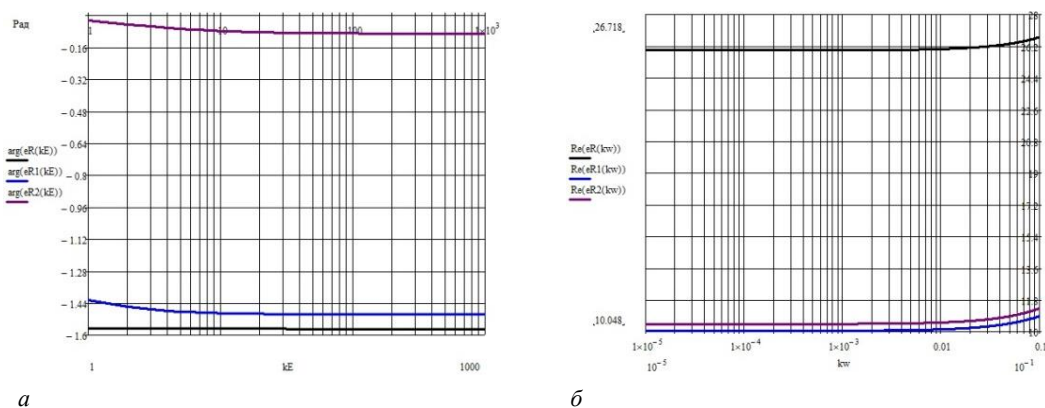
**Re(eR(kE)), Re(eL(kE))** для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $f_2 = 10^5$  Гц;

**Re(eR1(kE)), Re(eL1(kE))** для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $f_2 = 10^7$  Гц;

**Re(eR2(kE)), Re(eL2(kE))** для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $f_2 = 10^9$  Гц

**Рисунок 5.** –Зависимости вещественной составляющей компонент ЭМВ от коэффициента отношения амплитуд

Было проанализировано влияние вариации диапазона изменения характеристик зондирующих сигналов (коэффициентов  $k_E$  и  $k_\omega$ ), показанных на рисунках 6.



а

б

**а** – фазовая часть суммарной компоненты; **б** – действительная составляющая суммарной компоненты;

**arg(eR(kE)), Re(eR(kw))** для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $f_2 = 10^5$  Гц;

**arg(eR(kE)), Re(eR(kw))** для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $f_2 = 10^7$  Гц;

**arg(eR(kE)), Re(eR(kw))** для  $\varepsilon_r = 10$ ,  $f_2 = 10^9$  Гц

**Рисунок 6** – Зависимости вещественной составляющей суммарной компоненты

При значениях  $k_E = 1-10$  и  $k_\omega = 0,01-0,1$  происходят изменения вещественной составляющей суммарной компоненты, свидетельствующие о том, что возможность перестройки системы поиска углеводородов дает возможность повысить информативность методов георазведки углеводородов.

**Заключение.** Проведенный анализ комбинационных составляющих компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородами показал следующее:

– частота электронного циклотронного резонанса в режиме ВЧ зондирования лежит в пределах 30–50 кГц, причем с ростом диэлектрической проницаемости она смещается вправо по оси абсцисс,

частота электронного плазменного резонанса соответствует 8–20 МГц и с увеличением диэлектрической проницаемости также уменьшается;

