

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси»

№ 20(1242)2017

Збірник наукових праць

Видання засноване в 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ „ХПІ” – 2017р. – No20(1242) – 130 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ No5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015р.

Координаційна рада:

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабчєнко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Дьомін Д. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

Заст. відповідального редактора: Акімов О. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків,

Відповідальний секретар: Пензєв П. С., НТУ «ХПІ»;

Члени редколегії: Березуцький В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дмитрієв В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дудніков А. А., канд. техн. наук, ПДАА, Полтава, Заблоцький В. К., д-р техн. наук, ДДМА, Краматорськ, Заміховський Л. М., д-р техн. наук, ІФТУНГ, Івано-Франківськ, Євстратов В. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Погрібний М. А., проф., НТУ «ХПІ», Харків, Пономаренко О. І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Соболь О. В., д-р фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Шоман О. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Jozef Voynarovsky, проф., Сілезького політехнічного інституту, Польща, Rab Nawaz Lodhi, проф. Bahria University Islamabad Pakistan, Пакистан, Меркер Е. Е., д-р техн. наук, проф., Старооскольський технологічний інститут – філія Національного дослідницького технологічного інституту «Московський інститут сталі і сплавів», Росія

У 2015 р. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ „ХПІ”

Протокол № 5 від «02» червня 2017 р.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 004.056.53

С. В. БАЛАКИН

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРЕСЕЧЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ АЛГОРИТМАМИ ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ

Розглядається моделювання системи постановки діагнозу шляхом аналізу ймовірності достовірності оцінки різних наборів станів структури проникнення комбінованих доказів симптомів для дерева діагностики, представленого деревом специфікації, щоб максимально точно визначити захищеність системи чи організму. Дослідження полягає в наданні необхідної теоретичної бази для використання приведених концепцій і теорій, які можуть комбінуватися з сучасними напрацюваннями для підвищення результатів ефективності виявлення вторгнень в комп'ютерній мережі.

Ключові слова: моделювання, діагностика, діагноз, вторгнення, алгоритми змін, теорія Демпстера-Шефера, комп'ютерна мережа, основне переконання, правдоподібність, проникливість.

Рассматривается моделирование системы постановки диагноза путем анализа вероятности достоверности различных наборов состояний в структуре проникновения и комбинированных доказательств симптомов для дерева диагностики, представленного деревом спецификации, чтобы максимально точно определить защищенность системы или организма. Исследование заключается в предоставлении необходимой теоретической базы для использования приведенных концепций и теорий, которые могут комбинироваться с современными наработками для повышения результатов эффективности обнаружения вторжений в компьютерной сети.

Ключевые слова: моделирование, диагностика, диагноз, вторжения, алгоритмы изменений, теория Демпстера-Шефера, компьютерная сеть, основное убеждение, правдоподобность, проницательность.

The modeling of the diagnostic system is considered. Analyzing the probability of estimating the various sets of states of the structure of the penetration of the combined evidence of symptoms for the diagnostic tree is presented by the specification tree in order to ascertain precisely the security of the system or organism. Main aim of the study is to provide the necessary theoretical basis for using the above concepts and theories that can be combined with current developments to enhance the effectiveness of detecting intrusions in a computer network. Given description shows improved results that can improve diagnosis functions and can be used in real-time computer systems.

Keywords: Modeling, diagnosis, diagnosis, invasion, algorithms of change, Dempster-Shafer theory, computer network, basic belief, plausibility, insight.

Введение. В области компьютерной безопасности много ресурсов направлено на повышение эффективности защиты пользователей от несанкционированных действий. Одним из способов повышения безопасности компьютерной системы является использование систем обнаружения вторжений (СОВ). Метод диагностирования очень тесно связан с СОВ, но основан на принципах и способах развитых в медицине. С помощью информатизации в сфере медицины становится возможным и развитие новых вех компьютерных технологий. Основная сложность при их проектировании - это подбор правильной технологической и методологической базы, что позволит применить такие методы в реальных условиях. Эти методы получили название диагностическое обнаружения вторжений (ДОВ).

В ДОВ мониторятся соответствующие функции системы, таким же образом как в медицине проводится обследование при симптомах болезни. Симптомы используют значение обследований, чтобы вычислить вероятность обнаружения определенного недуга в организме человека. Теория Демпстера-Шафера (ТДШ) применяется для характеристики таких убеждений, оперируя основными понятиями по комбинированию и использованию операторов слияния.

Разработанная система постановки диагноза путем анализа вероятности достоверности оценки различных наборов состояний структуры проникновения комбинированных доказательств симптомов для дерева диагностики, представленного деревом специ-

фикации, чтобы максимально точно определить защищенность системы или организма.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Существующие программные решения имеют определенную поддержку с точки зрения предотвращения и обнаружения вторжений, но в них отсутствует возможность диагностирования. Данные системы имеют недостатки в своевременности детектирования атак, но использование методов диагностирования может положительно повлиять на быстродействие и надежность известных методов, минимизируя затраты на проведение мониторинга сети и потоков. Основная идея заключается в сборе информации на нескольких архитектурных уровнях, с использованием нескольких фильтров безопасности для выполнения корреляционного анализа симптомов вторжения. Много таких работ базируется на теории Демпстер-Шафера (ТДШ), которая разработана Гленном Шафером и Артуром Демпстер и описана в работах [15, 63]. Теория отрабатывалась и развивалась в работах [14, 64, 88, 84, 62].

Идея сбора информации от источников принадлежит Джону Ф.Ф., и обосновывает само понятие атаки. Данные наработки были описаны теоретически в работах [3], [4] и [5]. Представленные работы используют понятие корреляции и мультианализа, но не решают проблему диагностики аномалий в системе. Актуальность данной статьи в том, что данная технология может расширить возможности систем обнаружения вторжений поднимая их на качественно новый уровень.

© С. В. Балакин. 2017

Цель и задачи исследования. Целью исследования является определение уровня развития рассматриваемых технологий, реализующих обнаружения вторжений в компьютерных сетях, с целью улучшения их эффективности.

Задачей исследования является обоснование актуальности использования указанных методов и возможности их внедрения в производство.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследование инструментальной базы для реализации диагностирования несанкционированных действий и подбор основных операторов.

2. Разработана математическая модель процесса диагностирования несанкционированных действий в компьютерных сетях посредством использования операторов теории Демпстера-Шефера (ТДШ), которая позволяет своевременно реагировать на нарушения работы системы и точно выявлять тип нарушения.

Выбор инструментальной базы для реализации диагностирования. Цель исследования заключается в предоставлении необходимой теоретической базы для использования приведенных концепций и теорий, которые могут комбинироваться с современными наработками для повышения эффективности обнаружения вторжений в компьютерной сети. Рассмотрены основные алгоритмы обнаружения изменения, потому что они будут использоваться при диагностике для контроля временных фрагментов и формирования данных для определения симптомов и сигнатур вторжений. ТДШ может объединить отдельные части доказательств для получения конечного результата и установление вывода о наличии или отсутствии вторжений (диагноз). ТДШ обладает всеми свойствами, которые могут помочь выявлять вторжения и несанкционированные действия в компьютерной сети.

Объектом исследования является процесс организации обнаружения вторжений и несанкционированных действий в сети.

Предметом исследования являются параметры операторов теории Демпстера-Шефера, с помощью которых будет реализовываться математическая модель диагностирования обнаружения вторжений.

В ТДШ все возможные состояния процесса можно описать с помощью структуры проницательности. Структура проницательности определяется массивом $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, где для $1 \leq i \leq N$, S_i определяет конкретное состояние системы. ТДШ применяется при определении «состояния процесса», потому что он позволяет установить диагноз и на его основе сделать вывод о наличии аномалий в системе.

Главной целью ТДШ есть на основе наблюдений и собранных доказательств определения вероятности того, насколько данное состояние S_i является фактическим состоянием процесса. Диагноз формируется на основе доказательств ТДШ. DST формирует доказательства по достижении уровня уверенности в них, и такой результат называется основным убеждением (ОП). Формально ОП представляет собой связанную структуру проникновения. f_S отражает любую подмножество структуры проникновения для реального значения, $f_S: P(S) \rightarrow R$. Значение области представля-

ет собой набор поддерживаемых состояний, а соответствующее значение диапазона представляет силу этой поддержки.

ОП это совокупность всех возможных «претензий», которые могут возникнуть в процессе в рамках конкретной структуры проникновения. Любой набор состояний, которому присваивается ненулевая масса, свидетельствует, что процесс может быть в одном из этих состояний. Присвоение нулевой массы означает, что процесс отсутствует. Используя описанные выше конструкции можно перейти к применению ТДШ. Нижняя граница субъективной вероятности (убеждения) (bl) вычисляется по формуле,

$$bl(f_S, A) = \sum_{B \subseteq A} f_S(B)$$

где S - структура проницательности, f_S - является ОП, и A будет набором состояний. Формула включает, что масса убеждения содержится непосредственно во всех подмножествах наборов опрашиваемых и обычных состояний.

Верхний предел субъективной вероятности (правдоподобие) (pl) вычисляется формулой

$$pl(f_S, A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} f_S(B)$$

где переменные имеют такие же значения, как и в состояниях убеждения. Формула включает, что массы убеждения любых состояний имеют по крайней мере один общий с опрашиваемым состоянием.

Правдоподобие и убеждения связаны через уравнение $pl(f_S, A) = 1 - bl(f_S, S \setminus A)$ которое отражает альтернативную интерпретацию правдоподобия, где правдоподобие в A является остатками уверенности в A , после того как в A было добавлено правдоподобие. Получается, что нет возможности для отклонения текущего состояния от структуры проницательности, и эта структура гарантированно будет содержать данное состояние.

Операторы слияния в ТДШ могут скомпоновать вместе несколько доказательств по ОТ для формирования конечных ОП. Оператор слияния - это любая функция, которая принимает на входе две ОП, а в качестве выходного сигнала выдает одну (с условием что все ОП находятся в одной структуре проницательности).

Операторы слияния в ТДШ описываются уравнениями,

$$n(S, A_s, B_s) = \sum_{x, y \in P(S) | x \cap y = \emptyset} A_s(x) B_s(y)$$

$$C_s(\emptyset) = dfo(S, A_s, B_s, \emptyset) = 0$$

Входные ОП (A_s, B_s) и выходные (C_s) находятся в одной структуре проницательности S . Вспомогательная функция n (когда заданные два ОП одной структуры проницательности) вычисляет общее количество масс в противоречивых друг другу частях доказательств (когда множества переходов не имеют

общих состояний) A_s , и B_s . Для конкретной множества состояний $z \in P(S)$, правило Демпстера DFO вычисляет общую массу, которая поддерживает z и добавляет массу с любого множества состояний A_s , и B_s , разделяющих z как общее состояние. Следует отметить, что полностью противоречивые данные не будут иметь общего состояния, поэтому такая масса не будет учитываться (потому что в случае $z = \emptyset$, где эти значения будут учитываться, $C_s(\emptyset) = dfo(S, A_s, B_s, \emptyset) = 0$ масса «исчезает»).

Важно определять когда поведение процесса отклоняется от предварительно определенной спецификации (то есть она претерпела «изменений»).

Обозначим алгоритм выявления изменений функцией C , для представления полученных с помощью мониторинга значений. Функция работает так же как и преобразования временных рядов, принимая временной ряд T , в качестве входных данных, и $C(T) = T'$ в качестве выходного сигнала. Базовый тип временных фрагментов не ограничивается, однако C должен быть двоичным. Разрешены только значения $\{0, 1, NM\}$. Ввод и вывод временных фрагментов должно содержать равное количество значений $T_n = T'_n$, так же интервалы времени $T_p = T'_p$, а также одинаковое время возникновения для всех соответствующих индексов, $\forall_i | 0 \leq i < T_n, T_i(i) = T'_i(i)$. При индексе i с временных рядов T , выход C , $C(T)(i) = T'(i)$, следует оценить в 0, если никаких изменений не обнаружено. $T'(i)$ следует оценивать в 1, если изменение обнаружено и процесс отражает поведение, отклоняющееся от определенной модели (то есть, сигнал активный). Алгоритм обнаружения изменения CUSUM работает следующим образом. Пусть $csm(T, ul, \mu, \sigma, a)$ функция обнаружения изменения CUSUM, где T будет функцией ввода временных фрагментов, ul будет верхним / нижним селектором CUSUM, μ будет средним отклонением, σ будет стандартным отклонением, и a будет порогом тревоги.

Тип ввода временных фрагментов T , должен иметь строгий полный порядок, а также поддержку сложения и вычитания операций. ul это двоичное значение $ul \in \{0, 1\}$, представляющий верхний селектор при $ul = 1$, или нижний при $ul = 0$ в CUSUM алгоритме. μ и σ должны иметь тот же тип, что и временные фрагменты и представляют собой «нормальное» среднее и стандартное отклонение основного процесса. a - порог сигнализации, также разделяет тип временных фрагментов. Для данного индекса $i | 0 \leq i < T_n$ временных рядов T , $T(i)$, значение CUSUM по индексу и задается следующим образом:

$$csm(T, ul, \mu, \sigma, a)_i(i) = T_i(i) \quad ul = 1; ul = 0$$

Если предположить, что при среднего значения μ будет фактическим ожидаемым значением основного процесса временных рядов, то потом значение

CUSUM должны оставаться приближенными к нулю. Из этого следует, что значение параметра ul определяет, когда алгоритм отслеживает аномальное поведение в обоих направлениях. Фактический выход алгоритма обнаружения изменения определяется в каждый момент времени $T_i(i)$, путем сравнения текущего значения CUSUM с порогом тревоги a . Если порог превышен то возвращается 1, и это значит что процесс проявляет девиантное поведение. В противном случае возвращается 0, и процесс показывает нормальное поведение. При определении разницы между значениями временных рядов и ожидаемых значений $T(i) - \mu$ - это стандартизированная величина, в качестве условия использует значение отклонения σ . Это позволяет определить порог тревоги (a) для стандартных отклонений от ожидаемого значения процесса, используя всего лишь одно значение с порога тревоги a для вызовов функции CSM с различными значениями μ и σ .

Основой диагностики будет дерево спецификаций, используется для представления всех диагнозов в которых может находиться система S . Такую систему можно назвать деревом диагностирования. Симптом принимает значение наблюдаемых в момент времени t , и выдает на выходе ОП по сравнению с DT_f , что обеспечивает возможность диагностики S . Симптомы получают новые данные о наблюдаемых как только они становятся доступными, а по определению временных фрагментов они доступны через одинаковые промежутки времени. Симптомы поддерживают и принимают решения на основе внутренних состояний, таким образом одинаковые значения могут подаваться в симптом несколько раз, а это может привести к различным ОП на выходе. пусть набор ST_n симптомов представляется как

$ST = \{st_0, st_1, \dots, st_{ST_n-1}\}$, где $st \in ST$, или $st_i \in ST$, где $0 \leq i < ST_n$, относится к какому-либо конкретному симптому. Наблюдаемый, связанный с каждым симптомом, определяется функцией STO , которая принимает симптом и возвращает соответствующее значение наблюдения на выходе. Значение симптома st в момент времени t , определяется через $st(STO(st)(t))$.

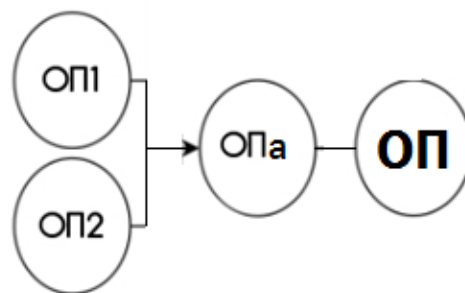


Рис. 1 – Комбинация ОП

Для постановки диагноза состояния S , нужно иметь целостную ОП. Необходимо соединить наборы

ОП для формирования единой ОП, которая будет отражать их суть. Сочетание ОП проводится операторами слияния DST. Это позволит сформировать набор независимых основ убеждений, будут эквивалентны по размеру к числу зависимых групп. В дальнейшем независимые ОП образуют конечную ОП. Пример такого процесса показан на рис. 1.

На заключительном этапе определяется, находится ли S в состоянии конкретной атаки a из массива связанных классов атак $a \in \text{ас}$. Каждая атака с DST будет содержать элемент из массива атак $\{a\} \subset A$. Вера и достоверность вычисляется для каждой атаки: $bl(B_{DT_j}, \{a\})$, $pl(B_{DT_j}, \{a\})$, $\forall \{a\} \in \text{ас}$. Если ни одна из вершин атак не обнаруживается, то система находится в состоянии неизвестной атаки и процесс диагностики заканчивается. Если обнаружена вершина атаки, то выбирается атака с наибольшей субъективной вероятностью, и система считается под угрозой этой конкретной атаки. После этого процесс диагностики заканчивается.

Проведенные исследования параметров операторов ТДШ доказали, что их использование в описанной

последовательности позволят устанавливать симптомы и на их основе получить корректный диагноз.

Результаты исследования вторжений в компьютерные сети алгоритмами выявления изменений. В результате было проверено достоверность и возможности диагностирования при обнаружении атак и несанкционированных действий. Исследование происходило при одновременном или комбинированном запуске всех узлов, для того чтобы система могла диагностировать наличие НД. Реализована структура дерева диагностирования для работы с определенными типами атак, а также для реализации новых, неизвестных системе атак.

Для сравнения результатов приведена таблица с характеристиками работы предложенного метода, и метода-аналога, которые были протестированы с одинаковыми наборами входных данных. Результаты свидетельствуют, что данный метод значительно превосходит по эффективности выявления аналог (92 % против 54 %), при сравнительно одинаковой нагрузке на ЦП (табл. 1).

Таблица 1 – Результат сравнения методов

	Кол. угроз	% Определения	Время работы	Загрузка ЦП, %
ТДШ	44	92	12сек	32
DDIS(аналог)	26	54	16сек	31

Выводы. В ходе выполнения данной статьи было выполнено:

1. Исследование инструментальной базы для реализации диагностирования несанкционированных действий и подбор основных операторов.
2. Разработана математическая модель диагностирования несанкционированных действий в компьютерных сетях посредством использования операторов

теории Демпстера-Шефера (ТДШ), которая позволяет своевременно реагировать на нарушения работы системы и точно выявлять тип нарушения.

3. Были проведены обзор и анализ существующих аналогов, что реализуют функции предметной области.

Выполненная работа будет использована для дальнейших исследований в данной области.

Список літератури:

1. Denning, D. E. An Intrusion-Detection Model [Text] / D. E. Denning // 1986 IEEE Symposium on Security and Privacy. – 1986. doi: [10.1109/sp.1986.10010](https://doi.org/10.1109/sp.1986.10010)
2. Sheyner, O. Scenario Graphs and Attacks [Text]: PhD thesis / O. Sheyner. – SCS, Carnegie Mellon University, 2004. – 141 p.
3. Kvarnström, H. A survey of commercial tools for diagnosis detection [Text] / H. Kvarnström. – Technical Report, Chalmers University, 1999. – 99 p.
4. Edward, G. Intrusion Detection [Text] / G. Edward. – 1st ed. – Intrusion.Net Books, Sparta, New Jersey, USA, 1999. – 218 p.
5. Eckmann, S. T. STATL: An attack language for state-based intrusion detection [Text] / S. T. Eckmann, G. Vigna, R. A. Kemmerer // Journal of Computer Security. – 2002. – Vol. 10, Issue 1-2. – P. 71–103. doi: [10.3233/jcs-2002-101-204](https://doi.org/10.3233/jcs-2002-101-204)
6. Dempster, A. P. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping [Text] / A. P. Dempster // The Annals of Mathematical Statistics. – 1967. – Vol. 38, Issue 2. – P. 325–339. doi: [10.1214/aoms/1177698950](https://doi.org/10.1214/aoms/1177698950)
7. Klir, G. J. Is there more to uncertainty than some probability theorists might have us believe? [Text] / G. J. Klir // International Journal of General Systems. – 1989. – Vol. 15, Issue 4. – P. 347–378. doi: [10.1080/03081078908935057](https://doi.org/10.1080/03081078908935057)
8. Yager, R. R. Arithmetic and other operations on Dempster-Shafer structures [Text] / R. R. Yager // International Journal of Man-Machine Studies. – 1986. – Vol. 25, Issue 4. – P. 357–366. doi: [10.1016/s0020-7373\(86\)80066-9](https://doi.org/10.1016/s0020-7373(86)80066-9)
9. Yager, R. R. On the dempster-shafer framework and new combination rules [Text] / R. R. Yager // Information Sciences. – 1987. – Vol. 41, Issue 2. – P. 93–137. doi: [10.1016/0020-0255\(87\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0020-0255(87)90007-7)
10. Yager, R. R. Quasi-associative operations in the combination of evidence [Text] / R. R. Yager // Kybernetes. – 1987. – Vol. 16, Issue 1. – P. 37–41. doi: [10.1108/eb005755](https://doi.org/10.1108/eb005755)

Bibliography (transliterated):

1. Denning, D. E. (1986). An Intrusion-Detection Model. 1986 IEEE Symposium on Security and Privacy. doi: [10.1109/sp.1986.10010](https://doi.org/10.1109/sp.1986.10010)
2. Sheyner, O. (2004). Scenario Graphs and Attacks. SCS, Carnegie Mellon University, 141.
3. Kvarnström, H. (1999). A survey of commercial tools for diagnosis detection. Technical Report, Chalmers University, 99.
4. Edward, G. (1999). Intrusion Detection. Intrusion.Net Books, Sparta, New Jersey, USA, 218.
5. Eckmann, S. T., Vigna, G., Kemmerer, R. A. (2002). STATL: An attack language for state-based intrusion detection. Journal of Computer Security, 10 (1-2), 71–103. doi: [10.3233/jcs-2002-101-204](https://doi.org/10.3233/jcs-2002-101-204)
6. Dempster, A. P. (1967). Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping. The Annals of Mathematical Statistics, 38 (2), 325–339. doi: [10.1214/aoms/1177698950](https://doi.org/10.1214/aoms/1177698950)
7. Klir, G. J. (1989). Is there more to uncertainty than some probability theorists might have us believe? International Journal of General Systems, 15 (4), 347–378. doi: [10.1080/03081078908935057](https://doi.org/10.1080/03081078908935057)
8. Yager, R. R. (1986). Arithmetic and other operations on Dempster-Shafer structures. International Journal of Man-Machine Studies, 25 (4), 357–366. doi: [10.1016/s0020-7373\(86\)80066-9](https://doi.org/10.1016/s0020-7373(86)80066-9)

9. Yager, R. R. (1987). On the Dempster-Shafer framework and new combination rules. *Information Sciences*, 41 (2), 93–137. doi: [10.1016/0020-0255\(87\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0020-0255(87)90007-7).
10. Yager, R. R. (1987). Quasi-associative operations in the combination of evidence. *Kybernetes*, 16 (1), 37–41. doi: [10.1108/eb005755](https://doi.org/10.1108/eb005755).

Поступила (received) 20.07.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Організація запобігання вторгнень в комп'ютерні мережі алгоритмами виявлення змін/ Балакін С. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.3–7. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Организация пресечения вторжений в компьютерные сети алгоритмами выявления изменений/ Балакин С. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.3–7. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Organization of prevention of intrusions in computer networks using algorithms for detecting changes / Balakin S. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.3–7. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Балакін Сергій В'ячеславович – аспірант, Київський національний авіаційний університет, аспірант Кафедри комп'ютерних систем та мереж; проспект Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 02000

Балакин Сергей Вячеславович – аспірант, Киевский национальный авиационный университет, аспірант Кафедры компьютерных систем и сетей; проспект Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 02000; e-mail: desertq@mail.ua

Balakin Sergii – graduate student, Kyiv national aviation university; ave. Kosmonavta Komarova 1, Kyiv, Ukraine, 02000; e-mail: desertq@mail.ua

УДК 62-278

С. В. САВЧЕНКО, Г. С. ТИМЧИК

МЕТОД КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Рассматривается применение метода акустической эмиссии (АЭ) для контроля сварных соединений баллистических сталей АР. В основе метода лежит физическое явление излучения волн напряжений при быстрой локальной перестройке структуры материала. Исследование проводилось при снятии нагрузки с образца с применением широкополосных акустических пьезодатчиков и новой системой градуировки датчиков АЭ. Была выполнена стыковка системы градуировки с персональным компьютером, разработано специальное программное обеспечение, позволяющее в полуавтоматическом режиме получать амплитудно-частотную характеристику каждого датчика.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, контроль сварных швов, баллистическая сталь, пьезодатчик, неразрушающий контроль, средство защиты.

Розглядається застосування методу акустичної емісії (АЕ) для контролю зварних з'єднань балістичних сталей АР. В основі методу лежить фізичне явище випромінювання хвиль напружень при швидкій локальній перебудові структури матеріалу. Дослідження проводилося при знятті навантаження зі зразка із застосуванням широкосмугових акустичних п'єзодатчиків і новою системою градуювання датчиків АЕ. Була виконана стыковка системи градуювання з персональним комп'ютером, розроблено спеціальне програмне забезпечення, що дозволяє в напівавтоматичному режимі отримувати амплітудно-частотну характеристику кожного датчика.

Ключові слова: акустична емісія, контроль зварних швів, балістична сталь, п'єзодатчик, неруйнівний контроль, засіб захисту.

The application of the acoustic emission method (AE) for the control of welded joints of ballistic steel AR is considered. The method is based on the physical phenomenon of radiation of stress waves during fast local rearrangement of the material structure. The study was carried out with the removal of the load from the sample using broadband acoustic piezoelectric sensors and a new system for calibrating the AE sensors. The calibration system was mapped to a personal computer, special software was developed that allows the semi-automatic mode to obtain the amplitude-frequency response of each sensor.

The use of this method of finding weld defects gives high accuracy and efficiency and allows a tangible reduction in costs and production time. A promising direction is the development of methods for filtering the acoustic signal to increase the accuracy of the method of control.

Keywords: acoustic emission, control of welded joints, ballistic steel, piezoelectric sensor, non-destructive testing, protective equipment.

Введение. Военная промышленность и сфера, связанная с системой безопасности, являются лидерами по максимальному внедрению новейших технологий. Современное оружие дает толчок для развития новейших средств защиты от нее, среди которых баллистическая сталь один из самых ярких представителей. Армия, полиция, различные частные охранные

агентства, службы безопасности, а также инкассаторы – вот где используются как современные виды вооружений, так и системы защиты от них.

Изготовление баллистической стали и конструкций из нее, имеет ряд технологических сложностей. Одна из основных проблем это свариваемость этих

© С. В. Савченко, Г. С. Тимчик. 2017

сталей и сопутствующие проблемы которые при этом возникают.

Актуальной проблемой является диагностика качества сварных швов баллистической стали.

Постановка задачи. В настоящее время сварные соединения имеют широкое распространение во многих областях деятельности человека. Прочность сварных соединений при статических и ударных нагрузках доведена до прочности деталей из целого металла. Но, как и у любого соединения, сварка имеет ряд недостатков, которые могут возникать в тех или иных случаях. Существует много способов выявления дефектов сварных соединений, например, рентгеновский, ультразвуковой и др. У каждого метода есть свои преимущества и недостатки. Более точные методы зачастую очень сложны технически и не мобильны, а также включают материально затратное оборудование. Предложенный метод имеет свои преимущества, высокую точность и чувствительность. Но также есть и недостаток, это низкая помехоустойчивость.

Применение баллистической стали AR 500/560 для изготовления панцерной защиты автомобилей является оптимальным решением. Благодаря своим механическим и химическим свойствам баллистическая сталь AR имеет отличное сочетание таких качеств как высокая твердость (HBW 480-580 по Бринеллю), отличная прочность, пластичность и вязкость. Соответствие стандартам основных мировых и украинских классификационных групп (ДСТУ 3975, EN1522, STANAG, VPAM.) гарантируют качество и надежность панцерной «брони», произведенной из баллистической стали AR. Также значительным плюсом баллистической стали AR 500/560 является довольно простой химический состав, обеспечивающий легкую обработку и резку металла, как механическими методами, так и с помощью плазмы и лазера.

Бронированная сталь Ar 500/560 является низколегированным сплавом толщиной от 2 до 40 мм, что способствует надежной баллистической защите (табл. 1, 2)

Таблица 1

Механические свойства

Название	Твердость (HB) (средняя)	Механические свойства EN 16002-2004			Ударная вязкость EN 10045-1:1904 KV(-40°C) min (J)
		Rm(Мпа)	Rp0,2	AS(%)	
AR 500	510	1500	1350	8.0	20
AR 560	570	1800	1600	6.5	15

Таблица 2

Химический состав стали Ar

Название	Химический состав (анализ плавки), % (max значение)						
	C	Si	Mn	P	S	S+P	Другие
AR 500	0.32	0.60	1.60	0.020	0.010	0.025	Cr i B
AR 560	0.36	0.60	1.60	0.020	0.010	0.025	Cr i B

Результаты исследований. Контроль сварных швов баллистической стали с применением метода акустической эмиссии. Метод акустической эмиссии (АЭ) относится к акустическим методам неразрушающего контроля и технической диагностики. В основе метода лежит физическое явление излучения волн напряжений при быстрой локальной перестройке структуры материала. Источником акустическо-эмиссионной энергии служит переменное поле упругих напряжений от развивающихся дефектов. Для стимуляции дефектов излучения акустических волн объект, как правило, нагружают механическим или тепловым способом.

Наш объект исследования это контрольные пластины баллистической стали в нескольких толщинах и конфигурациях сварного шва (рис. 1)

Установка для контроля состояла из такого оборудования: гидравлический пресс с усилием в 10 т., широкополосный акустический пьезодатчик, динамометр, аналого-цифровой преобразователь модели E20-10, усилитель и амплитудный детектор, а также программное обеспечение Power Graph 3.3 Professional. Основным новым элементом рассматриваемой системы является широкополосный датчик АЭ.

Для исследования использовали новую систему градуировки датчиков АЭ, выполнили стыковку системы градуировки с персональным компьютером, разработали специальное программное обеспечение,

позволяющее в полуавтоматическом режиме получать амплитудно-частотную характеристику каждого датчика. Исследовали амплитудно-частотные характеристики датчиков различных конструкций и выбрали оптимальный вариант датчика акустической эмиссии с линейной амплитудно-частотной характеристикой – 200–1200 кГц.

В качестве демпфера использовали оригинальный материал (защищен патентом Украины), состоящий из частиц WC и TiNi, скрепленных эпоксидной смолой с отвердителем. Состав демпфера подобран так, что его акустический импеданс равен импедансу пьезокерамики, а демпфирующие свойства максимальны благодаря использованию мартенситного превращения TiNi с поглощением энергии. За счет этого удалось улучшить демпфирующие свойства демпфера в 1,5–2 раза. В совокупности это позволило значительно уменьшить резонансные пики, исключить паразитные отраженные сигналы с тыльной стороны пластины и от корпуса датчика, уменьшить неравномерность амплитудно-частотной характеристики с 23 до 8,5 дБ.

Искажения формы сигналов АЭ связаны с нелинейностью АЧХ пьезоэлемента датчика АЭ. Уменьшить нелинейность АЧХ можно путем механического демпфирования пьезоэлемента, а именно использования для этого наполнителя с характеристическим импедансом, близким к импедансу пьезоэлемента.

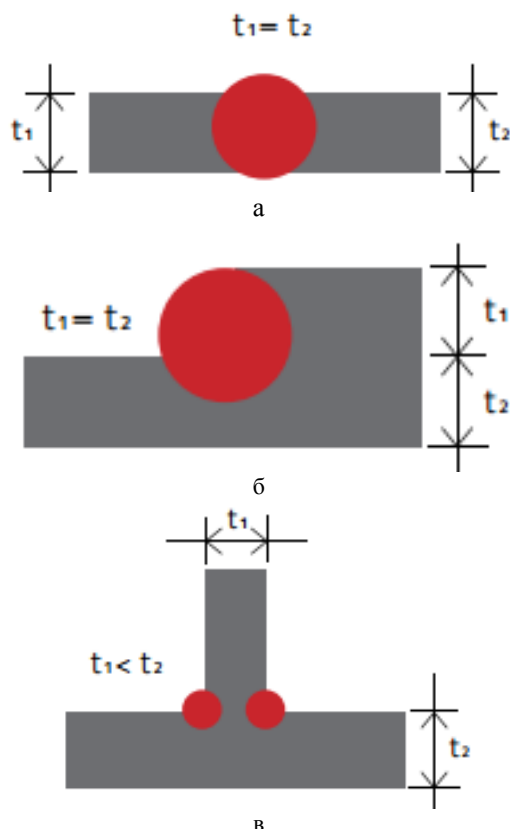


Рис. 1 – Конфигурации сварного соединения баллистической стали: а – прямой; б – разная толщина листов; в – угловое соединение

Введение карбида вольфрама как наполнителя в состав материала демпфера позволило получить материал с высокими демпфирующими свойствами. Частицы карбида вольфрама размером 1–10 мкм, хаотично размещенные в композиционном материале, хорошо поглощали акустические волны в рабочей полосе частот, за счет чего выровнялась АЧХ датчика АЭ. Конструкция широкополосного датчика АЭ позволила уменьшить нелинейность АЧХ на 20 % в диапазоне рабочих частот преамплицейного

тракта (0,1–2,0 МГц) по сравнению с традиционными датчиками [1].

В нашем случае при контроле сварных соединений, элемент нагружается до его выбранного диапазона, который находится в 0,7–0,8 предела текучести материала, и быстро разгружается, при этом считывается сигнал акустической эмиссии.

Оценка качества сварного шва производится по таким характеристикам полученного акустосигнала:

1. амплитуда акустосигнала h – как его мощность;
2. Угол наклона линии затухания сигнала – α ;
3. время генерирования сигнала при разгрузке – t_p .



Рис. 2 – Диаграмма акустосигнала при исследовании образца

Выводы. В основе разрабатываемого метода лежит тщательное изучение характеристик сварных соединений для выявления дефектов. Использование данного метода нахождения сварных дефектов дает высокую точность и эффективность и позволяет ощутимо сократить затраты и производственное время. Перспективным направлением является разработка методов фильтрации акустосигнала для увеличения точности метода контроля.

Список литературы:

1. Ремшев, Е. Ю. Обеспечение эксплуатационной надежности упругих элементов акустическими методами [Текст] / Е. Ю. Ремшев, Г. А. Данилин, Г. А. Воробьева, М. Ю. Силаев. – СПб.: Металлург, 2015. – 250 с.
2. Троицкий, В. А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений [Текст] / В. А. Троицкий. – Киев: Феникс, 2006. – 177 с.
3. Волченко, В. Н. Контроль качества сварки [Текст] / В. Н. Волченко. – М.: Машиностроение, 1975. – 328 с.
4. Макарова, Л. Сварка и свариваемые материалы [Текст] / Л. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.
5. Фролов, В. В. Теория сварочных процессов [Текст] / В. В. Фролов. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
6. Волченко, В. Н. Контроль качества сварных конструкций [Текст] / В. Н. Волченко. – М.: Машиностроение, 1986. – 152 с.
7. Алешин, Н. П. Контроль качества сварочных работ [Текст] / Н. П. Алешин, В. Г. Щербинский. – М.: Высш. шк., 1986. – 207 с.
8. Алешин, Н. П. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий [Текст] / Н. П. Алешин, В. Г. Щербинский. – М.: Высш. шк., 1991. – 271 с.
9. Еремичев, А. А. Диагностика сварных соединений [Текст] / А. А. Еремичев. – Тольятти, 2006. – 82 с.
10. Троицкий, В. А. Неразрушающий контроль качества сварных конструкций [Текст] / В. А. Троицкий, В. П. Радько, В. Г. Демидко, В. Т. Бобров. – К.: Техника, 1986. – 159 с.
11. Щербинский, В. Г. Методы дефектоскопии сварных соединений [Текст] / В. Г. Щербинский, В. А. Феоктистов, В. А. Полевик и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.

Bibliography (transliterated):

1. Remshev, E. Yu., Danilin, G. A., Vorob'eva, G. A., Silaev, M. Yu. (2015). Obespechenie ehkspluatacionnoj nadezhnosti uprugih ehlementov akusticheskimi metodami. Sankt-Peterburg: Metallurg, 250.
2. Troickiy, V. A. (2006). Kratкое posobie po kontrolyu kachestva svarnyh soedineniy. Kyiv: Feniks, 177.
3. Volchenko, V. N. (1975). Kontrol' kachestva svarki. Moscow: Mashinostroenie, 328.
4. Makarova, L. (1991). Svarka i svarivaemye materialy. Moscow: Metallurgiya, 528.
5. Frolov, V. V. (1988). Teoriya svarochnykh processov. Moscow: Vysshaya shkola, 559.
6. Volchenko, V. N. (1986). Kontrol' kachestva svarnykh konstrukciy. Moscow: Mashinostroenie, 152.

7. Aleshin, N. P., Shcherbinskiy, V. G. (1986). Kontrol' kachestva svarochnykh rabot. Moscow: Vyssh. shk., 207.
8. Aleshin, N. P., Shcherbinskiy, V. G. (1991). Radiacionnaya, ultrazvukovaya i magnitnaya defektoskopiya metalloizdeliy. Moscow: Vyssh. shk., 271.
9. Eremichev, A. A. (2006). Diagnostika svarnykh soedineniy. Tol'yatti, 82.
10. Troickiy, V. A., Rad'ko, V. P., Demidko, V. G., Bobrov, V. T. (1986). Nerazrushayushchiy kontrol' kachestva svarnykh konstrukciy. Kyiv: Tekhnika, 159.
11. Shcherbinskiy, V. G., Feoktistov, V. A., Polevik, V. A. et. al. (1987). Metody defektoskopii svarnykh soedineniy. Moscow: Mashinostroenie, 336.

Поступила (received) 06.07.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Метод контролю зварних з'єднань балістичних сталей за допомогою акустичної емісії / Савченко С. В., Тимчик Г. С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.7–10. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Метод контроля сварных соединений баллистических сталей с помощью акустической эмиссии / Савченко С.В., Тимчик Г. С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.7–10. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Method of control of wall compounds of ballistic steels based on acoustic emissions/ Savchenko S., Timchik G. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 20 (1242). – P.7–10. – Bibliogr.:11. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Савченко Сергій Васильович – аспірант, Кафедра виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги 37, м. Київ, Україна, 03056, e-mail: savchenko0102@ukr.net.

Тимчик Григорій Семенович – професор, декан приладобудівного факультету, доктор технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги 37, м. Київ, Україна, 03056, e-mail deanpb@kpi.ua.

Савченко Сергей Васильевич – аспирант, Кафедра производства приборов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы 37, г. Киев, Украина., 03056, e-mail: savchenko0102@ukr.net.

Тимчик Григорий Семенович – профессор, декан приборостроительного факультета, доктор технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы 37, г. Киев, Украина., 03056, e-mail deanpb@kpi.ua.

Sergey Savchenko – postgraduate student, Department of Instrument Production, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", 37, Peremohy ave., Kyiv, Ukraine, 03056, E-mail: savchenko0102@ukr.net.

Grigoriy Timchik – professor, dean of the Faculty of Instrument-Making, Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorskyi Kiev Polytechnic Institute", 37, Peremogy ave., Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail deanpb@kpi.ua.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА КОМПЛЕКСАМИ

УДК 615.849.19

В. В. ШЛЫКОВ, В. А. ДАНИЛОВА, М. ДИДЕНКО

ПИРОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Разработана и реализована система бесконтактного измерения температуры сердца на основе пирометра. В системе используется пирометр спектрального отношения, так как в отличие от пирометров полного или частичного излучения, показывают действительную температуру объектов (сердца) и их показания не зависят от излучательной способности тела.

В среде разработки приложений LabVIEW 2010 разработана система визуального управления пирометрической системой бесконтактного измерения температуры, которая реализована на основе микропроцессора Arduino Uno Rev3 и пирометра Optris MS Plus. Полученные с помощью пирометрической системы распределения температуры в миокарде дадут дополнительную диагностическую информацию о наполнении сосудов сердца кровью, а также позволят оценить степень ишемии сосудов в условиях искусственного кровообращения.

Ключевые слова: пирометр, миокард, контроль температуры, микропроцессор Arduino Uno Rev3, LabVIEW.

Розроблено та реалізовано систему безконтактного вимірювання температури серця на основі пирометра. В системі використовується пирометр спектрального відношення, так як на відміну від пирометрів повного або часткового випромінювання, показують дійсну температуру об'єктів (серця) і їх показники не залежать від випромінювальної здатності тіла.

У середовищі розробки додатків LabVIEW 2010 розроблена система візуального управління пирометричною системою безконтактного вимірювання температури, яка реалізована на основі мікропроцесора Arduino Uno Rev3 і пирометра Optris MS Plus. Отриманий за допомогою пирометричної системи розподіл температури в міокарді дає додаткову діагностичну інформацію про наповнення судин серця кров'ю, а також дозволить оцінити ступінь ішемії судин в умовах штучного кровообігу.

Ключові слова: пирометр, миокард, контроль температуры, микропроцессор Arduino Uno Rev3, LabVIEW.

A non-contact heart temperature measurement system based on a pyrometer was developed and implemented. In the system, a pyrometer of the spectral ratio is used, since, in contrast to pyrometers of full or partial radiation, they show the actual temperature of the objects (the heart) and their indications do not depend on the emissivity of the body.

In the LabVIEW 2010 application development environment, a visual control system for a pyrometric non-contact temperature measurement system was developed, which is implemented on the basis of the Arduino Uno Rev3 microprocessor and the Optris MS Plus pyrometer. The temperature distribution in the myocardium obtained with the help of the pyrometric system will provide additional diagnostic information on the filling of the blood vessels of the heart with blood, and will also make it possible to assess the degree of vascular ischemia under conditions of artificial circulation.

Keywords: pyrometer, myocardium, temperature control, microprocessor Arduino Uno Rev3, LabVIEW.

Введение. Методы бесконтактного измерения температуры (методы пирометрии) находят широкое применение в медицинской практике, особенно там, где прямой контакт измерительного оборудования с пациентом либо невозможен, либо затруднен или нежелателен. Использование таких методов предполагает определение температуры на основе измеренных неинвазивно значений интенсивности теплового излучения с поверхности тканей. Среди существующих пирометров широко используются яркостные, радиационные, частичного излучения, спектрального отношения. С точки зрения сведений о температуре объекта, информативность регистрируемого сигнала зависит от чувствительности элементов на оптическом входе и алгоритма обработки данных прибором. В общем случае погрешности пирометров спектрального отношения меньше, чем у пирометров полного или частичного излучения. Показания этих пирометров не зависят от расстояния до объекта, а также от поглощения излучения в промежуточной среде между объектом и пирометром, если излучательная способность на всех длинах волн одинакова.

При проведении измерений в условиях искусственного кровообращения интенсивность падающего инфракрасного излучения на приемную площадку пирометра сильно зависит от влияния переменных внешних факторов (в основном, от параметров среды распространения излучения), что приводит к появлению значительной погрешности [1].

Перспективным методом бесконтактного измерения температуры в хирургии является термография. Применение способа сканирования 3D поверхности биологического объекта [2] и последующего построения формы кривой спектрального распределения для плотности мощности электромагнитного излучения объекта в инфракрасном диапазоне, позволит реализовать систему бесконтактного измерения температуры сердца на основе пирометра с наименьшей погрешностью.

Пирометрические методы измерений температуры. Пирометрические методы измерения температуры основаны на законах, которые устанавливают связь между излучением абсолютно черного тела (АЧТ) и его температурой. Известно, что полная энергия, которая излучается с единицы поверхности АЧТ в единицу времени, определяется законом Стефана-Больцмана:

$$M_T^0 = \varepsilon \sigma T^4,$$

где $\varepsilon < 1$ – излучательная способность, зависящая от материала (тканей миокарда) и от состояния и температуры его поверхности, $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана, T – температура биологического объекта (сердца), К .

© В. В. Шлыков, В. А. Данилова, М. Диденко. 2017

Положение максимума излучения определяется из закона смещения Вина

$$\lambda_{\max} = 2,8978 \cdot 10^{-3} \cdot T^{-1}.$$

Примерно три четверти энергии приходится на область $\lambda > \lambda_{\max}$.

Для контроля температуры в условиях искусственного кровообращения целесообразно использовать пирометры спектрального отношения. Эти пирометры показывают температуру миокарда T_m , при которой АЧТ имеет такое же относительное спектральное распределение мощности электромагнитного излучения, что и исследуемый объект с действительной температурой T_i (для всех длин волн).