- вещественная составляющая компоненты для левой поляризации ЭМВ переходит через нуль в диапазоне частот 8–20 МГц;
- наблюдается рост фазовой составляющей для правой поляризации ЭМВ на частотах 1МГц – 1ГГц;
- влияние удельной проводимости и коэффициентов отношения амплитуд может обеспечить дополнительную информативность методов поиска и выделения УВЗ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Moskvichew, V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
2. Янушкевич, В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич. – Новополоцк : ПГУ, 2017. – 232 с.
3. Anderson, C. An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source / C. Anderson, J. Mattsson // First Break. – 2010. – Vol. 28, iss. 5. – P. 71–75.
4. Time lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles / T. Holten [et al.] // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2016. – Vol. 35. – P. 971–975.
5. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic) / C.H. Henke [et al.] // Interpretation. – 2020. – Vol. 8. – № 4. – P. 15–24.
6. Степуленок, С.В. Взаимодействие амплитудно-частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородными залежами / С.В. Степуленок, В.Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2009. – № 9. – С. 103–108.
7. Оценка возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах. Оптика атмосферы и океана / Н.И. Ковалев [и др.] // Добыча, подготовка, транспортировка нефти и газа : материалы III Всерос. конф., Томск, 20–24 сент. 2004 г. / Ин-т оптики атмосферы СО РАН. – Томск, 2004. – С. 67–70.
8. Adamovskiy, E. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits / E. Adamovskiy, V. Yanushkevich // 8 Junior researchers conference European and national dimension in research. In 3 Parts. – Part 3. TECHNOLOGY. – PSU, Novopolotsk, 2016. – V. 179–183.
9. Сейсмические методы при разведке полезных ископаемых и планировании горных работ – Введение / А. Малехмир [и др.] // Геофизика. – 2012 г. – DOI: 10.1190 / 2012-0724-SPSEIN.1.
10. Маловичко, М.С. Сравнение статистических свойств устанавливаемых электрических полей при морских измерениях / М.С. Маловичко // Геофизика. – 2008. – № 5. – С. 59–64.
11. Frasheri, A. Self-potential anomalies as possible indicators in search for oil and gas reservoirs / A. Frasheri // 57th EAGE Conf. and Tech. Exhib., Glasgow, 29 May–2 June 1995. – Glasgow, UK. – P. 8.
12. Бурцев, М.И. Поиски и разведка месторождений нефти и газа / М.И. Бурцев – М. : Рос. ун-т дружбы народов. – 2006. – 264 с.
13. Гололобов, Д.В. Импедажные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала. // Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинин // Доклады БГУИР. – Минск, 2010. – № 6(52). – С. 13–17.
14. Geldmacher, I. A Fit-for-purpose electromagnetic System for Reservoir Monitoring and Geothermal Exploration / I. Geldmacher, K. Strack // GRC Transactions. – 2017. – Vol. 41. – P. 1649–1658.
15. Helwig, S.L. Vertical-vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition / S.L. Helwig, W. Wood, B. Gloux // Geophysical Prospecting. – 2019. – Vol. 67. – № 6. – P. 1582–1594.
16. Совместная инверсия морских магнитотеллурических и гравиметрических данных с учетом сейсмических ограничений – предварительные результаты построения изображений суббазальтов у Фарерского шельфа / М. Дженген [и др.] // Планета Земля Sci Lett. – 2009. – С. 47–55.
17. Гололобов, Д.В. Радиоконкомплексирование методов электромагнитной разведки при поиске залежей углеводородов / Д.В. Гололобов // Докл. БГУИР. – 2008. – № 8(38). – С. 30–36.

Поступила 25.03.2021

#### HIGH-FREQUENCY SENSING MODES USING TWO-FREQUENCY SIGNALS FOR SEARCHING HYDROCARBONS

V. YANUSHKEVICH, S. ABRAMENKO, S. KALINTSEV, V. BOGUSH

*The article analyzes the effect of two-frequency electromagnetic waves in the regime of a powerful high-frequency signal on an anisotropic medium above hydrocarbons. The components of the tensors of the dielectric constant of the medium above the deposits are investigated. The introduction of various methods and equipment for the search for hydrocarbons based on the analysis of the material and phase components of the combined elements of the dielectric constant tensor of the medium over hydrocarbons is proposed. The characteristics of the medium above hydrocarbons for electromagnetic waves with right and left circular polarizations are investigated depending on the frequency, the ratio of signal amplitudes and specific conductivity. The modes of sounding of anisotropic media over hydrocarbons are recommended to increase the productivity of geological exploration and the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits.*

**Keywords:** hydrocarbon reservoir, electromagnetic wave, dual-frequency signal.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Богущ Р.П., Абламейко С.В., Захарова И.Ю.</i> Вычисление и анализ признаков движущихся объектов для сопровождения на видеопоследовательности .....	2
<i>Кожевников М.М., Адамов С.Н.</i> Синтез автоматических систем комбинированного управления вакуум-выпарными установками .....	11
<i>Kechik D., Davydov I., Hierasimuk Ya., Tsurko A., Smolev M.</i> Integration of the system of diagnostics of industrial equipment and enterprise asset management systems using FIWARE framework .....	20
<i>Оськин А.Ф., Оськин Д.А.</i> Моделирование эпидемии с помощью клеточных автоматов .....	29
<i>Kechik D., Davydov I., Loshchinin I., Zhukovskiy K.</i> Algorithm of classification of shaft orbits .....	35
<i>Анисимова С.В., Головатый А.И.</i> Алгоритмы распознавания музыкальных отрывков, нот и аккордов .....	45
<i>Глухов Д.О., Лазовский Д.Н., Лазовский Е.Д., Глухова Т.М.</i> Моделирование трещинообразования в железобетонных конструкциях на основе деформационной расчетной модели .....	50
<i>Роговский С.И., Танана О.В., Вабищевич Н.В., Вабищевич С.А.</i> Обработка изображений для определения прочностных параметров полимерных пленок .....	59

### ФИЗИКА

<i>Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И., Просолович В.С.</i> Трещиностойкость пленок диазохинон-новолачного фоторезиста на пластинах монокристаллического кремния .....	64
<i>Янушкевич В.Ф., Калинин С.В., Богущ В.А.</i> Применение двухчастотных электромагнитных волн для определения свойств среды над углеводородами .....	70
<i>Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Тарасик М.И.</i> Время жизни носителей заряда в пластинах монокристаллического кремния с пленками диазохинон-новолачного фоторезиста .....	77
<i>Янушкевич В.Ф., Абраменко С.Н., Калинин С.В., Богущ В.А.</i> Высокочастотные режимы зондирования с применением двухчастотных сигналов для поиска углеводородов .....	82