Показания спектрального отношения пирометра для АЧТ (или серого тела) соответствуют действительной температуре или излучательной способности тканей сердца. Если излучательная способность ε зависит от длины волны, то связь между действительной и измеряемой температурой определяется выражением:

$$\frac{1}{T_i} = \frac{1}{T_m} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \ln \frac{\varepsilon_{\lambda 1}}{\varepsilon_{\lambda 2}},$$

где $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ – вторая константа излучения, $\varepsilon_{\lambda 1}$ и $\varepsilon_{\lambda 2}$ – коэффициенты излучательной способности сердца на длинах волн λ_1 и λ_2 .

Таким образом, пирометры спектрального отношения, в отличие от пирометров полного или частичного излучения, показывают действительную температуру объектов (сердца) и их показания не зависят от излучательной способности тела при условии, что $\varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2}$.

При измерении температурных полей важно учитывать участок площади и расстояние до объекта, свойства оптической системы пирометра. В общем случае, расчет доли излучаемой объектом энергии, входящей в телесный угол оптической системы выполняется по формуле:

$$\Delta\Phi = \varepsilon_{\lambda} \cdot \left[\frac{D^2}{4l^2} \right] \cdot \Delta A \cdot \tau_c \cdot \sigma \cdot T^4,$$

где ΔA – участок площади объекта, D – диаметр входного зрачка объектива, l – расстояние до объекта, τ_c – коэффициент пропускания оптической системы, величина, зависящая от телесного угла Ω , в направлении которого вырезается угол.

При измерении пирометром (Optris MS Plus) температуры предметов на расстоянии до объекта $l = 14 \text{ см}$, диаметр области измерения будет 13 мм, что дает возможность провести точные замеры температуры различных участков миокарда (рис. 1).

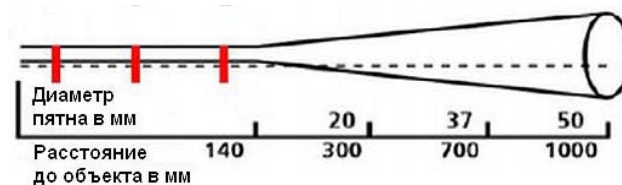


Рис. 1 – Зависимость размеров пятна визирования от расстояния до объекта

Если пирометр показывает температуру на поверхности тканей $T_m = 298 \text{ К} (25^\circ \text{C})$, а излучательная способность тканей миокарда $\varepsilon = 0,95$ на длине волны $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$, вычисленная температура миокарда составляет:

$$T_i = \frac{1}{(1/298) + (\log 0,95/9613)} = 298,2 \text{ К},$$

Следовательно, при низких температурах $T_m = 10 - 40^\circ \text{C}$ в условиях искусственного кровообращения и погрешности измерения температуры тепловизором $\pm 0,7^\circ \text{C}$ (для пирометра Optris MS Plus) измеряемую температуру миокарда можно считать действительной $T_i \approx T_m$.

Влияние материалов на контроль температуры. Основная конструкция инфракрасного термометра (пирометр Optris MS Plus) представлена на рисунке 2. С помощью входной оптики, излучаемые инфракрасные лучи фокусируются на инфракрасный сенсор. Детектор генерирует электрический сигнал соответствующий излучению, который затем усиливается и может быть использован после аналого-цифрового преобразования (АЦП) для дальнейшей обработки. Цифровая обработка сигнала на основе микропроцессора обеспечивает преобразование сигнала в выходное значение, пропорциональное температуре объекта, которое затем либо отображается на дисплее цифрового интерфейса, либо предоставляется после цифро-аналогового преобразования (ЦАП) как аналоговый сигнал.

Инфракрасный сенсор в подавляющем большинстве пирометров спектрального отношения использует двухслойные фотодиодные структуры, верхний слой которых имеет максимальную чувствительность в коротковолновой области спектра, нижний – в длинноволновой. Полосы спектральной чувствительности этих приемников составляют десятки и сотни нанометров, что исключает погрешность, которая обусловлена непостоянством $\varepsilon_{\lambda 1}$ и $\varepsilon_{\lambda 2}$ [4].

Излучательная способность представляет интегральную степень черноты серого тела. Величина ε зависит от длины волны излучения λ , температуры T и обобщенного параметра состояния поверхности миокарда – шероховатость, наличие жировых отложений и т.п. В таблице 1 представлены значения ε для некоторых материалов [5], применяемых при искусственном кровообращении.

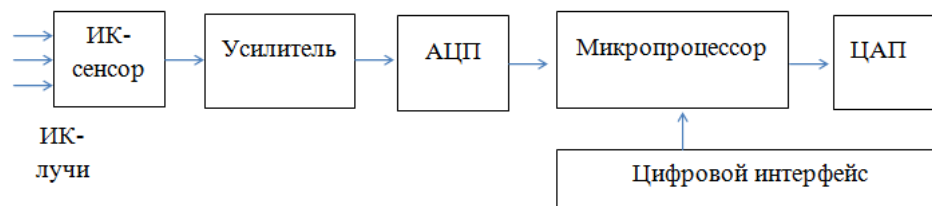


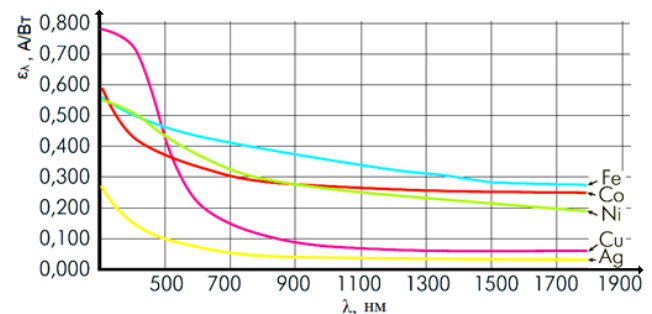
Рис. 2 – Блок-схема инфракрасного пирометра

Таблица 1 – Излучательная способность ε для материалов, применяемых при искусственном кровообращении

Материал	T °	ε
Пластик (ПЭ, ПП, ПВХ)	20	0,94
Резина мягкая	23	0,94
Стекло	90	0,94
Золото	130	0,02
Серебро	20	0,02
Железо полированное	424 – 1020	0,147 – 0,377
Железо обработанное	20	0,24
Шелк	20	0,78
Кожа человеческая	36	0,98
Лед гладкий	0	0,97
Лед неровный	0	0,99
Кровь	36	0,95
Вода	38	0,67

Результат измерения пирометра спектрального отношения зависит не столько от абсолютного значения излучательной способности объекта, сколько от спектральной зависимости $\varepsilon = f(\lambda)$ [6]. Для примера на рис. 2 (Optris MS Plus) приведены спектральные зависимости излучательной способности $\varepsilon_{\lambda 1}$ и $\varepsilon_{\lambda 2}$ для некоторых металлов: Fe, Ni, Cu, Ag, Co. Следует отметить, что они характеризуют большинство материалов.

Кровь отдает накопленное тепло в коже и подкожных слоях кровеносных сосудов и капиллярах, и аккумулирует тепло преимущественно в сердце, печени и почках за счет обменных процессов во внутренних органах [7]. Этим процессом теплообмена обусловлено неоднородное поверхностное распределение температуры тела человека при неизменных окружающих условиях. Поскольку кожа и кровь человека имеет высокий коэффициент излучения $\varepsilon_{\lambda} \geq 0,95$, изменение её температуры приводит к значительному изменению мощности испускаемого инфракрасного излучения, которая регистрируется пирометром. Низкий коэффициент излучения хирургических инструментов из металла минимизирует их влияние на определение температуры тканей органов и крови. Это позволяет с высоким разрешением регистрировать точечную температуру сердца, статичное распределение температуры и динамику температурного распределения в миокарде. Характер распределения температуры в миокарде свидетельствует о наполнении сосудов кровью, а также позволяет судить о сосудистых расстройствах и ишемии, позволяет определить глубину и степень охлаждения и прогрева сердца в условиях искусственного кровообращения.

Рис. 3 – Спектральные зависимости излучательной способности ε_{λ} от длины волны λ для некоторых металлов

Спектральные зависимости показывают, что все зависимости $\varepsilon = f(\lambda)$ имеют однотипный характер – с ростом длины волны спектральная излучательная способность ε_{λ} снижается. Поэтому, по измеренному положению максимума спектра можно определить температуру объекта.

В соответствии с законом Кирхгофа, спектральный коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ равен спектральному коэффициенту поглощения $\alpha(\lambda, T)$. Поэтому спектральная зависимость излучательной способности тканей миокарда должна коррелировать при гипотермии и гипертермии в условиях искусственного кровообращения. В общем случае, оценка теплового состояния миокарда в зависимости от условий проведения кардиохирургической операции может осуществляться: по нормированным температурам нагрева (превышениям температуры), избыточной температуре, динамике изменения температуры во времени, путем сравнения измеренных значений и т.п.[8]. Температурный рельеф поверхности миокарда зависит от уровня наполненности тканей сердца кровью, от перераспределения крови при изменении просвета сосудов в условиях искусственного кровообращения, от степени её охлаждения при гипотермии и нагревания при гипотермии сердца, а также от тепловых свойств миокарда (теплопроводности, теплоемкости).

Пирометрическая система бесконтактного контроля температуры. Бесконтактные средства измерения температуры базируются на восприятии термоприемником (инфракрасным оптическим сенсором) спектра энергии электромагнитной излучения, которое излучает любое тело с температурой выше абсолютного нуля, в частности сердце в условиях искусственного кровообращения. Поскольку значение показателя излучательной способности миокарда ε_{λ} при одной и той же температуре не меняется с

длиной волны, применение пирометра спектрального отношения Optris MS Plus не вносит дополнительной инструментальной погрешности и является оптимальным по оценке влияния хирургических материалов на спектральную зависимость излучательной способности в условиях искусственного кровообращения.

Система бесконтактного контроля температуры построена на основе микропроцессора Arduino Uno Rev3 [9] и инфракрасного пирометра Optris MS Plus, который имеет следующие отличительные особенности [10]:

- Прецизионная оптика для точного неконтактного измерения температуры;
- Диапазон измерения от -32 до 530°C ;
- Спектральный диапазон $8-14\text{ мкм}$;
- Погрешность измерения температуры $\pm 0,5\%$ или $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$;
- Время отклика $0,3$ секунды для быстрого сканирования объекта и нахождения точек перегрева;
- Точное измерение объекта диаметром 13 мм на любом расстоянии, меньшем 140 мм ;
- Время отклика составляет не более $0,3\text{ с.}$;
- Регулируемый коэффициент теплового излучения (эмиссии) в диапазоне от $0,1$ до $1,1$;
- Оптическое разрешение $20:1$;
- Лазерное прицеливание на объект измерения;
- Интерфейсы подключения – USB, тип входа термодатчика К.

Система визуального управления микропроцессором Arduino Uno Rev3 и инфракрасным пирометром Optris MS Plus реализована в среде разработки приложений LabVIEW 2010 National Instruments [11]. Среда разработки LabVIEW позволяет использовать стандартные средства коммуникации из пакета виртуальных инструментов National Instruments VISA и дополнительные из пакета VI Package Manager 2016 с интерфейсом для Arduino, которые позволяют реализовать управление системой с персонального компьютера посредством USB интерфейса.

Блок-схема пирометрической системы бесконтактного контроля температуры, представленная на рисунке 4, включает следующие функциональные элементы:

микропроцессор Arduino Uno Rev3, схема управления шаговыми двигателями, система позиционирования на основе шаговых двигателей, инфракрасного пирометра Optris MS Plus. Микропроцессор Arduino Uno Rev3 программируется в среде Arduino Integrated Development Environment на языке C++ и обеспечивает автоматическое управление шаговыми двигателями и системой позиционирования пирометра в заданной области миокарда. Схема управления шаговыми двигателями реализована на основе трех драйверов шагового двигателя ULN2003, которая позволяет работать с электропитанием моторов от 5 В и от 12 В . Драйвер ULN2003 совместим со стандартной библиотекой Arduino Stepper и имеет 4 канала установления режимами работы моторов. Система позиционирования реализована на основе трех шаговых двигателей 28BYJ-48 5 В и трех прецизионных

приводных валов THSL-300-8D для 3D принтера длиной 150 мм , с шагом резьбы 8 мм и диаметром 8 мм .

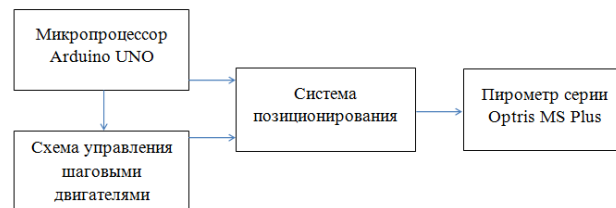


Рис. 4 – Блок-схема пирометрической системы бесконтактного контроля температуры

Микропроцессор Arduino Uno Rev3 подключен к драйверам шагового двигателя ULN2003 по стандартной схеме включения в соответствии со спецификацией и техническим описанием [9]. Фрагмент принципиальной электрической схемы для микропроцессора Arduino Uno Rev3 представлен на рис. 5. Коммуникация с персональным компьютером осуществляется посредством USB интерфейса, а питание микропроцессора и драйверов шаговых двигателей от источника 5 В или от USB порта компьютера.

Для синхронизации вращения шаговых двигателей 28BYJ-48 применяется привязка единичного шага вращения мотора к встроенному таймеру микропроцессора Arduino Uno Rev3. Представленный фрагмент исполняемого модуля программы показывает способ реализации управления направлением и шагом вращения двигателей:

```

int steps_0;
int steps_Y=1024; // число шагов при вращении по оси Y
int steps_left=4095; // число шагов при вращении влево по оси X
int steps_right=4095; // число шагов при вращении вправо по оси X

long time;
unsigned long last_time;
unsigned long currentMillis;
boolean DirectionX = true; // направление вращения по оси X
boolean DirectionY = true; // направление вращения по оси Y

for(;;) // бесконечный цикл исполняемого модуля
{
  while(steps_left>0){
    currentMillis = micros(); // значение встроенного таймера
    if(currentMillis-last_time>=1000){
      stepperX(7); // режим работы при вращении по оси X
      time=time+micros()-last_time; // синхронизация по таймеру
      last_time=micros(); // чтение таймера
      steps_left--;
    }
  }
}
  
```



```

}
}
steps_0=steps_right-steps_Y;
while(steps_right>steps_0){
currentMillis = micros();
if(currentMillis-last_time>=1000){
stepperY(7); // режим работы при враще-
нии по оси Y
time=time+micros()-last_time; // синхрони-
зация по таймеру
last_time=micros(); // чтение таймера
steps_right--;
}
}
}

```

```

if(steps_left<=0) {
steps_left=4095; // восстано-
вление счетчика шагов
DirectionX=!DirectionX; // изменение направ-
ления вращения
}

if(steps_right<=0) {
steps_right=4095; // восстано-
вление счетчика шагов
DirectionY=!DirectionY; // изменение направ-
ления вращения
}
}
}

```

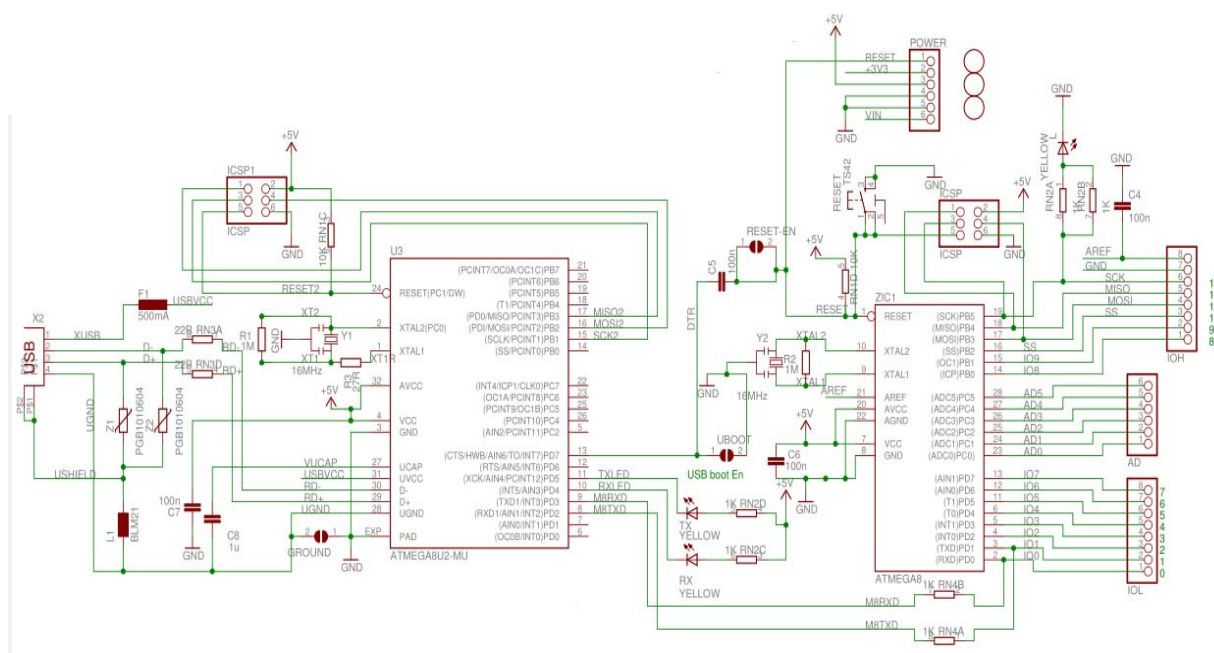


Рис. 5 – Принципиальная электрическая схема микропроцессора Arduino Uno

Система позиционирования реализована на основе трех шаговых двигателей 28BYJ-48 5В и трех прецизионных приводных валов THSL-300-8D для 3D принтера имеет вид, представленный на рисунке 6. Технические параметры этого двигателя соответствуют национальному электронному стандарту SJ/T10689-95. Шаговый двигатель 28BYJ-48 имеет напряжение питания 5В, класс энергобезопасности А и уровень шума <40dB, что позволяет использовать его в энергосберегающих системах с малым уровнем шума. При разработке программного обеспечения были учтены следующие параметры двигателя 28BYJ-48: количество шагов: 64, количество микрошагов 4096, каждый шаг 5,625 градусов, вращающий момент 34,3 Н/м, номинальная тяга 3500 г/см.

Приводной вал THSL-300-8D для 3D принтера имеет латунную приводную втулку. При позиционировании один оборот вала соответствует прохождению расстояния в 8мм. Вал изготовлен из закаленной стали,

что обеспечивает прочность конструкции и общую массу приводного вала не более 105 г.

В среде разработки приложений LabVIEW 2010 разработана система визуального управления пирометрической системой бесконтактного измерения температуры, которая реализована на основе микропроцессора Arduino Uno Rev3 и пирометра Optiris MS Plus. Блок-схема системы визуального управления, представленная на рис. 7, состоит из следующих программных блоков:

визуального интерфейса управления, модулей настройки портов персонального компьютера (ПК) для подключения инфракрасного пирометра Optiris MS Plus и микропроцессора Arduino Uno Rev3, модуля синхронизации включения и выключения пирометра, модулей управления движением пирометра на валу THSL-300-8D, визуальных компонентов LabVIEW отображения и сохранения регистрируемой температуры.

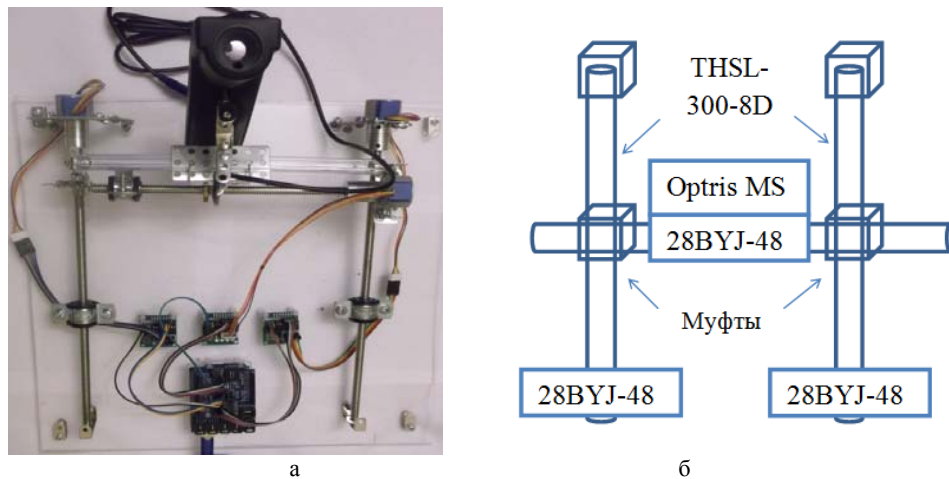


Рис. 6 – Система позиционирования: а – реализованная; б – схематическое изображение

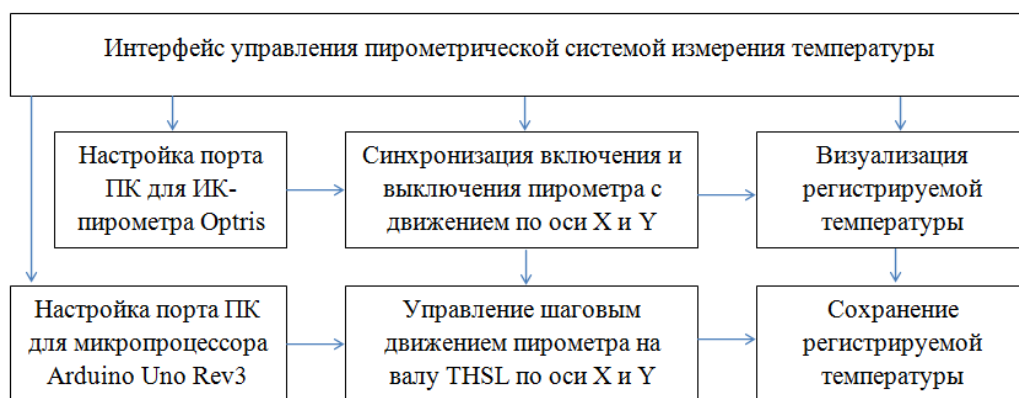


Рис. 7 – Система визуального управления пирометрической системой бесконтактного измерения температуры

Интерфейс управления для системы бесконтактного контроля температуры в среде разработки LabVIEW представлен на рис. 8. Визуальный компонент Waveform Amplitude позволяет в цвете предста

вить динамику изменения температуры от 0°C (“синий”) до 40°C (“красный”) по движению градации цветов относительно установленного максимального значения температуры.

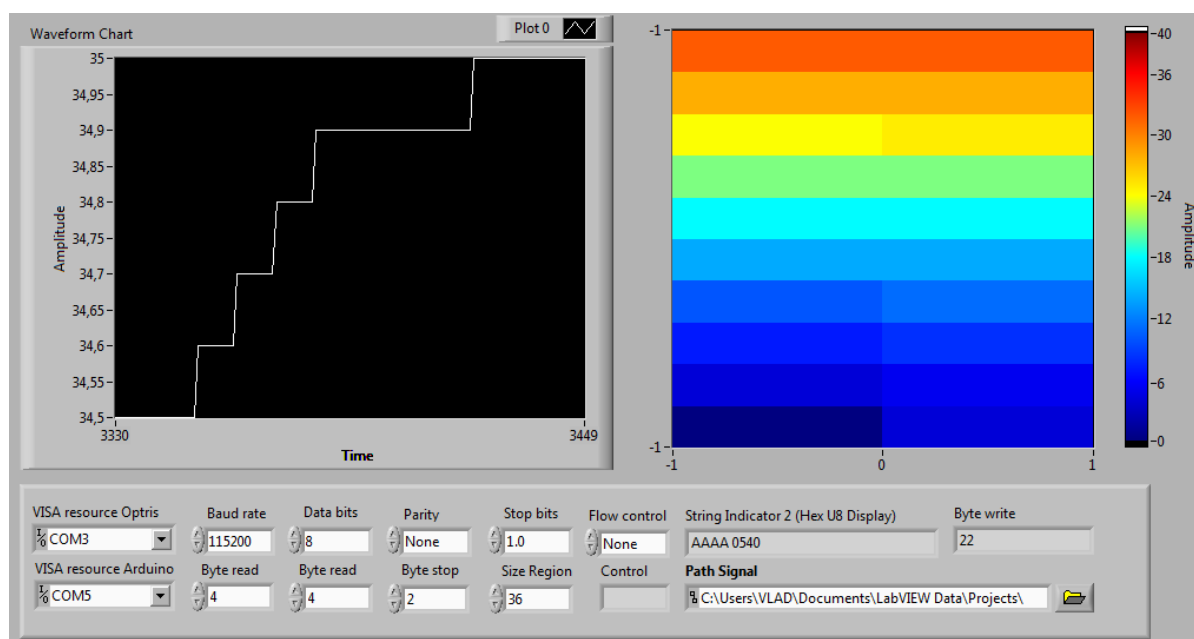


Рис. 8 – Интерфейс управления в LabVIEW для системы бесконтактного контроля температуры

Фрагмент программного кода для системы бесконтактного контроля температуры в среде разработки LabVIEW представлен на рисунке 9. Программная реализация в виде виртуального устройства в среде LabVIEW обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Подключение микропроцессора Arduino Uno Rev3 и пирометра Optris MS Plus через USB интерфейс к персональному компьютеру;
2. Управление микропроцессором Arduino Uno Rev3 и чтение данных температуры в цикле While Loop из пирометра Optris MS Plus с помощью компонента VISA;

3. Управление шаговым движением пирометра на валу THSL-300-8D по оси X (Y) путем синхронизации вращения двигателей 28BYJ-48 в моменты времени включения ("R") и выключения ("S") пирометра Optris MS Plus;

4. Отображение в компоненте Waveform и сохранение регистрируемой температуры в текстовый файл по заданному пути Path Signal.

Пирометрическая система бесконтактного контроля температуры позволяет визуализировать распределение температуры на поверхности миокарда (рис. 10) и определить области на поверхности миокарда с неравномерными градиентами температуры.

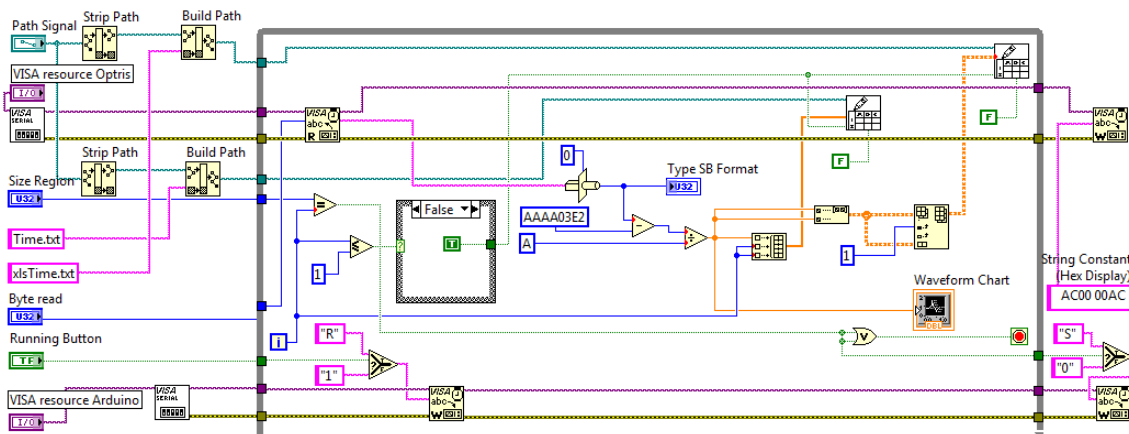


Рис. 9 – Фрагмент программного кода в LabVIEW для системы бесконтактного контроля температуры

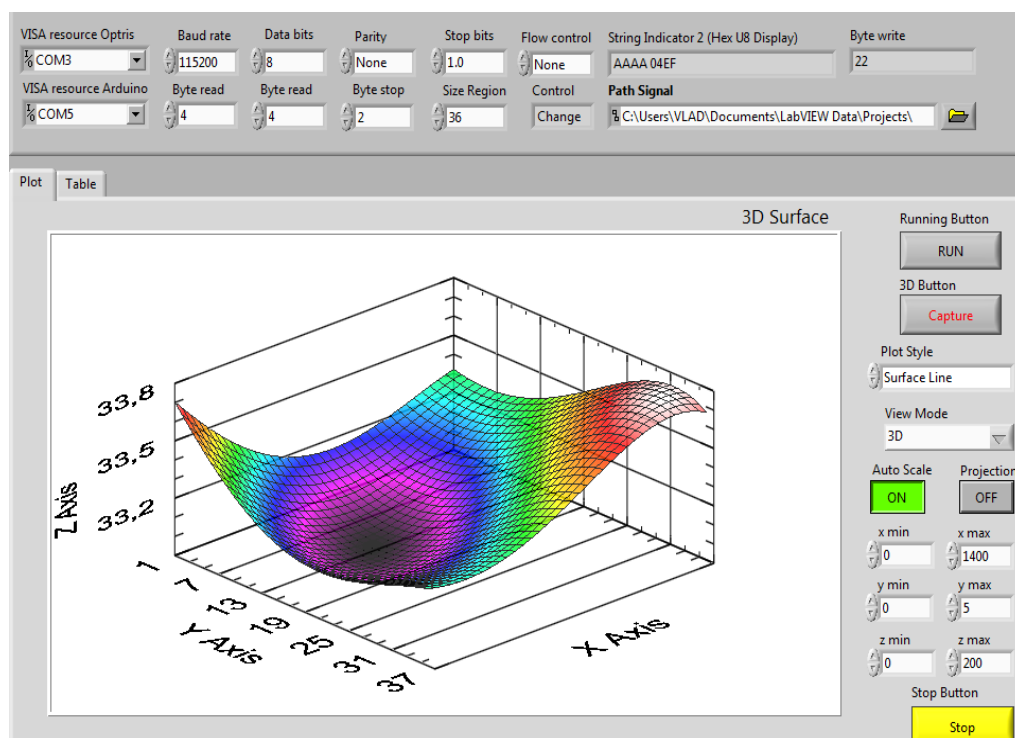


Рис. 10 – Распределение температуры на поверхности миокарда

Пирометрическая система бесконтактного контроля температуры на основе микропроцессора

Arduino Uno Rev3 и пирометра Optris MS Plus имеет следующие основные технические характеристики:

Таблица 2 – Технические характеристики пирометрической системы бесконтактного контроля температуры

1.	Диапазон измерения температуры	от -5 до 40 °C
2.	Спектральный диапазон	8–14 мкм
3.	Погрешность измерения температуры	±0,5% или ±0,7 °C
4.	Расстояние до объекта	не более 140 мм
5.	Коэффициент теплового излучения	0,1 до 1,1
6.	Оптическое разрешение	20:1
7.	Область сканирования	70 x 70 мм
8.	Время отклика	0,3 секунды
9.	Время сканирования	36 секунд
10.	Напряжение питания	5 В, от USB
11.	Уровень шума	не более 40 dB
12.	Интерфейсы подключения к ПК	2 x USB

Для уменьшения погрешности измерения температуры угол визирования пирометра Optris MS Plus должен быть минимален, поскольку при большом угле визирования пирометр будет измерять некоторую среднюю температуру, складывающуюся из температуры контролируемого объекта и температуры фона, который попадает в поле зрения пирометра. При этом

если температура операционного поля будет меньше температуры миокарда, пирометр будет занижать реальную температуру объекта и наоборот, если температура операционного поля будет выше температуры миокарда, – завышать температуру объекта.

Исходя из приведенных технических характеристик, пирометрическую систему бесконтактного измерения температуры можно рекомендовать для измерения температур биологических объектов в хирургии, которые имеют размер не более 5 – 9 см на расстояниях 1 – 15 см, что обеспечивает высокую точность измерений и визуализации температурного поля.

Выводы. Таким образом, дальнейшая разработка и практическая реализация системы бесконтактного измерения температуры сердца на основе пирометра является целесообразной, поскольку ее применение позволит значительно повысить точность измерения температуры, особенно в условиях искусственного кровообращения и сложных внешних дестабилизирующих факторов.

Полученные с помощью пирометрической системы распределения температуры в миокарде дадут дополнительную диагностическую информацию о наполнении сосудов сердца кровью, а также позволят оценить степень ишемии сосудов в условиях искусственного кровообращения.

Список литературы:

1. Статут залізниць України [Текст]. – Кабінет Міністрів України, 1998. – № 457.
2. Rock Engineering Research Foundation Stiftelsen Bergteknisk Forskning. Practical Application of 3D Laser Scanning Techniques to Underground Projects, phase 2-3. Quanhong Feng: MultiInfo 3D Laser Scan Solution AB [Text]. – Stockholm, 2012. – 67 p. – Available at: http://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/250/Rapport_114_NY_G5.pdf
3. Шестаков, К. М. Лабораторный практикум по курсу «Промышленная электроника» [Текст]: уч. пос. / К. М. Шестаков, Ю. К. Бобко. – Минск: Белгосуниверситет, 1999. – 60 с.
4. Фрунзе, А. Пирометры спектрального отношения. Преимущества, недостатки, пути их устранения [Текст] / А. Фрунзе // Фотоника. – 2009. – № 4. – С. 32–37.
5. Пирометры Dwyer: на гребне прогресса. СВ АЛ'ТЕРА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.svaltera.ua/upload/press-center/articles/pirometry_dwyer.pdf
6. Магунов, А. Н. Спектральная пирометрия (обзор) [Текст] / А. Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 4. – С. 5–28.
7. Скрипаль, А. В. Тепловизионная биомедицинская диагностика [Текст]: уч. пос. / А. В. Скрипаль, А. А. Сагайдачный, Д. А. Усанов. – Саратов, 2009. – 118 с. – Режим доступа: http://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2014/07/04/teploviz_diagnostika_ves_tekst_2009_13.pdf
8. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования [Текст]. – 6-е изд. с изм. и доп. – Москва, 2004.
9. Arduino. Arduino UNO Reference Design [Electronic resource]. – Available at: <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino-uno-schematic.pdf>
10. Optris GmbH. Optris Infrared thermometers. Data Sheet Optris MS LT Series [Electronic resource]. – Available at: <http://www.optris.ru/ms>
11. LabVIEW 2010 National Instruments. LabVIEW Documentation Resources [Electronic resource]. – Available at: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371361g.zip>

Bibliography (transliterated):

1. Statut zaliznyts Ukrainy (1998). Kabinet Ministriv Ukrainy, No. 457.
2. Rock Engineering Research Foundation Stiftelsen Bergteknisk Forskning. Practical Application of 3D Laser Scanning Techniques to Underground Projects, phase 2-3. Quanhong Feng: MultiInfo 3D Laser Scan Solution AB (2012). Stockholm, 67. Available at: http://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/250/Rapport_114_NY_G5.pdf
3. Shestakov, K. M., Bobko, Yu. K. (1999). Laboratorny praktikum po kursu «Promyshlennaya elektronika». Minsk: Belgouniversitet, 60.
4. Frunze, A. (2009). Pirometry spektral'nogo otnosheniya. Preimushchestva, nedostatki, puti ih ustraneniya. Fotonika, 4, 32–37.
5. Pirometry Dwyer: na grebne progressa. SV AL'TERA. Available at: http://www.svaltera.ua/upload/press-center/articles/pirometry_dwyer.pdf
6. Magunov, A. N. (2009). Spektral'naya pirometriya (obzor). Pribyori i tekhnika eksperimenta, 4, 5–28.
7. Skripal', A. V., Sagaydachnyi, A. A., Usanov, D. A. (2009). Teplovizionnaya biomeditsinskaya diagnostika. Saratov, 118. Available at: http://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2014/07/04/teploviz_diagnostika_ves_tekst_2009_13.pdf
8. RD 34.45-51.300-97. Ob'em i normy ispytaniy elektrooborudovaniya (2004). Moscow.
9. Arduino. Arduino UNO Reference Design. Available at: <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino-uno-schematic.pdf>
10. Optris GmbH. Optris Infrared thermometers. Data Sheet Optris MS LT Series. Available at: <http://www.optris.ru/ms>
11. LabVIEW 2010 National Instruments. LabVIEW Documentation Resources. Available at: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371361g.zip>

Поступила (received) 06.07.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Пирометрическая система контроля температуры/ Шлыков В. В., Данилова В. А., Диденко М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.11–19. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Пірометрична система контролю температури/ Шликов В. В., Данілова В. А., Діденко М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.11–19. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Pyrometric system of temperature control/ Shlykov V., Danilova V., Didenko M. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 20 (1242). – P.11–19. – Bibliogr.:11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шликов Владислав Валентинович – кандидат технічних наук, доцент кафедри біомедичної інженерії ФБМІ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: v.shlykov@kpi.ua.

Данілова Валентина Анатоліївна – асистент кафедри біомедичної інженерії ФБМІ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: valnaa@ukr.net.

Діденко Микослав – студент кафедри біомедичної інженерії ФБМІ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056;

Шлыков Владислав Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии ФБМИ, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: v.shlykov@kpi.ua.

Данилова Валентина Анатольевна – ассистент кафедры биомедицинской инженерии ФБМИ, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056, тел.: +380(44) 204-96-83, e-mail: valnaa@ukr.net.

Диденко Микослав – студент кафедры биомедицинской инженерии ФБМИ, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056.

Shlykov Vladyslav – PhD, associate Professor of Biomedical Engineering, Department of BME, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056,

Danilova Valentyna – assistant of Biomedical engineering, Department of BME, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: valnaa@ukr.net.

Didenko Miroslav – student of Biomedical engineering, Department of BME, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056.

УДК 681.513.3

Я. А. КУЛИК, Б. П. КНИШ, М. В. ШКУРАН, О. В. ЧЕРНОВОЛИК

РОЗРОБКА СИСТЕМИ СТЕЖЕННЯ ЗА РУХОМ СОНЦЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ККД СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Обґрунтовано вибір типу реалізації структурної схеми для 2-хосьового поворотного механізму для сонячної панелі. Розроблено функціональну схему слідкування за рухом сонця через фотодатчики на цифровій елементній базі та програмне забезпечення на базі пристрою Arduino. Обґрунтоване розміщення фотодатчиків, яке дозволяє виконувати незалежне спостереження по 2-м осям. Розроблений пристрій збільшує вартість лише на 10 %, дозволяє підвищити ККД з 10–15 % до 40–55 % і має термін окупності 5–6 років.

Ключові слова. 2-хосьвий сонячний трекер, схема стеження за рухом сонця через фотодатчики.

Обоснован выбор типа реализации структурной схемы для 2-хосьового поворотного механизма для солнечной панели. Разработана функциональная схема слежения за движением солнца через фотодатчики на цифровой элементной базе и программное обеспечение на базе устройства Arduino. Обоснованное размещение фотодатчиков, которое позволяет выполнять независимое наблюдение по 2-м осям. Разработанное устройство увеличивает стоимость всего на 10%, позволяет повысить КПД с 10–15% до 40–55% и имеет срок окупаемости 5–6 лет.

Ключевые слова. 2-хосьвий солнечный трекер, схема слежения за движением солнца через фотодатчики.

Solar energy is environmentally friendly, independent of fossil sources, autonomous, does not require high cost for development and maintenance. The choice of the type of implementation of the structural scheme for the 2-hand rotary mechanism for the solar panel is substantiated. The functional scheme of monitoring the motion of the sun through photoconductors on a digital element base and software on the basis of the Arduino device, which controls 2 servo drives depending on the angle of inclination of the sun relative to the solar panel, is developed. Grounded posting of photo sensors, which allows you to perform independent observation on the 2nd axes. The developed device increases the cost by only 10%, allows you to increase the efficiency of 10–15% to 40–55% and has a payback period of 5–6 years when using the "green tariff".

Keywords. 2-track solar tracker, tracking the sun's motion through photosensors.

© Я. А. Кулик, Б. П. Книш, М. В. Шкуран, О. В. Черноволик. 2017

Вступ. Оскільки викопні ресурси, через свою обмеженість, стають все дорожчими, а відновлювальні джерела, через свою популярність, стають все доступнішими, то очевидно, що перехід від традиційних джерел енергії до відновлювальних є неминучим [1]. Підвищення ефективності відновлювальних джерел енергії робить їх більш популярними та затребуваними [2].

Сонячна система енергопостачання складається з таких елементів:

- сонячної батареї (фотоелектричного сонячного модуля);
- контролера заряду;
- накопичувача енергії (акумулятора);

– інвертора.

Переважна більшість сонячних панелей встановлюється на нерухому опору та орієнтується рівно на південь. Таке встановлення найбільш надійне, має мінімальну вартість та прискорює монтаж. Але при зміні кута між сонячними променями і площиною фотоелектричної панелі змінюватиметься і кількість сонячної енергії, що потрапляє на площину з фотоелементами, відповідно і кількість виробленої електроенергії буде змінюватись на протязі доби та при зміні пори року [3].

Джерелом живлення для роботи трекера є сама сонячна панель, тому він є повністю автономним (рис. 1).

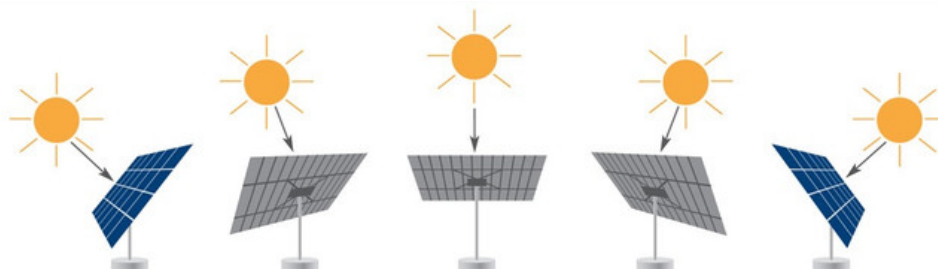


Рис. 1 – Сонячний трекер

Постановка проблеми та мета даної роботи.

Як відомо, для отримання максимальної потужності від сонячних батарей необхідно, щоб сонячні промені потрапляли на площину батарей перпендикулярно. При такому напрямку променів ККД сонячних батарей може досягати 50–55 %. Для стаціонарно встановлених батарей цей показник може знижуватися до 10–15 % з-за зміни кута падіння сонячних променів [3].

Трекери можуть бути реалізовані на основі різних принципів:

1. Управління двигунами за допомогою декількох фотоприймачів. Такий пристрій має два або більше фоторезисторів. При русі сонця освітленість фоторезисторів стає різною; пристрій аналізує освітленість і передає керуючі сигнали на двигуни до моменту, коли потік світла на всіх фотоелементах буде однаковий і електродвигун повертає сонячну панель.

2. Управління рухом трекера по азимутальних і зенітних кутах. Для правильного позиціонування сонячних панелей, потрібно компенсувати два переміщення Землі [4]:

- добове переміщення, пов'язане з обертання Землі навколо своєї осі;
- річне переміщення, пов'язане з обертання Землі навколо Сонця.

Недоліком такого варіанту є те, що Сонце в різних точках планети рухається по-різному і такі системи потребують унікальних налаштувань. Сонячні трекери вигідні в першу чергу для невеликих сонячних електростанцій, які не розташовані в місцях з високою штурмовою активністю [5].

Апаратна реалізація системи стеження за рухом сонця. Системи стеження за сонцем можна розділити на два види: ті, які рухаються за програмою, в якій прописані зенітні і азимутальні кути для конкретної місцевості та ті, які використовують світлочутливі

датчики для безпосереднього слідкування за сонцем. Другі, в свою чергу, можна побудувати як на аналогових елементах так і з використанням програмованих контролерів, що збільшує функціонал. Структурна схема реалізації системи стеження за сонцем на базі аналогових та цифрових елементів, і за календарем показано на рис. 2, 3 та 4 відповідно.

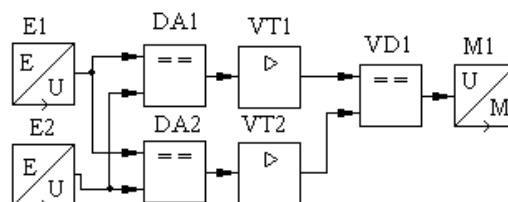


Рис. 2 – Структурна схема реалізації системи стеження за сонцем на базі аналогових елементів

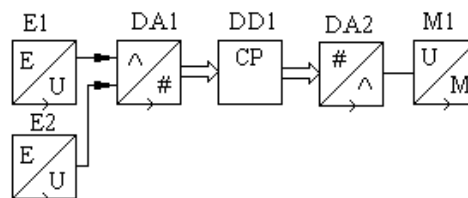


Рис. 3 – Структурна схема реалізації системи стеження за сонцем на базі цифрових елементів

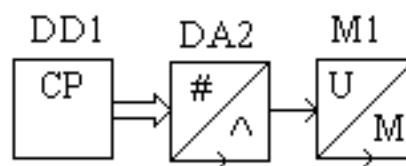


Рис. 4 – Структурна схема реалізації системи стеження за сонцем по відомих кутах на базі цифрових елементів

Електрична функціональна схема сонячного трекера на основі аналогових елементів зображено на рис. 5.

В даному випадку прототип сонячного трекера збирався на базі Arduino. Для обертання платформи в горизонтальній і вертикальній осі використовуються сервоприводи, кут повороту яких залежить від потужності падаючого на фоторезистори світла. Для реалізації знадобляться наступні елементи:

- Arduino UNO;
- сервопривід – 2х;
- фоторезистор – 4х;
- резистор 10 kOhm – 4х.

Головним завданням розміщення фотодатчиків є забезпечення рівного розподілу світла для кожного з чотирьох елементів. Це можна досягти двома способами: розмістити фоторезистори під прямим кутом один відносно одного, або встановити між ними світлонепроникну перегородку. Фоторезистори без перегородок будуть давати приблизно однакові. Для реалізації був обраний другий варіант (рис. 6).

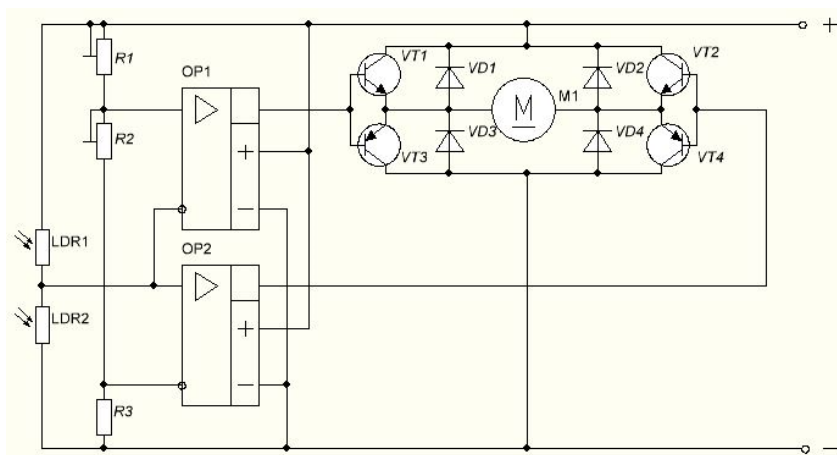


Рис. 5 – Електрична функціональна схема сонячного трекера на основі аналогових елементів

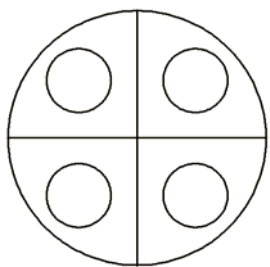


Рис. 6 – Розміщення фоторезисторів

Підключення світлочутливих елементів здійснюється за схемою подільника напруги. До Arduino фоторезистори підключаються наступним чином: один контакт підключається до джерела живлення, другий – до землі через понижуючий резистор, і точка між постійним резистором і змінним резистором – фоторезистором – підключається до аналогового входу мікроконтролера. На рис. 7 показана схема підключення фоторезистора до Arduino [4].

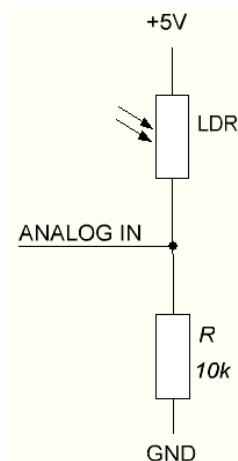


Рис. 7 – Схема підключення фоторезистора до Arduino

Для того щоб положення контролювалося пристроєм, необхідний датчик зворотного зв'язку – енкадер, який буде перетворювати кут повороту в електричний сигнал [5]. Для цього часто використовується потенціометр. При повороті бігунка потенціометра відбувається зміна його опору, пропорційно куту повороту. Таким чином, з його допомогою можна визначити поточний стан механізму. До сервоприводу під'єднується три дроти. Два з них відповідають за живлення мотора, третім подається керуючий сигнал, який використовується для встановлення положення пристрою.

Щоб задати сервоприводу бажане положення, необхідно надсилати керуючий сигнал. Керуючий сигнал – імпульси постійної частоти і змінної ширини. Положення сервоприводу, залежить від довжини імпульсів. Коли сигнал надходить в керуючу схему, наявний в ній генератор імпульсів виробляє свій імпульс, тривалість якого визначається через потенціометр. Інша частина схеми порівнює тривалість двох імпульсів. Якщо тривалість різна, включається електромотор. Напрямок обертання визначається тим, який з імпульсів коротше. Якщо довжини імпульсів рівні, електромотор не рухається.

Найчастіше імпульси виробляються з частотою 50 Гц. Це означає, що імпульс випускається і приймається раз в 20 мс. Зазвичай при цьому тривалість імпульсу в 1520 мкс означає, що сервопривід повинен зайняти середнє положення. Збільшення або зменшення довжини імпульсу змусить сервопривід повернутися за годинниковою або проти годинникової стрілки відповідно. При цьому існують верхня і нижня межі тривалості імпульсу. У бібліотеці Servo для Arduino за замовчуванням виставлені наступні значення довжин імпульсу: 544 мкс – для 0° і 2400 мкс – для 180°.

Результати моделювання, показані в даній статті, зроблені з допомогою середовища Arduino IO [6], показані на рис. 8.

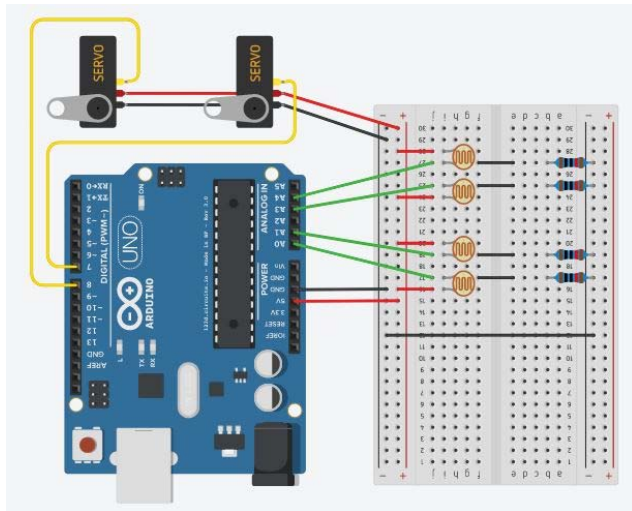


Рис. 8 – Модель електричної схеми для реалізації сонячного трекера у середовищі Arduino IO

Програмна реалізація системи стеження за рухом сонця. Загальний алгоритм роботи (рис. 9) полягає в обробці даних з фоторезисторів за допомогою АЦП. 4 елементи, тобто 4 показники, знаходимо середнє значення по лівій стороні ((верхній лівий + нижній лівий) / 2), аналогічно по правій, верхній та нижній сторонам. Якщо різниця по модулю між лівою і правою сторонами більше деякого порога, то здійснюємо поворот в сторону з більшим середнім значенням (рис. 10).

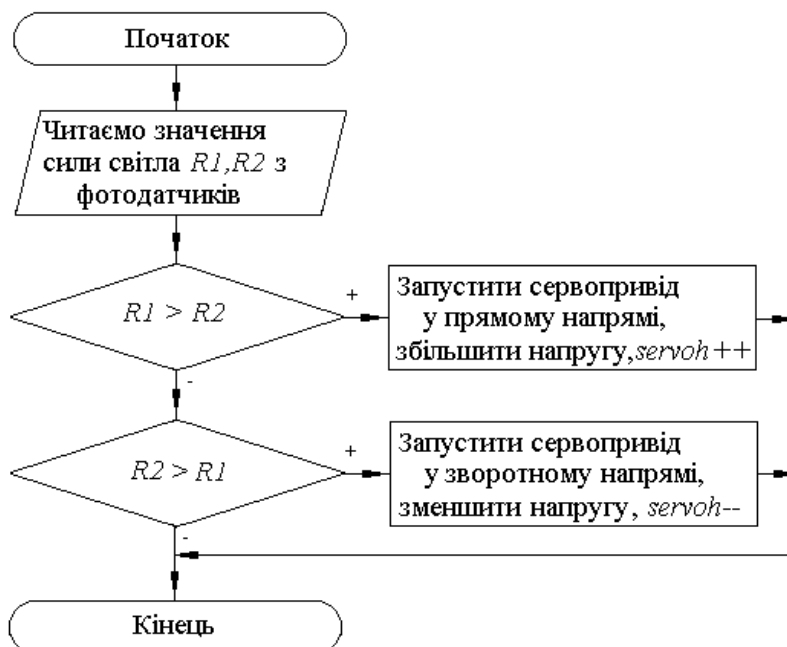


Рис. 9 – Схема програми для реалізації сонячного трекера на основі Arduino

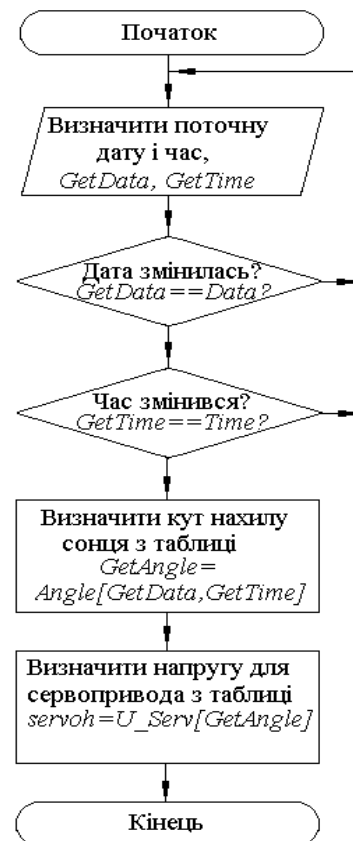


Рис. 10 – Схема програми для реалізації сонячного трекера за календарем

Для запобігання надмірного повороту платформи присутні програмні ліміти повороту, які в разі потреби можна відключити. Також, в кодї програми передбачена константа deadband, при різниці показників з датчиків менше значення цієї константи, контролер не даватиме команду на сервопривід. Таким чином усувається смикання привода. Результати моделювання роботи програмного забезпечення, показані в даній статті, зроблені з допомогою середовища Arduino IO (рис. 8). Схеми програми для реалізації керування сервоприводом, показані на рис. 9 та 10.

Економічна ефективність розробленої системи. При послідовно-паралельних з'єднаннях сонячні елементи утворюють сонячну (фотоелектричну) батарею. Потужність сонячних батарей, що серійно випускаються промисловістю, складає 50–300 Вт. На сонячних фотоелектричних станціях сонячні батареї використовуються

для створення фотоелектричних генераторів. Термін ефективної роботи таких станцій становить 20–30 років, а експлуатаційні витрати мінімальні [7].

Недоліком плоских фотоелементів для отримання електричної енергії є їх висока вартість (близько 0.75 дол. США/Вт) і значні площі, необхідні для розміщення фотоелектростанції [8].

Вартість сонячної станції потужністю 15 кВт приблизно 15000 у.о., заробіток від неї – 2700 у.о. в рік. Окупність – $15000/2700 = 5,6$ років. Чистий заробіток до 2030 року = $(13 - 5,6) * 2700 = 19980$ у.о.

Вартість такої ж станції встановленої на трекері приблизно 19500 у.о. Заробіток від неї 3780 у.о. в рік. Окупність – $19500/3780 = 5,2$ років. Чистий заробіток до 2030 року = $(13 - 5,2) * 3780 = 29484$ у.о. [9; 10].

Тепер для порівняння розрахуємо вартість стаціонарної сонячної станції на 21 кВт. Вартість такої станції встановленої приблизно 21000 у.о. Заробіток від неї 3780 у.о. в рік. Окупність – $21000/3780 = 5,6$ років. Чистий заробіток до 2030 року = $(13 - 5,6) * 3780 = 27972$ у.о.

Як видно з розрахунків, різниця у вартості стаціонарної станції та станції з трекерами близько 10 % на користь трекерів. Також трекер має наступні переваги:

– дозволена потужність сонячної станції для приватного домогосподарства обмежена цифрою в 30 кВт. Розмістивши ці ж панелі на трекері можна буде отримувати дохід як від 45 кіловатної станції;

– взимку сонячні панелі будуть розміщені під дуже гострим кутом до землі ($60-65^\circ$) на них практично не буде затримуватись сніг;

– для мережевих станцій, де присутні елементи українського виробництва, тариф вищий на 30 % [11].

– менша площа, яку займає станція.

Висновки. Встановлення сонячних панелей на рухомих платформах, які повертаються за сонцем, дає змогу значно підвищити ефективність використання сонячної енергії. Розроблений сонячний трекер дозволяє підвищити ККД сонячних панелей з 10–15 % до 40–55 %. Сонячні трекери більш доцільно робити для автономних сонячних електростанцій. Термін окупності при використанні «зеленого тарифу» складає 5–6 років. Результати були апробовані на науковій конференції [12].

Список літератури:

1. Sukhov, V. Analysis of mass-energy balance of unmanned aircraft fueled by solar energy [Text] / V. Sukhov, Y. Kozel // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, Issue 9 (87). – P. 10–18. doi: [10.15587/1729-4061.2017.101974](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101974).
2. Лимаренко, А. Н. Потенциал и необходимость развития нетрадиционных возобновляемых источников энергии в Украине [Текст] / А. Н. Лимаренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 5, № 8 (65). – С. 14–19. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/18120/15868>
3. Боблях, С. Р. Відроджувальні джерела енергії [Текст]: монографія / С. Р. Боблях, М. М. Мельничук, В. С. Мельник, Р. М. Ігнатюк. – Луцьк: Волинський національний університет ім. Лесі Українки, 2012. – 227 с.
4. Чернобровкін, А. В. Фотоелектричні системи живлення автономної апаратури: сонячні батареї [Текст] / А. В. Чернобровкін // Вісник Держгидрографії. – 2010. – С. 6–8.
5. Титко, Р. Відроджувальні Джерела Енергії (досвід Польщі для України) [Текст]: навч. пос. / Р. Титко, В. М. Калініченко. – Варшава: OWG, 2010. – 530 с.
6. Autodesk Circuits [Electronic resource]. – Available at: <https://circuits.io/>
7. Швець, Е. Я. Технології і матеріали сонячної енергетики [Текст]: монографія / Е. Я. Швець. – Запоріжжя: ЗДІА, 2007. – 239 с.
8. Відроджувана енергетика – одна з глобальних та ключових цілей людства [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://uare.com.ua/novyny/471-vidnovlyuvana-energetika-odna-z-globalnikh-ta-klyuchovikh-tsilej-lyudstva.html>
9. Інститут відроджуваної енергетики НАН України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ive.org.ua/>
10. Держенергоефективності України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://saee.gov.ua/uk>
11. Зелений тариф, впровадження проєктів для фізичних та юридичних осіб. Заробіток на альтернативній енергетиці [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ecosvit.net/ua/zeleniy-tarif>
12. Кулик, Я. А. Система стеження за рухом сонця [Електронний ресурс] / Я. А. Кулик, М. В. Шкуран // Матеріали XLVI Науково-технічної конференції факультету комп'ютерних систем і автоматики (2017). – Вінниця, 2017. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2017/paper/view/2402/2618>

Bibliography (transliterated):

1. Sukhov, V., Kozel, Y. (2017). Analysis of mass-energy balance of unmanned aircraft fueled by solar energy. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (9 (87)), 10–18. doi: [10.15587/1729-4061.2017.101974](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101974).
2. Limarenko, A. N. (2013). Potential and necessity to develop nontraditional renewable energy in Ukraine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (8 (65)), 14–19. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/18120/15868>
3. Bobliakh, S. R., Melniichuk, M. M., Ihnatiuk, R. M. (2012). Vidnovliuvalni dzhherela enerhii. Lutsk: Volynskiy natsionalnyi universytet im. Lesi Ukrainky, 227.
4. Chernobrovkin, A. V. (2010). Fotoelektrychni systemy zhyvlennia avtonomnoi aparatury: soniachni batarei. Visnyk Derzhhidrografii, 6–8.
5. Tytko, R., Kalinichenko, V. M. (2010). Vidnovliuvalni Dzhherela Enerhii (dosvid Polshchi dlia Ukrainy). Varshava: OWG, 530.
6. Autodesk Circuits. Available at: <https://circuits.io/>
7. Shvets, E. Ya. (2007). Tekhnolohii i materialy soniachnoi enerhetyky. Zaporizhzhia: ZDIA, 239.
8. Vidnovliuvana enerhetyka – odna z hlobalnykh ta kliuchovykh tsilej liudstva. Available at: <http://uare.com.ua/novyny/471-vidnovlyuvana-energetika-odna-z-globalnikh-ta-klyuchovikh-tsilej-lyudstva.html>
9. Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy. Available at: <http://www.ive.org.ua/>
10. Derzhenerhoefektyvnosti Ukrainy. Available at: <http://saee.gov.ua/uk>
11. Zelenyi taryf, vprovadzhennia proektiv dlia fizychnykh ta yurydychnykh osib. Zarobitok na alternatyvni enerhetytsi. Available at: <http://www.ecosvit.net/ua/zeleniy-tarif>
12. Kulyk, Ya. A., Shkuran, M. V. (2017). Systema stezhennia za rukhom sontsia. Materialy XLVI Naukovo-tekhnichnoi konferentsii fakultetu kompiuternykh system i avtomatyky (2017). Vinnytsia. Available at: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2017/paper/view/2402/2618>

Надійшла (received) 30.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка системи стеження за рухом сонця для підвищення ККД сонячних електростанцій/ Кулик Я. А., Книш Б. П., Шкуран М. В., Черноволик О. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.19–24. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Разработка системы слежения за движением солнца для повышения ККД солнечных электростанций/ Кулик Я. А., Книш Б. П., Шкуран М. В., Черноволик О. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.19–24. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Development of the solar tracking system to increase the efficiency of solar power plants/ Kulik Y. A., Knysh B. P., Shkuran M. V., Chernovolik O. V. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.19–24. – Bibliogr.:12. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кулик Ярослав Анатолійович – кандидат технічних наук, Вінницький національний технічний університет, асистент кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: Yaroslav_Kulik@i.ua.

Книш Богдан Петрович – кандидат технічних наук, Вінницький національний технічний університет, асистент кафедри електроніки та наносистем, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: tutmos-3@i.ua.

Шкуран Михайло Володимирович – Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: misha.shkuran@gmail.com.

Черноволик Олена Володимирівна – Вінницький національний технічний університет, студент 4-го курсу, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: olena.chernovolynk@gmail.com.

Кулик Ярослав Анатольевич – кандидат технических наук, Винницкий национальный технический университет, ассистент кафедры автоматики и информационно-измерительной техники, ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, Украина, 21021, e-mail: Yaroslav_Kulik@i.ua.

Кныш Богдан Петрович – кандидат технических наук, Винницкий национальный технический университет, ассистент кафедры электроники и наносистем, ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, Украина, 21021, e-mail: tutmos-3@i.ua.

Шкуран Михаил Владимирович – Винницкий национальный технический университет, ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, Украина, 21021, e-mail: misha.shkuran@gmail.com.

Черноволик Елена Владимировна – Винницкий национальный технический университет, студент 4-го курса, ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, Украина, 21021, e-mail: olena.chernovolynk@gmail.com.

Kulyk Yaroslav Anatoliyovych – PhD., Vinnytsia National Technical University, assistant of the Department of Automation and Information and Measuring Equipment, st. Khmelnytsky highway, 95, Vinnitsa, Ukraine, 21021, e-mail: Yaroslav_Kulik@i.ua.

Knysh Bogdan Petrovych – PhD., Vinnytsia National Technical University, assistant of electronics and nanosystems, st. Khmelnytsky highway, 95, Vinnitsa, Ukraine, 21021, e-mail: tutmos-3@i.ua.

Shkuran Mykhail Volodymyrovych – Vinnytsia National Technical University, st. Khmelnytsky highway, 95, Vinnitsa, Ukraine, 21021, e-mail: misha.shkuran@gmail.com.

Chernovolynk Olena Volodymyrivna – Vinnytsia National Technical University, 4th year student, Khmelnytsky highway, 95, Vinnitsa, Ukraine, 21021, e-mail: olena.chernovolynk@gmail.com.

А. О. ЛИСИЙ

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЛЬODOVOЇ НАВІГАЦІЇ НА КАНАЛАХ АЗОВСЬКОГО МОРЯ

У статті обґрунтована необхідність використання в управлінні виробничою діяльністю морських портів аналізу й прогнозування сезонних процесів. Розроблений підхід до формування інформаційної бази, що враховує різноманітні форми виробничої діяльності порту в умовах льодової обстановки, що задовольняє вимоги безперервного планування й регулювання роботи порту. Запропонована і розроблена методика з безпечної проводки караванів судів з метою статистичного прогнозування. Дане визначення поняття принципу гарантовано безпечного функціонування, структурування та управління системою криголаманного проведення суден.

Ключові слова: льодова обстановка, судноплавство, сезонні коливання, прогнозування, управління судноплавством, магістральні напрямки.

В статье обоснована необходимость использования в управлении производственной деятельностью морских портов анализа и прогнозирования сезонных процессов. Разработан подход к формированию информационной базы, учитывающий различные формы производственной деятельности порта в условиях ледовой обстановки, удовлетворяющей требованиям непрерывного планирования и регулирования работы порта. Предложена и разработана методика по безопасной проводке караванов судов с целью статистического прогнозирования.

Дано определение понятия принципа гарантированно безопасного функционирования, структурирования и управления системой ледокольного проведения судов.

Ключевые слова: ледовая обстановка, судоходство, сезонные колебания, прогнозирование, управление судоходством, магистральные направления.

The article substantiates the necessity of use of analysis and forecasting of trend-seasonal processes in managing production activity of the seaports. The statistics showing fluctuation and substantial decrease in the freight turnover at the Azov Sea ports due to navigation under ice conditions is given. The definition of seasonality factor which is understood as a regular periodical recurrence of certain weather conditions depending on the season change is given. A special approach to forming the informational database which takes into account different spheres of production activity of the port under ice conditions and enables to plan and regulate the working process at the port is worked out. A method for safe harnessing of caravans of ships for the purpose of statistical forecasting has been proposed and developed. A definition of the concept of the principle of guaranteed safe operation, structuring and management of the icebreaking system is given.

Keywords: ice conditions, shipping, seasonal fluctuations, forecasting, handling ship trunk directions, traffic routes

Вступ. Організація і планування цілорічних перевезень на Азовському морі в значній мірі залежить від впливу зимового періоду навігації. В цілому, протягом льодового періоду вантажопотоки через основні порти Маріуполь і Бердянськ значно знижуються, а в окреме час припиняються зовсім.

Підвищення ефективності роботи портів Азовського моря є актуальним завданням не тільки для окремих підприємств, а й для економіки країни в цілому. Зниження вантажообігу портів, пов'язані з сезонними коливаннями і одночасне збільшення експлуатаційних витрат на утримання портового флоту необхідно враховувати в їх виробничій діяльності, тому вироблення методичного інструментарію прогнозування цих процесів, а також завдання формування відповідної інформаційної статистичної бази для прийняття рішень є дуже актуальними.

Вихідна інформація про плановані вантажопотоки включає: кількість суднопроходів в рік і середньодобовий суднопотік протягом місяця з найбільшим суднооборотом; склад вантажопотоку за типами судів, їх розмірним і кількістю.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Завдання управління судноплавством в Азовському морі, можна поділити на дві групи.

Перша – це завдання, що виникають при поточному управлінні та оперативному плануванні, друга група – завдання, що виникають при плануванні комплексу робіт в умовах введення льодової обстановки.

Рішення даних завдань пов'язано з вибором входних параметрів, що мають статистичний або стохастичний характер, обумовлений впливом фактора сезонності [1].

Під фактором сезонності розуміється регулярний періодичний наступ певних погодних умов, пов'язаних зі зміною пори року. Порти Азовського моря з приходом зими в більшості випадків переходять на режим «льодової» обстановки, де проводяться комплексні заходи для досягнення оптимальних показників з вантажопереробки паралельно із забезпеченням безпеки мореплавства.

Вплив сезонності особливо позначається як на роботі морського транспорту в цілому, де в значній мірі проглядається залежності від цих умов, так і на роботу криголама, суден портового флоту з льодовим класом в період «льодової» обстановки і зміст цього флоту після закінчення «льодової» обстановки на увазі їх простою.

Інформація про характеристики природних (зовнішніх) умов представляються у вигляді: планів акваторій трасуючого каналу та прилеглої території; літологічних розрізів за проєктованими трасами каналу з характеристиками ґрунтів; елементів метеорологічного режиму, включаючи дані про повторюваність вітрів (по швидкості, напрямку та тривалості); дані про характер течій (напрямку та швидкості); хвилюєтворення 3% забезпеченості; графіка забезпеченості щодобових рівнів води; середньорічний метеорологічний дальності видимості і переважаючого для даного району коефіцієнта прозорості атмосфери з повторюваністю не менше 65%; тривалість льодового періоду; дані про динаміку берега і інтенсивності руху наносів [2].

Ціль та задачі дослідження. При розгляді динаміки легко виявити повторювані підйоми і спади рівнів обсягів вантажопереробки в залежності від сезону морських перевезень.

Очевидним є циклічний механізм, який формує сезонні коливання – щорічно повторювані зміни природно-кліматичних умов. Але якщо це справедливо для галузей, прямо зазнають вплив циклічних змін природно-кліматичних умов, то для підприємств морського транспорту умови «льодової» обстановки пов'язані зі значними зусиллями щодо забезпечення вантажообігу і направлення додаткових фінансових і технічних ресурсів для криголамного і допоміжного флоту [3].

Матеріали та методи дослідження по забезпеченню безпечної льодової навігації на каналах Азовського моря. Організація льодової навігації на

основних магістральних напрямках досліджується методами динамічного програмування викладеними Р. Беллманом та розвинутими В. Вінніковим, В. Немчиковим, Л. Кендаллом та іншими.

У табл. 1 наведено динаміку навантаження на динаміку проводок суден Маріупольського порту за період 2010-2013рр., коли «льодова» обстановка вводилась, з якої видно, що в зимовий період велике навантаження лягає на допоміжний і криголамний флот.

У 2014-2016 рр. через позитивні температурні показники «льодова» обстановка не вводилась і навантаження на допоміжний і криголамний флот різко падає (табл. 2).

Таблиця 1 – Динаміка проводок судів в порт Маріуполь 2010-2013рр.

Рік	Заведено криголамом при льодової (к-тьсудів)				Кількістьсуднозаходів за місяцьпоза льодової								Втрати часу завантаження/розвантаження через погодні умови (на добу) при льодовій / поза льодової
	Груд.	Січ.	Лют.	Бер.	Квіт.	Трав.	Черв.	Лип.	Серп.	Вер.	Жовт.	Лист.	
2010	-	48	73	62	272	274	204	240	252	248	265	270	230/ 140
2011	-	45	72	68	263	270	282	278	268	280	275	276	232 / 96
2012	32	54	70	63	296	278	283	292	288	275	278	282	245 / 132
2013	-	48	74	42	256	278	283	278	243	235	220	229	216 / 126

Таблиця 2 – Робота криголамного буксира «Капітан Маркін» в порту Маріуполь з 2013р. - 2016р.

Рік	Кількість днів зайнятих забезпеченням судно заходів												Всього виходів з порту на протязі року (на добу)
	Груд.	Січ.	Лют.	Бер.	Квіт.	Трав.	Черв.	Лип.	Серп.	Вер.	Жовт.	Лист.	
2013	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
2014	1	-	3	-	-	-	-	-	2	-	-	2	8
2015	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2

Таким чином, сезонні коливання температури впливають на організацію і фінансові результати Маріупольського порту в зимовий час.

Результати дослідження по забезпеченню безпечної льодової навігації на каналах Азовського моря. Використання криголамного флоту, наприкладі буксира з льодовим класом «Капітан Маркін», щодо забезпечення суднозаходів в період «льодової», який практично весь календарний рік знаходиться біля причалу, не враховує різноманітні форми виробничої діяльності порту, при якій дохідна частина повинна бути вище витрат на експлуатацію флоту.

В цілому робота портів відбувається в умовах складних переплетень господарських зв'язків між різними галузями економіки нашої держави та економіки зарубіжних країн. Сезонні коливання, у цьому випадку мають більш складний характер – генеруються в одному районі плавання, передаються в інші, перетворюються і знову продовжують рух, збуджують в наступних ланках циклу морського транспорту відповідні коливання [4].

Обговорення результатів дослідження по забезпеченню безпечної льодової навігації на каналах Азовського моря. З методичних міркувань ділянку

водного шляху в умовах льодового судноплавства в неарктичних морях льодові умови можна розділити на три типи: суцільний дрейфуючий і торосистий лід (припай); розріджений, включаючи битий лід різної згуртованості (у балах) і вільна водна поверхня.

Тому першими статистичними методами визначаються ділянки траси, які надають серйозні труднощі для плавання по водному шляху, наприкладі Азовського моря, характеризуються протяжністю льодових трас, а також шириною прибережного льодового поясу, або розташуванням кромки льоду у відкритому морі.

В цілому робота портів відбувається в умовах складних переплетень господарських зв'язків між різними галузями економіки нашої держави та економіки зарубіжних країн. Сезонні коливання в цьому випадку мають більш складний характер – генеруються в одному районі плавання, передаються в інші, перетворюються і знову продовжують рух, збуджують у наступних ланках циклу морського транспорту відповідні коливання.

Проводка суден по магістральним каналам в льодових умовах характеризується не тільки обмеженістю ширини вільного проходу каравану судів, але також і високим рівнем мінливості зовнішнього середовища і навколишнього оточення.

Морські канали відрізняють жорсткі обмеження по габаритам судів, суднопотокам і природним умовам плавання. В якості критерію визначення габаритів морського каналу прийнята навігаційна безпека руху суден.

Для вирішення завдання по принципу гарантовано безпечного управління льодовим караваном проаналізовані складові транспортної системи «порт-канали-судно-зовнішнє середовище»:

- аналіз методів вибору максимально припустимих головних розмірностей суден на каналах, фарватерах та зонах маневрування;

- дослідження характеру зовнішніх природних навантажень на судна під час льодових операцій на водних шляхах;

- аналіз методів оцінки ходовості криголамів;

- визначення умов безпечного руху суден каравану.

На основі методу дедукції – сходження від «загального» до «особистого» через «часткове» здійснено спостереження розвитку судноплавства як сфери матеріального виробництва у вигляді роботи суден, за рахунок чого, згідно закону ринка, формується комерційна складова транспортного процесу. До виробництва віднесені: праця людей, предмети праці (вантаж та/або пасажери) та засоби праці (судна). Комерційна складова спрямована на використання суден за призначенням з дотриманням правил морських перевезень, забезпечення матеріальними, фінансовими та висококваліфікованими кадрами для дотримання справного технічного стану, морехідності та готовності судна до переходу.

Управління судноплавством вирішує проблеми: забезпечення провізної здатності портів, каналів, шлюзів та інших гідроспоруд; збільшення габаритів, швидкостей та технічного вдосконалення транспортних засобів; підвищення ефективності функціонування ергатичних систем, зокрема, кваліфікаційного рівня судових операторів та операторів берегових навігаційних комплексів і систем.

Безпека та екологічність судноплавства вимагає високоєфективного менеджменту заснованого на принципах поінформованості, визначеності та відповідальності.

Враховуючи методологічну поетапність системного аналізу про відділення зовнішнього середовища від об'єкта спостереження, судноплавство було поділене на транспортний процес та зовнішнє природне середовище.

Зовнішнє природне середовище регіонів Азовського моря спостерігалось за його властивостями викладеними у Лоції Чорного та Азовського морів: навігаційними, географічними, гідрометеорологічними та гідрологічними по відношенню до умов плавання суден. Результати спостереження показали, що плавання суден у Азовському морі тривалий час здійснюється у неадекватних умовах стосовно мілководдя, зміни форми, термодинамічного й агрегатного станів повітря та водної поверхні.

Інформаційний пошук викрив важливу проблему у судноплавстві України – нерегулярність морських перевезень за сезонами року, яка викликана зміною стану природного середовища, обмалюю транспортних засобів для стабілізації вантажопотоків та відсут-

ністю регламенту при льодових проведеннях караванів суден.

Особливо звертає на себе увагу задача вибору маршрутів просування суден у льодових умовах. Використовуючи принцип оптимальності Беллмана, здійснено його модифікацію для вибору оптимального маршруту руху судна, яка об'єднує ідеї: динамічного програмування в якості загальної методології метода гілок й вершин – для виключення домінуючих значень функції оптимальності кожного елемента комбінаторного простору; метода відсічення – для зменшення розмірності комбінаторного простору на базі статистичного рекорду; локального метода – для формування адаптивного рекорду [5].

Отримане рішення, сформоване на принципі: якщо маршрут оптимальний для початкової та кінцевої точок, то він оптимальний і для кожної його проміжної точки, актуальне для мілководдя суден, які здійснюють самостійне плавання за багатонаправленими маршрутами, чого не спостерігається у морському регіоні, який досліджується у зимовий період.

Другий аспект транспортної діяльності, що вивчався, пов'язаний з підвищенням ефективності роботи флоту у льодових умовах, яку досліджував Ю. Глибоко з застосуванням техніко-економічного підходу.

Дослідження було направлене на зниження експлуатаційних витрат від роботи суден – постачальників на протязі трьох років у арктичних умовах плавання. Результати рішення виявилися невітніми: в умовах обмежень по потужностям, техніці та людському ресурсу рекомендовано: з підвищенням інтенсивності льодових та перевантажувальних операцій підвищувати тарифи на перевезення вантажів або підвищити швидкість руху судна. Перше – зменшує привабливість перевезень, а друге – збільшує небезпеку плавання.

Подальше вивчення теорії льодового корабля запропонованою К.Е. Сазоновим, яка базується на роботах О. М. Крилова, Ю. А. Шиманського, В. І Каштеляна, В. О. Зуєва, Л. Г. Цоя та інших, уточнює характеристики міцності та керованості суден в льодах. Центральним проблемним аспектом цієї теорії є питання про льодопрхідність з визначенням льодового впливу на корпус судна [6].

За результатами здійсненої експертної оцінки зазначених аспектів найбільш перспективним обране управління суднами для безпечного плавання у зимовий період року шляхом роботи криголамів по гармонізації пропускної здатності морських каналів та фарватерів.

Цілі і задачі дослідження обґрунтовувались відповідно до етапів системного аналізу. Для можливості гармонізації льодового проведення суден до рівня гарантованої безпеки поставлена задача – створення принципу гарантовано безпечного управління караваном на морських каналах та фарватерах.

Правила льодового проведення суден містять загальні класифікаційні ознаки льоду для неарктичних вод Землі за: віком, формою, складом та станом, але організація та планування льодового плавання суден потребує наявності реальної, спрогнозованої картини льодової обстановки у регіоні.

Організація регулярних перевезень у льодах потребує наявності характеристик льодового покрову та термінів зміни його агрегатного стану, які б визначались за спеціальним методом оцінювання льодових обставин на окремих ділянках водного шляху.

Для вирішення питання щодо вибору ефективного метода оцінки ходовості суден в льодах здійснено аналіз методів: графоаналітичного розрахунку льодової ходовості при проектуванні судна; аналітичного визначення опору руху судна у битому льоді за криголамом; чисельного кінцевоелементного моделювання для оцінки льодової ходовості судна у експлуатаційних умовах.

Аналіз методів здійснено шляхом їх порівняння: чисельного експерименту з кінцевоелементними моделями здійсненого В. А. Лобановим та проектними полуаналітичними ідеальними методиками за окремими показниками. По ходовості судна: ідеальна льодова ходовість зведе рух судна до абсолютно прямолінійного, а реальна – залежить від характеристик льоду та ефективності управління судном з постійною наявністю ризику, дрейфу та льодових навантажень. По льодовим зусиллям: ідеальні методи занижують рівень льодових навантажень та моделюють неадекватний розгін судна, реальні – передбачають змінність льодового опору особливо у поперечному напрямку відносно корпусу судна, яка спостерігається на відстані 10-20 метрів. За часом: ідеальні методи статичні, а реальні – демонструють прискорення пов'язані з деформацією льодової поверхні на площі каналу.

Результати чисельного експерименту за відсутністю експериментальних даних по льодовій ходовості суден у зрівнянні з полуаналітичними методами представляють джерело достовірної інформації та засоби адекватного рішення задач безпеки руху під час льодових проведення караванів [7].

Для вирішення обґрунтування умови безпечного руху суден каравану у льодовому каналі за криголамом були проаналізовані методи оцінки льодової міцності Д. Є. Хейсина та Ю. М. Попова для проектування і В. А. Лобанова для експлуатації суден.

Д. Є. Хейсин та Ю. М. Попов розглядали льодовий покрив як ізотропну пластину, яка лежить на воді. Характер льодових навантажень на обшивку судна: ніс, корма – удар об лід; середня частина корпусу – статичне стиснення льодовими полями. Метод містить полуемпіричні залежності для визначення навантажень на: бортовий набір, зовнішню обшивку палуби та поперечні перебірки судна, а визначена крива льодової міцності, яка відповідає швидкості руху судна для умов межі текучості сталі, наведена у льодовому паспорті судна [8].

В. А. Лобановим запропонований метод імітаційного чисельного моделювання процесу співудару судна з льодом на основі кінцевоелементної моделі взаємодіючих об'єктів: судно-крижане поле-вода, головним достоїнством якого є можливість оцінки пошкоджень судна.

Для кількісного аналізу автор використав параметр пошкоджень (D), який представляє суму множень пластичних деформацій кінцевих елементів на їх відносну площу:

$$D = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^e S_{ij} \overline{A_{ij}}, \quad (1)$$

де i – порядковий номер конструкції бортового перекриття; k – кількість конструкцій бортового перекриття; j – порядковий номер кінцевого елемента i -ої конструкції; e – кількість кінцевих елементів i -ої конструкції; S_{ij} – площа пластичної деформації j -го елемента i -ої конструкції; $\overline{A_{ij}}$ – відносна площа j -го кінцевого елемента i -ої конструкції.

Результати імітаційної апробації метода вибору максимально безпечних розмірностей великовантажного судна, який рухається під проведенням двох буксирів у ордері при заведених буксировочних кінцях через центральні ключі та швидкістю руху ордеру у 2÷3 вузли підтвердили можливість збільшення довжини та ширини судна у 1,5 рази без зниження рівня безпеки судноводіння, але потребує підвищення рівня культури судноводіння шляхом спеціальної підготовки [9].

Критеріями безпеки руху каравану стало обмеження швидкості $V_k \in [1,5; 3,0]$ вузли та навігаційна безпека у вигляді культури (надійності) судноводіння.

Принцип гарантовано безпечного управління караваном суден полягає у забезпеченні рівномірного поступового руху каравану без прискорень з обмеженою швидкістю у 1,5÷3,0 вузли [10].

Процедура структурування каравану ґрунтується на співвідношенні

$$L_k = 33,3nV_k + \sum_{i=1}^n L_{c(i)}, \quad (2)$$

де n – кількість суден у каравані; $L_{c(i)}$ – довжина i -го судна; $V_k \in [0; 6,0]$ вузлів та $\in [6; 7]$ миль при ступені стискання льоду $St = 0$; $\in [1,0; 1,2]$ миль при $St = 1$; $\in [0,2; 0,25]$ миль при $St = 2$; $\in [0,02; 0,05]$ миль при $St = 3$.

Для морського шляху Азовського моря оптимальні складні каравани великотоннажних суден під проводкою двох криголамів, які забезпечують рівномірний рух каравану у припаї з товщиною льоду до 1,5 метри.

Процедура управління караваном відповідає максимуму коефіцієнта ефективності управління

$$\varepsilon_n = 3 \cos \alpha / (4 - \cos \alpha), \quad (3)$$

де α – середній кут ризику суден у льодовому каналі $\alpha \in [6; 13^\circ]$ та культурі судноводіння з командним, синергічним стилем керування караваном капітаном лідируючого криголама.

Висновки. Концепція у вигляді принципу гарантовано безпечного функціонування, структурування та управління системою криголазного проведення суден визначила, цільову функцію та критерій безпечного управління караваном суден, як співвідношення мінімально неминучих витрат на регулярні перевезення до витрат за фактично виконанню роботи

Рішення методичних питань прогнозування ван-

тажопереробки морського порту з урахуванням сезонних коливань є необхідним етапом на шляху вдосконалення управління роботою морського транспорту.

Такий підхід до прогнозування може бути застосований для широкого діапазону напрямів і проблем, пов'язаних з плануванням роботи флоту і портів.

Основні положення аналізу та прогнозування трен-сезонних коливань роботи морського транспорту, дозволяє вести розробку і реалізацію сучасних інформаційних технологій в загальній системі галузевого управління щодо вдосконалення систем безпечного керування транспортними засобами.

Список літератури:

1. Лысый, А. А. Управление деятельностью государственных портов в условиях ледовой обстановки [Текст] / А. А. Лысый // Государственное управление. – 2010. – Т. XI, Вып. 147. – С. 222–235.
2. Беллман, Р. Динамическое программирование [Текст] / Р. Беллман. – М.: Наука, 1995. – 264 с.
3. Голиков, В. В. Досвід проведення суден криголамом «Капітан Білоусов» в льодову навігацію по Азовському морю [Текст] / В. В. Голиков, А. А. Лисий, П. А. Костенко // Суднові енергетичні установки. – 2011. – Вып. 27. – С. 39–44.
4. Лобанов, В. А. Моделирование взаимодействия льда с конструкциями [Текст] / В. А. Лобанов // Вестник научно-технического развития. – 2011. – № 10 (50). – С. 31–39.
5. Репетей, В. Д. Особенности зимней навигации в Азовском море [Текст] / В. Д. Репетей, В. В. Голиков, П. А. Костенко, А. А. Лысый // Судовождение. – 2009. – Вып. 17. – С. 155–163.
6. Сазонов, К. Е. Управление судов во льдах: методы определения ледовых сил, действующих на движущийся по криволинейной траектории корпус, и зависимости показателей поворотливости судов от характеристик корпуса внешних условий [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук / К. Е. Сазонов. – СПб.: ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова», 2004. – 285 с.
7. Леонтьев, И. В. Понятие и сущность сезонных экономических явлений [Текст] / И. В. Леонтьев. – М.: Статистика, 2003. – С. 38–45.
8. Лобанов, В. А. Численная оценка ледовых качеств судна. Прочность [Текст] / В. А. Лобанов // Вестник научно-технического развития. – 2011. – № 12 (52). – С. 7–25.
9. Matychuk, O. Estimation of transport accessibility of the Capital Economic Region [Text] / O. Matychuk, A. Babenko, P. Yanovsky, L. Sulyma // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, Issue 3 (86). – P. 31–40. doi: [10.15587/1729-4061.2017.98118](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.98118)
10. Bosov, A. Formation of separate optimization models for the analysis of transportation-logistics systems [Text] / A. Bosov, N. Khalipova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, Issue 3 (87). – P. 11–20. doi: [10.15587/1729-4061.2017.103220](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103220)

Bibliography (transliterated):

1. Lysyi, A. A. (2010). Upravlenie deyatel'nost'yu gosudarstvennyh portov v usloviyah ledovoy obstanovki. Derzhavne upravlinnia, XI (147), 222–235.
2. Bellman, R. (1995). Dinamicheskoe programmirovaniye. Moscow: Nauka, 264.
3. Holikov, V. V., Lysyi, A. A., Kostenko, P. A. (2011). Dosvid provedennia suden kryholamom «Kapitan Bilousov» v lodovu navihatsiiu po Azovskomu moriu. Sudnovi enerhetychni ustanovky, 27, 39–44.
4. Lobanov, V. A. (2011). Modelirovaniye vzaimodeystviya l'da s konstruktsiyami. Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya, 10 (50), 31–39.
5. Repetei, V. D., Golikov, V. V., Kostenko, P. A., Lysyi, A. A. (2009). Osobennosti zimnei navigatsii v Azovskom more. Sudovozhdenie, 17, 155–163.
6. Sazonov, K. E. (2004). Upravlyaemost' sudov vo l'dah: metody opredeleniya ledovyh sil, deistvuyushchih na dvizhushchiysya po krivolineinoi traektorii korpus, i zavisimosti pokazatelei povorotlivosti sudov ot harakteristik korpusa vneshnih usloviy. Sankt-Peterburg: FGUP «CNII im. akad. A. N. Krylova», 285.
7. Leont'ev, I. V. (2003). Ponyatie i sushchnost' sezonnyh ehkonomicheskikh yavleniy. Moscow: Statistika, 38–45.
8. Lobanov, V. A. (2011). Chislennaya ocenka ledovyh kachestv sudna. Prochnost'. Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya, 12 (52), 7–25.
9. Matychuk, O., Babenko, A., Yanovsky, P., Sulyma, L. (2017). Estimation of transport accessibility of the Capital Economic Region. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (3 (86)), 31–40. doi: [10.15587/1729-4061.2017.98118](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.98118)
10. Bosov, A., Khalipova, N. (2017). Formation of separate optimization models for the analysis of transportation-logistics systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (3 (87)), 11–20. doi: [10.15587/1729-4061.2017.103220](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103220)

Надійшла (received) 13.07.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Забезпечення безпечної льодової навігації на каналах Азовського моря/ Лисий А.О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.25–29. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Обеспечение безопасной ледовой навигации на каналах Азовского моря/ Лысый А. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.25–29. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

The ensuring safe ice navigation on the Azov Sea channels/ Lysyi A. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.25–29. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лисий Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, Азовський морський інститут Національного університету "Одеська морська академія", доцент кафедри Навігації і управління судном; вул. Чорноморська, 19, м. Маріуполь, Україна, 87517; e-mail: anlis@ami.edu.ua.

Лысый Андрей Александрович – кандидат технических наук, Азовский морской институт Национального университета "Одесская морская академия", доцент кафедры Навигации и управления судном; ул. Черноморская, 19, г. Мариуполь, Украина, 87517; e-mail: anlis@ami.edu.ua.

Lysyi Andriy – candidate of technical sciences, Azov Maritime Institute of National University "Odessa Maritime Academy", associate professor of the department Navigation and handling ship; Chernomorskaya St., 19, Mariupol, Ukraine, 87517; e-mail: anlis@ami.edu.ua.

В. В. ОНИЩУК**РОЗВ'ЯЗУВАННЯ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ НАВ'Є – СТОКСА ДЛЯ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНОЇ РІВНОВАГИ СИСТЕМИ «ГАЛАКТИКА – КОСМІЧНИЙ ПРОСТІР ВСЕСВІТУ»**

На основі аналітичного розв'язування замкненої системи рівнянь Нав'є-Стокса виконана оцінка морфологічного стану галактики Всесвіту при динамічній рівновазі системи «галактика – космічний простір Всесвіту». За отриманими розрахунковими формулами оцінено динамічну стійкість Всесвіту. Отримані результати розрахунків характеристик галактики дають можливість стверджувати про наявності в її центрі стійкого ядра у вигляді "чорної діри". Ядро галактики являє собою нейтральну зону у вигляді мезовира, який обертається проти годинникової стрілки і, таким чином, підтримує у поперечному вимірі динамічну рівновагу системи «галактика – космічний простір Всесвіту».

Ключові слова: динамічна система «галактика – космічний простір Всесвіту», динамічна рівновага системи, рівняння Нав'є-Стокса, "заморожена" турбулентність, явище поперечно-поздовжньої циркуляції, пристінна зона.

На основе аналитического решения замкнутой системы уравнений Навье-Стокса выполнена оценка морфологического состояния галактики Вселенной при динамическом равновесии системы «галактика – космическое пространство Вселенной». По полученным расчетным формулам оценена динамическая устойчивость Вселенной. Полученные результаты расчетов характеристик галактики дают возможность утверждать о наличии в ее центре устойчивого ядра в виде "черной дыры". Ядро галактики представляет собой нейтральную зону в виде мезовихора, который вращается против часовой стрелки и, таким образом, поддерживает в поперечном измерении динамическое равновесие системы «галактика – космическое пространство Вселенной».

Ключевые слова: динамическая система «галактика – космическое пространство Вселенной», динамическое равновесие системы, уравнения Навье-Стокса, "заморожена" турбулентность, явление поперечно-продольной циркуляции, пристенная зона.

On the basis of analytical solving of a closed system of Navier-Stokes equations, an estimation of the morphological state of the universe's galaxy was performed at the dynamic equilibrium of the "galaxy-space universe" system. Based on the calculated formulas, the dynamic stability of the universe is estimated. The obtained results of calculations of the characteristics of the galaxy make it possible to assert the presence of a stable core in the form of a "black hole" in its center. The nucleus of the galaxy is a neutral zone in the form of a mesovirus, which rotates counterclockwise and thus supports in the transverse dimension the dynamic equilibrium of the system "galaxy – cosmic ray of the universe". Solving the closed Navier-Stokes equations and an example of calculating the main characteristics of the galaxy testify to the possibility of obtaining additional data on its morphological state. From the results of the study it is evident that changes in the characteristics of the galaxy are quite negligible, for example, the change in the radius of the galaxy is 9.44 10–28 %.

Keywords: dynamical system "galaxy – space space of the universe", dynamic equilibrium of the system, Navier-Stokes equation, "frozen" turbulence, phenomenon of transverse longitudinal circulation, wall zone.

Вступ. Життя на планетах сонячних систем повністю залежить від рівня стійкості відповідних галактик, які пов'язані між собою в складі Всесвіту. Сам Всесвіт необхідно розглядати як замкнену систему. При порушенні рівноваги галактики відбувається збій частоти коливань, що призводить до небажаних результатів як для людей, так і для всього існуючого в космічному просторі в цілому. Для загального блага необхідно забезпечити динамічну рівновагу Всесвіту. Всесвіти складаються з трьох галактик. Для цього в першу чергу необхідно знати відхилення відповідної галактики від рівноваги за допомогою розв'язку замкненої системи рівнянь Нав'є – Стокса. Динамічна рівновага галактики може порушуватись при вході в її межі побічних предметів або вони можуть виникати безпосередньо всередині неї, а саме: метеорити, астероїди, космічні кораблі тощо. Якщо виникла така ситуація, то для локалізації метеоритів необхідно використати пастки для «Торнадо» – патент України [1]. Астероїди необхідно локалізувати за допомогою нейронної пушки – патент України [2]. У межі космічного простору рекомендується літати на спеціальних кораблях, які мають навколо себе електромагнітне поле (патенти України № 71408, № 92873) [3, 4]. У цьому контексті слід зауважити, що астероїди або метеорити, які потрапили у дану сонячну систему у подальшому не виходять з неї. Це відбувається тому, що планети, які мають багато води притягують до себе указані предмети.

Аналіз попередніх досліджень. На сьогоднішній день не існує аналітичного розв'язку замкненої системи рівнянь Нав'є-Стокса для коректного рішення

задач небесної механіки. Ці рівняння уже відомі майже 200 років, які пройшли широке випробування при вирішенні багатьох задач з ламінарним режимом течії, але знаходяться за зоною досяжності для турбулентного потоку ньютонівської рідини або газу при високих числах критерію Рейнольдса. Головна проблема розв'язку цих рівнянь навіть не в кількості до них додаткових, а в самому підході щодо стабілізації рівня турбулентності у межах прояву властивості самоорганізації будь-якої відкритої або закритої динамічної системи. Оскільки вони за своєю природою самозбереження намагаються досягти мінімуму дисипації енергії, то цей стан відповідає динамічній рівновазі системи, а потік субстрату в цих умовах приймає соліноїдальну траєкторію руху, який наближений до ламінарного режиму в автотельній області опору стабільних обмежень системи щодо діючих на нього зовнішніх і внутрішніх масових сил. Рекомендована система рівнянь Нав'є-Стокса була апробована при вирішенні ряду задач, які викладені в роботах [5–7].

Методика досліджень. При розгляді рівнянь руху субстрату Нав'є-Стокса належить розвести дію силових факторів на їх індивідуальний рівень функціонування зі збереженням динамічної рівноваги системи і їх послідовну оцінку за умовами виконання конкретної задачі. З методичної точки зору це можна досягти шляхом стабілізації режиму турбулентності субстрату за допомогою додаткового (прототипного) рівняння, а потім шляхом їх сумісного розв'язку попутного виокремлення агентів збурення, цебто тиску

© В. В. Оніщук. 2017

в різних його формах і наслідках їх діяльності у вигляді змін форми деформації суцільного середовища. Цей підхід, який можна назвати “замороженою” турбулентністю належить використовувати як для руху субстрату у межах виділеного об’єму, так і для пристінної зони досліджуваного об’єкту.

Виклад основного матеріалу . Для успішного розв’язання рівнянь Нав’є-Стокса пропонується система додаткових рівнянь, які наведені у наступній формі [8–10]:

$$* \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho'} \nabla p; \quad (1)$$

$$* \operatorname{div} v = 0; \quad (2)$$

$$* \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho'} \nabla p + \nabla \vec{v}' \quad (3)$$

$$* \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = -(\vec{v}' \cdot \nabla) \vec{v}' + \nu \Delta \vec{v}' - \frac{1}{\rho'} \nabla p + \nabla \operatorname{div} P; \quad (4)$$

$$* \operatorname{div} U' = 0; \quad (5)$$

$$* \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v}' \cdot \nabla) \vec{v}' - \frac{1}{\rho'} \nabla p \quad (6)$$

$$* \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial l}{\partial t} \pm \frac{\partial q_{6,n}}{\partial t}; \quad (7)$$

$$* \frac{\partial \omega}{\partial t} = \rho I_0 \frac{\partial Q}{\partial t}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 3,145 I_0^{0,5} r^2 \lambda_3^{-0,5} \frac{\partial r^{0,5}}{\partial t}; \quad (9)$$

$$* \frac{\partial \omega}{\partial t} = \rho' I_n \frac{\partial v}{\partial t}; \quad (10)$$

$$* \frac{\partial \omega^{0,5}}{\partial t} = \Delta r, \quad (11)$$

де ∇ – оператор Гамільтона; Δ – оператор Лапласа; $\rho' = \rho(I - s) + \rho_s s$, де ρ' – щільність субстрату, кг/м³; ρ – щільність твердих частинок субстрату, кг/м³; s – середня концентрація твердих частинок в об’ємі субстрату, кг/м³; ρ_s – середня щільність фракцій завислих у субстраті твердих частинок, кг/м³; p – тиск субстрату, кгс/м²; ν – коефіцієнт кінематичної в’язкості, м²/с; P – привантаження субстрату космічного простору Всесвіту у пристінній області галактики по соліноїдальній траєкторії спіралі без об’ємного стискання, кгс/м²; r – радіус галактики, м; l – довжина спіралі галактики по осі x , м; $q_{6,n}$ – витрата бокового припливу субстрату до поверхні галактики, м³/с; $\omega = \pi r^2$ – площа поперечного перерізу галактики, м²; $\Delta \omega$ – доля збільшення площі поперечного перерізу галактики з урахуванням приєднаних мас, м²; Δr – доля зміни радіусу галактики в площині YZ ; I_0 – поздовжній похил галактики; I_n – поперечний похил галактики; λ_3 – коефіцієнт тертя субстрату космічного простору біля поверхні галактики; Q – витрата субстрату космічного простору біля поверхні галактики, м³/с; δ_i – величина переміщення структурних елементів космічного простору по координатах x , y і z , м; v – швидкість переміщення субстрату космічного простору Всесвіту навколо галактики, м/с.

В аналіз розв’язування рівнянь Нав’є–Стокса до теперішнього часу входило коректне рішення задачі Коші, оскільки можливість стійкого рішення у значній мірі залежить від рівня турбулентності субстрату і відповідних змін при великих значеннях критерію Рейнольдса. Наведені вище рівняння складають замкнену систему: де рівняння (1), наведене у векторній формі, описує рух субстрату по координатах x , y і z ; рівняння (2) – це неперервність потоку субстрату; рівняння (3) стосується стабілізації режиму турбулентності по координатах x , y і z ; рівняння (4) оцінює рівень турбулентності субстрату у пристінній зоні галактики по координатах x , y і z ; рівняння (5) – це неперервність потоку субстрату у пристінній зоні; рівняння (6) стосується стабілізації конвекційного переміщення субстрату у пристінній зоні по координатах x , y і z ; рівняння (7) характеризує неперервність потоку субстрату навколо галактики (рівняння балансу субстрату); рівняння (8) визначає поздовжню стійкість галактики; рівняння (9) відповідає динамічній рівновазі галактики; рівняння (10) визначає поперечну стійкість галактики; рівняння (11) характеризує поздовжню стійкість галактики при її наближенні до динамічної рівноваги.

Для вирішення поставленої задачі виконуємо процедуру розкриття рівняння (1), що дає можливість отримати наступні рівняння [9]:

$$\rho' \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\rho' \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) +; \quad (12)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (13)$$

$$\rho' \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\rho' \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) +; \quad (13)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{2}{3} \delta_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (14)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в’язкості, кг/м·с. Таким чином, маємо три рівняння руху субстрату.

У розкритому вигляді рівняння (2) має наступний вигляд:

$$\rho' \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho' \frac{\partial U'_x}{\partial x}; \quad (15)$$

$$\rho' \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho' \frac{\partial U'_y}{\partial y}; \quad (16)$$

$$\rho' \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{2}{3} \delta_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho' \frac{\partial U'_z}{\partial z}; \quad (17)$$

Маємо три рівняння стабілізації режиму турбулентності субстрату у пристінній зоні галактики.

Дальше виконуємо підстановки рівнянь (15)–(17) у (12)–(14).

$$\frac{\partial U'_x}{\partial x} - v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = 0; \quad (18)$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial y} - v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = 0; \quad (19)$$

$$\frac{\partial U'_z}{\partial z} - v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (20)$$

Таким чином, отримуємо наступні три рівняння, які відповідають стабільному стану потоку субстрату всередині галактики, тобто зберігаються умови абсолютної автономності опору космічного простору на фоні відсутності змін значень критеріїв Рейнольдса, Фруда, Струхала і Томсона. Отримані рівняння (18)–(20) являють собою однорідну стаціонарну систему руху субстрату всередині галактики.

Розв'язок системи рівнянь (8), (9), (18)–(20) дає можливість оцінити рівень повздовжньої стійкості галактики.

Розв'язок системи рівнянь (7)–(10), (18)–(20) дає можливість оцінити інтенсивність розвитку процесів деформації форми галактики.

Розв'язок системи рівнянь (7), (18)–(20) дає можливість виконати оцінку морфологічного стану галактики (просторове розміщення сонячних систем на трьох зодіакальних структурних рівнях).

Розв'язок системи рівнянь (4)–(6) у розкритому вигляді дає можливість виконати оцінку інтенсивності прояву швидкості пульсації субстрату у пристінній зоні.

Аналітичне розв'язування системи рівнянь для оцінки поздовжньої стійкості галактики. Для вирішення поставленої задачі відібрано із загальної кількості рівнянь наступних п'ять:

$$\frac{\partial U'_x}{\partial x} - v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = 0; \quad (21)$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial y} - v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = 0; \quad (22)$$

$$\frac{\partial U'_z}{\partial z} - v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (23)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \rho' I_0 \frac{\partial Q}{\partial t}; \quad (24)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 3,145 I_0^{0,5} r^2 \lambda_3^{-0,5} \frac{\partial r^{0,5}}{\partial t}. \quad (25)$$

Спочатку підставляємо рівняння (24) у (21), яке у диференціальній формі має вигляд

$$\left(\frac{\partial U'_x}{\partial x} - v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) dv + \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} - \rho' I_0 \frac{\partial Q}{\partial t} \right) \frac{dQ}{dx} = 0 \quad (26)$$

В інтегральній формі дане рівняння виглядає наступним чином:

$$\int_0^{U'_{\partial,p}} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \frac{dU'}{dx} - \int_0^{v_{\partial,p}} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dv}{dx} + \int_0^{\omega_{\partial,p}} \frac{\partial \omega}{\partial t} \frac{d\omega}{dx} - \int_0^{Q_{\partial,p}} \rho' I_0 \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dQ}{dy} = 0 \quad (27)$$

Після інтегрування, при меженних умовах від 0

до $U'_{\partial,p}$, $0/V_{\partial,p}$, $0/\omega_{\partial,p}$, і від 0 до $Q_{\partial,p}$ для даного рівняння отримуємо наступний вираз:

$$-U'_{x,\partial,p} + V_{x,\partial,p}^2 + \rho' I_0 Q_{\partial,p} = 0$$

Аналогічним чином виконуємо розв'язок рівнянь по координатах y і z , з яких маємо вирази

$$-U'_{y,\partial,p} + V_{y,\partial,p}^2 - \omega_{\partial,p} + \rho' I_0 Q_{\partial,p} = 0;$$

$$-U'_{z,\partial,p} + V_{z,\partial,p}^2 = 0.$$

З цих виразів отримуємо формули

$$I_{0,\partial,p} = \frac{U'_{x,\partial,p} - V_{x,\partial,p}^2}{\rho' Q_{\partial,p}}; \quad (28)$$

$$\Delta \omega_{\partial,p} = \rho' I_0 Q_{\partial,p} - U'_{y,\partial,p} + V_{y,\partial,p}^2, \quad (29)$$

Дальше підставляємо рівняння (25) у (22) і (23), звідки отримуємо рівняння в інтегральній формі наступного вигляду:

$$\int_0^{v_{\partial,p}} \frac{\partial U'_y}{\partial y} \frac{dU'}{dy} - \int_0^{v_{\partial,p}} v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dv}{dy} + \int_0^{Q_{\partial,p}} \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dQ}{dy} - \int_0^{r_{\partial,p}} 3,145 I_0^{0,5} r^2 \lambda_3^{-0,5} \frac{\partial r^{0,5}}{\partial t} \frac{dr}{dy} = 0 \quad (30)$$

$$\int_0^{v_{\partial,p}} \frac{\partial U'_z}{\partial z} \frac{dU'}{dz} - \int_0^{v_{\partial,p}} v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dv}{dz} + \int_0^{Q_{\partial,p}} \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dQ}{dz} - \int_0^{r_{\partial,p}} 3,145 I_0^{0,5} r^2 \lambda_3^{-0,5} \frac{\partial r^{0,5}}{\partial t} \frac{dr}{dz} = 0 \quad (31)$$

після інтегрування, при меженних умовах від 0 до $U'_{\partial,p}$, $0/V_{\partial,p}$, $0/Q_{\partial,p}$, і від 0 до $r_{\partial,p}$ отримуємо вираз

$$-U'_{y,\partial,p} + V_{y,\partial,p}^2 - Q_{\partial,p} + 2,1 I_0^{0,5} r^2 \lambda_3^{-0,5} r_{\partial,p}^{1,5} = 0.$$

$$-U'_{z,\partial,p} + V_{z,\partial,p}^2 + 2,1 I_0^{0,5} r^2 \lambda_3^{-0,5} r_{\partial,p}^{1,5} = 0.$$

З даних виразів отримуємо формули

$$\Delta Q_{\partial,p} = -U'_{y,\partial,p} + V_{y,\partial,p}^2 + 2,1 I_0^{0,5} r^2 \lambda_3^{-0,5} r_{\partial,p}^{1,5}; \quad (32)$$

$$\frac{1}{\lambda^{0,5}} = \frac{U'_{z,\partial,p} - V_{z,\partial,p}^2}{2,1 r^2 I_0^{0,5} r_{\partial,p}^{1,5}}. \quad (33)$$

Аналітичне розв'язування системи рівнянь для оцінки інтенсивності розвитку процесу деформації форми галактики. Для вирішення цієї задачі підлягає до розгляду наступна система рівнянь:

$$\frac{\partial U'_x}{\partial x} - v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = 0; \quad (34)$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial y} - v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = 0; \quad (35)$$

$$\frac{\partial U'_z}{\partial z} - v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (36)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial l}{\partial t} \pm \frac{\partial q_{\partial,n}}{\partial t}; \quad (37)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \rho' I_0 \frac{\partial Q}{\partial t}; \quad (38)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \rho' I_n \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (39)$$

Спочатку підставляємо рівняння (34) у (33), а потім його розв'язуємо разом з (30)–(32), які в інтегральній формі мають вигляд

$$\int_0^{U'_{\partial,p}} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \frac{dU'}{dx} - \int_0^{V_{\partial,p}} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dv}{dx} + \int_0^{\omega_{\partial,p}} \frac{\partial \omega}{\partial t} \frac{d\omega}{dx} - \int_0^{r_{\partial,p}} \rho' I_0 \frac{\partial r}{\partial t} \frac{dr}{dx} - \int_0^{l_{\partial,p}} \rho' I_0 \frac{\partial l}{\partial t} \frac{dl}{dx} - \int_0^{q_{\partial,p}} \rho' I_0 \frac{\partial q_{\partial,n}}{\partial t} \frac{dq}{dx} = 0; \quad (40)$$

$$\int_0^{U'_{\partial,p}} \frac{\partial U'_y}{\partial y} \frac{dU'}{dy} - \int_0^{V_{\partial,p}} v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dv}{dy} + \int_0^{\omega_{\partial,p}} \frac{\partial \omega}{\partial t} \frac{d\omega}{dy} - \int_0^{r_{\partial,p}} \rho' I_0 \frac{\partial r}{\partial t} \frac{dr}{dy} - \int_0^{l_{\partial,p}} \rho' I_0 \frac{\partial l}{\partial t} \frac{dl}{dy} - \int_0^{q_{\partial,p}} \rho' I_0 \frac{\partial q_{\partial,n}}{\partial t} \frac{dq}{dy} = 0; \quad (41)$$

$$\int_0^{U'_{\partial,p}} \frac{\partial U'_z}{\partial z} \frac{dU'}{dz} - \int_0^{V_{\partial,p}} v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dv}{dz} + \int_0^{\omega_{\partial,p}} \frac{\partial \omega}{\partial t} \frac{d\omega}{dz} - \int_0^{r_{\partial,p}} \rho' I_0 \frac{\partial r}{\partial t} \frac{dr}{dz} - \int_0^{l_{\partial,p}} \rho' I_0 \frac{\partial l}{\partial t} \frac{dl}{dz} - \int_0^{q_{\partial,p}} \rho' I_0 \frac{\partial q_{\partial,n}}{\partial t} \frac{dq}{dz} = 0. \quad (42)$$

Після інтегрування даних рівнянь при меженних умовах від 0 до $U'_{\partial,p}$, $0/V_{\partial,p}$, $0/Q_{\partial,p}$, $0/r_{\partial,p}$, $0/l_{\partial,p}$, і від 0 до $q_{\partial,n,\partial,p}$, отримуємо вирази

$$-U'_{x,\partial,p} + V^2_{x,\partial,p} + \rho' I_0 l_{\partial,p} + \rho' I_0 q_{x,\partial,p} = 0;$$

$$-U'_{y,\partial,p} + V^2_{y,\partial,p} - \omega_{\partial,p} + \rho' I_0 r + \rho' I_0 q_{y,\partial,p} = 0;$$

$$-U'_{z,\partial,p} + V^2_{z,\partial,p} + \rho' I_0 r + \rho' I_0 q_{z,\partial,p} = 0.$$

З даних виразів отримуємо формули для визначення компонент бокового припливу субстрату з космічного простору Всесвіту до поверхні галактики

$$q_{x,\partial,p} = (U'_{x,\partial,p} - V^2_{x,\partial,p} - \rho' I_0 l_{\partial,p}) / \rho' I_0; \quad (43)$$

$$q_{y,\partial,p} = (U'_{y,\partial,p} - V^2_{y,\partial,p} + \rho' I_0 \omega_{\partial,p} - \rho' I_0 r_{\partial,p}) / \rho' I_0; \quad (44)$$

$$q_{z,\partial,p} = (U'_{z,\partial,p} - V^2_{z,\partial,p} - \rho' I_0 r_{\partial,p}) / \rho' I_0. \quad (45)$$

Загальна величина бокового припливу субстрату з навколишнього середовища в об'єм потоку субстрату галактики визначається арифметичною сумою компонент

$$G_{\partial,p} = q_{x,\partial,p} + q_{y,\partial,p} + q_{z,\partial,p}, \quad (46)$$

Наступним етапом вирішення цієї задачі є підстановка рівняння (34) у (30)–(32), які в інтегральній формі мають вигляд

$$\int_0^{U'_{\partial,p}} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \frac{dU'}{dx} - \int_0^{V_{\partial,p}} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dv}{dx} + \int_0^{\omega_{\partial,p}} \frac{\partial \omega}{\partial t} \frac{d\omega}{dx} - \int_0^{r_{\partial,p}} \rho' I_n \frac{\partial v}{\partial t} \frac{dv}{dx} = 0 \quad (47)$$

$$\int_0^{U'_{\partial,p}} \frac{\partial U'_y}{\partial y} \frac{dU'}{dy} - \int_0^{V_{\partial,p}} v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dv}{dy} + \int_0^{\omega_{\partial,p}} \frac{\partial \omega}{\partial t} \frac{d\omega}{dy} - \int_0^{r_{\partial,p}} \rho' I_n \frac{\partial v}{\partial t} \frac{dv}{dy} = 0 \quad (48)$$

$$\int_0^{U'_{\partial,p}} \frac{\partial U'_z}{\partial z} \frac{dU'}{dz} - \int_0^{V_{\partial,p}} v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dv}{dz} + \int_0^{\omega_{\partial,p}} \frac{\partial \omega}{\partial t} \frac{d\omega}{dz} - \int_0^{r_{\partial,p}} \rho' I_n \frac{\partial v}{\partial t} \frac{dv}{dz} = 0 \quad (49)$$

В результаті інтегрування даних рівнянь у межах від 0 до $U'_{\partial,p}$, $0/V_{\partial,p}$ і від 0 до $\omega_{\partial,p}$ отримуємо вирази

$$-U'_{x,\partial,p} + V^2_{x,\partial,p} + \rho' I_n V_{\partial,p} = 0;$$

$$-U'_{y,\partial,p} + V^2_{y,\partial,p} - \omega_{\partial,p} + \rho' I_n V_{\partial,p} = 0;$$

$$-U'_{z,\partial,p} + V^2_{z,\partial,p} = 0.$$

З другого виразу визначаємо поперечний похил галактики

$$I_{n,y/\partial,p} = \frac{U'_{y,\partial,p} - V^2_{y,\partial,p} + \Delta \omega_{\partial,p}}{\rho' V_{\partial,p}}. \quad (50)$$

Аналітичне розв'язування системи рівнянь для оцінки морфологічного стану галактики. Для вирішення поставленої задачі пропонується наступна система рівнянь:

$$\frac{\partial U'_x}{\partial x} - v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = 0; \quad (51)$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial y} - v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = 0; \quad (52)$$

$$\frac{\partial U'_z}{\partial z} - v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (53)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial l}{\partial t} \pm \frac{\partial q_{\partial,n}}{\partial t}. \quad (54)$$

Розв'язок наведеної вище системи рівнянь починається з підстановки рівняння (44) у (41)–(43), які в результаті диференціювання і інтегрування, у межах від 0 до $U'_{\partial,p}$, $0/V_{\partial,p}$, $0/Q_{\partial,p}$, $0/r_{\partial,p}$, $0/l_{\partial,p}$, і від 0 до $q_{\partial,n,\partial,p}$, отримуємо вирази

$$-U'_{x,\partial,p} + V^2_{x,\partial,p} - Q_{\partial,p} + l_{\partial,p} + q_{x,\partial,p} = 0;$$

$$-U'_{\partial,p,y} + V^2_{y,\partial,p} - Q_{\partial,p} + r_{\partial,p} + q_{y,\partial,p} = 0;$$

$$-U'_{z,\partial,p} + V^2_{z,\partial,p} + r_{\partial,p} + q_{z,\partial,p} = 0.$$

З даних виразів отримуємо формули для визначення довжини переміщення субстрату космічного простору Всесвіту вздовж поверхні галактики та радіуси галактики по координатах y і z

$$l_{\partial,p} = U'_{x,\partial,p} - V^2_{x,\partial,p} + Q_{\partial,p} - q_{x,\partial,p}; \quad (55)$$

$$r_{\partial,p,y} = U'_{\partial,p,y} - V^2_{y,\partial,p} + Q_{\partial,p} - q_{y,\partial,p}; \quad (56)$$

$$r_{\partial,p,z} = U'_{z,\partial,p} - V^2_{z,\partial,p} - q_{z,\partial,p}. \quad (57)$$

Для визначення компонент швидкості потоку субстрату в умовах приведення галактики до динамічній рівновазі використовуються рівняння (41–43). Інтегральні рівняння по координатах x , y і z мають наступний вигляд:

$$\int_0^{U'_{\partial,p}} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \frac{dU'}{dx} - \int_0^{V_{\partial,p}} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dV}{dx} = 0; \quad (58)$$

$$\int_0^{U'_{\partial,p}} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \frac{dU'}{dx} - \int_0^{V_{\partial,p}} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dV}{dx} = 0; \quad (59)$$

$$\int_0^{U'_{\partial,p}} \frac{\partial U'_z}{\partial z} \frac{dU'}{dz} - \int_0^{V_{\partial,p}} v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dV}{dz} = 0. \quad (60)$$

Після інтегрування першого рівняння, при меженних умовах від 0 до $V_{\partial,p}$ отримуємо

$$-U'_{x,\partial,p} + V^2_{x,\partial,p} = 0,$$

з якого можна визначити компоненту швидкості потоку в координаті x

$$\frac{\partial U'_y}{\partial t} = - \left(U'_x \frac{\partial U'_y}{\partial x} + U'_y \frac{\partial U'_y}{\partial y} + U'_z \frac{\partial U'_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[v \left(\frac{\partial U'_y}{\partial y} + \frac{\partial U'_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_y \frac{\partial U'_y}{\partial y} \right) \right] - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial p_y}{\partial y} \right); \quad (69)$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial t} = - \left(U'_x \frac{\partial U'_y}{\partial x} + U'_y \frac{\partial U'_y}{\partial y} + U'_z \frac{\partial U'_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[v \left(\frac{\partial U'_y}{\partial y} + \frac{\partial U'_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_y \frac{\partial U'_y}{\partial y} \right) \right] - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial p_y}{\partial y} \right); \quad (70)$$

$$\frac{\partial U'_z}{\partial t} = - \left(U'_x \frac{\partial U'_z}{\partial x} + U'_y \frac{\partial U'_z}{\partial y} + U'_z \frac{\partial U'_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[v \left(\frac{\partial U'_z}{\partial z} + \frac{\partial U'_y}{\partial z} - \frac{2}{3} \delta_z \frac{\partial U'_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial p_z}{\partial z} \right). \quad (71)$$

Рівняння (52) включено у дану систему з метою стабілізації рівня турбулентності у пристінній області, який залежить від зміни тиску. У розкритому вигляді це рівняння виглядає наступним чином:

$$\frac{\partial U'_x}{\partial t} = - \left(U'_x \frac{\partial U'_x}{\partial x} + U'_y \frac{\partial U'_x}{\partial y} + U'_z \frac{\partial U'_x}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (72)$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial t} = - \left(U'_x \frac{\partial U'_y}{\partial x} + U'_y \frac{\partial U'_y}{\partial y} + U'_z \frac{\partial U'_y}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p}{\partial y}; \quad (73)$$

$$V_{x,\partial,p} = U'^{0,5}_{x,\partial,p}. \quad (61)$$

Для двох інших компонент швидкості отримуємо аналогічні формули

$$V_{y,\partial,p} = U'^{0,5}_{y,\partial,p}; \quad (62)$$

$$V_{z,\partial,p} = U'^{0,5}_{z,\partial,p}. \quad (63)$$

Оцінка основних розрахункових характеристик системи «галактика – космічний простір Всесвіту». Началі здійснюємо сумісний розв'язок рівнянь (8) і (11) в результаті чого отримуємо диференційне рівняння наступного вигляду:

$$\Delta r \frac{\partial \omega^{0,5}}{\partial t} \frac{d\omega}{dy} - \rho' I_0 \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dQ}{dy} = 0. \quad (64)$$

Після інтегрування даного рівняння при меженних умовах від 0 до $\omega_{\partial,p}$ і від 0 до $Q_{\partial,p}$, отримуємо вираз

$$-0,666 \Delta r \omega_{\partial,p}^{1,5} + \rho' I_0 Q_{\partial,p} = 0,$$

з цього виразу отримуємо формулу

$$\Delta r = \frac{\rho' I_0 \Delta Q_{\partial,p}}{0,666 \Delta \omega_{\partial,p}^{1,5}}. \quad (65)$$

Аналітичний розв'язок системи рівнянь для оцінки інтенсивності пульсації компонент швидкості потоку субстрату у пристінній області

Для вирішення поставленої задачі відібрана наступна система рівнянь:

$$* \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = -(\vec{v}' \nabla) \vec{v}' + \nu \Delta \vec{v}' - \frac{1}{\rho'} \nabla p + \nabla \text{div} P; \quad (66)$$

$$\text{div} \vec{v}' = 0; \quad (67)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -(\vec{v}' \nabla) \vec{v}' - \frac{1}{\rho'} \nabla p. \quad (68)$$

Рівняння (54) у розкритому вигляді приймає наступний вигляд:

$$\frac{\partial U'_z}{\partial t} = - \left(U'_x \frac{\partial U'_z}{\partial x} + U'_y \frac{\partial U'_z}{\partial y} + U'_z \frac{\partial U'_z}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (74)$$

Дальше виконуємо послідовну підстановку цих рівнянь, після чого отримуємо

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[v \left(\frac{\partial U'_x}{\partial x} + \frac{\partial U'_y}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_x \frac{\partial U'_x}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p_x}{\partial x} \right) = 0; \quad (75)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[v \left(\frac{\partial U'_y}{\partial y} + \frac{\partial U'_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_y \frac{\partial U'_y}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial p_y}{\partial y} \right) = 0; \quad (76)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[v \left(\frac{\partial U'_z}{\partial z} + \frac{\partial U'_y}{\partial z} - \frac{2}{3} \delta_z \frac{\partial U'_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial p_z}{\partial z} \right) = 0. \quad (77)$$

Отримані рівняння являють собою однорідну стаціонарну систему.

Після диференціювання і інтегрування рівнянь, (75)–(77) при межах умов від 0 до $U'_{\Delta \partial, p}$, і від 0 до $p_{\Delta \partial, p}$, отримуємо вирази

$$-0,333 \cdot v U'^3_{\partial, p, x} + 0,222 \cdot v \delta_x U'^3_{\partial, p, x} - 0,333 \cdot p_{x, \partial, p} = 0;$$

$$-0,333 \cdot v U'^3_{\partial, p, y} + 0,222 \cdot v \delta_y U'^3_{\partial, p, y} - 0,333 \cdot p_{y, \partial, p} = 0;$$

$$-0,333 \cdot v U'^3_{z, \partial, p} + 0,222 \cdot v \delta_z U'^3_{z, \partial, p} - 0,333 \cdot p_{z, \partial, p} = 0.$$

З цих виразів отримуємо формули

$$U'_{x, \partial, p} = \left[\frac{0,333 p^3_{\partial, p}}{0,222 \cdot v - 0,333 \cdot v} \right]^{0,333}; \quad (78)$$

$$U'_{y, \partial, p} = \left[\frac{0,333 p^3_{\partial, p}}{0,222 \cdot v - 0,333 \cdot v} \right]^{0,333}; \quad (79)$$

$$U'_{z, \partial, p} = \left[\frac{0,333 p^3_{\partial, p}}{0,222 \cdot v - 0,333 \cdot v} \right]^{0,333}. \quad (80)$$

Для визначення компонент тиску у пристінній зоні галактики використовуються розкриті рівняння (52), яке після диференціювання і інтегрування у межах від 0 до $U'_{\partial, p}$ і від 0 до $p_{\Delta \partial, p}$ та при початковій умові (при стані динамічної рівноваги) $\partial U'/\partial t|_{t=0}$ дають вирази

$$-0,333 \cdot v U'^3_{x, \partial, p} + 0,222 \cdot v \delta_x U'^3_{x, \partial, p} - (1/\rho) p_{x, \partial, p} - 0,333 \cdot p^3_{x, \partial, p} = 0;$$

$$-0,333 \cdot v U'^3_{y, \partial, p} + 0,222 \cdot v \delta_y U'^3_{y, \partial, p} - (1/\rho) p_{y, \partial, p} - 0,333 \cdot p^3_{y, \partial, p} = 0;$$

$$-0,333 \cdot v U'^3_{z, \partial, p} + 0,222 \cdot v \delta_z U'^3_{z, \partial, p} - (1/\rho) p_{z, \partial, p} - 0,333 \cdot p^3_{z, \partial, p} = 0,$$

з яких отримуємо розрахункові формули

$$p_{x, \partial, p} = (0,333 v U'^3_{x, \partial, p} - 0,222 v U'^3_{x, \partial, p} + 0,333 \cdot p^3_{x, \partial, p}) \rho; \quad (81)$$

$$p_{y, \partial, p} = (0,333 v U'^3_{y, \partial, p} - 0,222 v U'^3_{y, \partial, p} + 0,333 \cdot p^3_{y, \partial, p}) \rho; \quad (82)$$

$$p_{z, \partial, p} = (0,333 v U'^3_{z, \partial, p} - 0,222 v U'^3_{z, \partial, p} + 0,333 \cdot p^3_{z, \partial, p}) \rho. \quad (83)$$

Приклад розрахунку основних характеристик системи «галактика – космічний простір Всесвіту» для стану її динамічної рівноваги. У якості вихідної інформації можемо взяти наступне: коефіцієнт кінематичної в'язкості субстрату $v = 0,0002 \text{ м}^2/\text{с}$, щільність субстрату космічного простору $\rho' = 1 \cdot 10^{-06} \text{ кг}/\text{м}^3$, геометричні розміри галактики – $d_{xy} = 108 \cdot 10^{27} \text{ м}$, $d_{yz} = 108 \cdot 10^{27} \text{ м}$.

Порядок розрахунку. Спочатку визначаємо компоненти швидкості пульсації субстрату у пристінній зоні галактики – $U'_{x, \partial, p} = U'_{y, \partial, p} = U'_{z, \partial, p} = 73,67 \text{ м}/\text{с}$ (при $P = 3 \text{ кгс}/\text{м}^2$). Компоненти тиску у пристінній зоні ззовні галактики дорівнюють $p_{x, \partial, p} = p_{y, \partial, p} = p_{z, \partial, p} = 1,79 \cdot 10^{-05} \text{ кг}/\text{м}^2$, $P_{\partial, p} = 3,1 \cdot 10^{-05} \text{ кгс}/\text{м}^2$ або $3 \cdot 10^{-08} \text{ Па}$. Наступним кроком є визначення компонент переміщення субстрату навколо галактики $V_{x, \partial, p} = V_{y, \partial, p} = V_{z, \partial, p} = 8,58 \text{ м}/\text{с}$, $V_{cep} = 14,86 \text{ м}/\text{с}$.

Витрату субстанції у першому наближенні можна взяти домірною $Q = \pi r^2 V_{cep} = 2,18 \cdot 10^{60} \text{ м}^3/\text{с}$, $I_0 = 2,64 \cdot 10^{-53}$, коефіцієнт тертя субстрату космічного простору при обтіканні галактики, яка обертається у протилежному напрямі навколо свого центра (темної матерії, яку можна назвати чорною дірою або матерією-антиматерією і яка також обертається одночасно в двох осях з однаковою швидкістю, що забезпечує дію сил притягання і відштовхування) $\lambda = 7,61 \cdot 10^{140}$, доля зміни витрати субстрату космічного простору Всесвіту $\Delta Q_{\partial, p} = 56,75 \text{ м}^3/\text{с}$, доля зміни площі поперечного перерізу галактики за формулою (32) дорівнює $\Delta \omega = 5,96 \text{ м}^2$, доля зміни радіусу галактики з приєднаними масами субстрату космічного простору Всесвіту $\Delta r = 5,93 \text{ м}$. У другому наближенні до стану динамічної рівноваги галактики маємо – $Q = \pi r^2 V_{cep} = 2,18 \cdot 10^{60} \text{ м}^3/\text{с}$. Оскільки витрата субстрату космічного простору залишається практично незмінною, то далі ми можемо визначати інші характеристики – $I_{n, \partial, p} = 3,873 \cdot 10^{06}$, компоненти припливу субстрату космічного простору до поверхні галактики – $q_{x, \partial, p} = 0$, $q_{y, \partial, p} = 2,04 \cdot 10^{60} \text{ м}^3/\text{с}$, $q_{z, \partial, p} = 1,954 \cdot 10^{60} \text{ м}^3/\text{с}$, стік субстрату космічного простору по соліноїдальній траєкторії навколо галактики $G_{\partial, p} = 4 \cdot 10^{60} \text{ м}^3/\text{с}$, довжина соліноїдального переміщення субстрату космічного простору по поверхні спіралі галактики $l_{\partial, p} = 2,18 \cdot 10^{60} \text{ м}$, радіуси галактики з приєднаними масами субстрату космічного простору Всесвіту в координатах y і z – $r_{\partial, p, y} = 1,4 \cdot 10^{39} \text{ м}$, $r_{\partial, p, z} = 1,954 \cdot 10^{60} \text{ м}$ (поперечний розріз галактики у вигляді гіперboloїда).

Висновки. На основі вищевикладеного матеріалу можна зробити наступні науково-практичні узагальнення:

1. Розв'язування замкненої системи рівнянь Нав'є – Стокса і приклад розрахунку основних характеристик галактики засвідчують про можливість отримання ряду додаткових даних, які стосуються оцінки динамічної рівноваги про її морфологічний стан.

2. З результатів дослідження видно, що зміни характеристик системи «галактика – космічний простір Всесвіту» є досить незначним так, наприклад, зміна радіусу галактики з урахуванням приєднаних мас

субстрату, який надходить у Всесвіт із центру галактик (в центр галактик субстрат попадає із планет сонячних систем, зокрема і нашої сонячної системи, яка

знаходиться на віддалі 50 мільйонів кілометрів від центру галактики) за одну секунду складає $1,1 \cdot 10^{-26}$ % або за земний рік $3,377 \cdot 10^{-19}$ %.

Список літератури:

1. Пат. № 74286 UA. Пастка для торнадо. МПК: H99Z 99/00 [Текст] / *Онищук В. В.* – № у 2012 03674; заявл. 27.03.2012; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20. – 6 с.
2. Пат. № 61382 UA. Нейронна пушка. МПК: E21B 1/00 [Текст] / *Онищук В. В.* – № у201008293; заявл. 02.07.2010; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14. – 2 с.
3. Пат. № 71408 UA. Космічний корабель “абья”. МПК: B64G 1/00 [Текст] / *Онищук В. В.* – № у 2012 00200; заявл. 06.01.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13. – 4 с.
4. Пат. № 92873 UA. Суперкосмічний корабель. МПК: B64G 1/00 [Текст] / *Онищук В. В.* – № у 2014 03053; заявл. 26.03.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17. – 5 с.
5. *Онищук, В. В.* Розв’язування системи рівнянь Нав’є-Стокса для крила літака. Т. 1 [Текст]: матер. конф. / *В. В. Онищук* // Диференціальні та інтегральні рівняння, їх застосування. – Київ: НТТУ «КПІ», 2016. – С. 222–225.
6. *Онищук, В. В.* Розв’язування системи рівнянь Нав’є-Стокса для оцінки динамічної рівноваги системи «потік-русло» [Текст] / *В. В. Онищук* // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2016. – № 4. – С. 6–24.
7. *Онищук, В. В.* Розв’язування системи рівнянь Нав’є-Стокса для оцінки динамічної рівноваги системи «циклон-антициклон» [Текст] / *В. В. Онищук* // Фізична географія та геоморфологія. – 2017. – Вип. 1 (85). – С. 90–100.
8. *Седов, Л. И.* Механика сплошной среды. Т. 1 [Текст] / *Л. И. Седов*. – М.: Наука, 1983. – 528 с.
9. *Дмитревский, В. И.* Гидромеханика [Текст] / *В. И. Дмитриевский*. – М.: Морской транспорт, 1962. – 296 с.
10. *Войтунский, Я. И.* Гидромеханика [Текст]: учеб. / *Я. И. Войтунский, Ю. И. Фадеев, К. К. Федяевский*. – 2-е изд., перер. и доп. – Л.: Судостроение, 1982. – 456 с.

Bibliography (transliterated):

1. Onischuk, V. (2012). Pat. No. 74286 UA. Trap for Tornado. MPK: H99Z 99/00. No. u 2012 03674; declared: 27.03.2012; published: 25.10.2012, Bul. No. 20, 6.
2. Onischuk, V. (2011). Pat. No. 61382 UA. Neuron gun. MPK: E21B 1/00. No. u201008293; declared: 02.07.2010; published: 25.07.2011, Bul. No. 14, 2.
3. Onischuk, V. (2012). Pat. No. 71408 UA. Spacecraft "ABI". MPK: B64G 1/00. No. u 2012 00200; declared: 06.01.2012; published: 10.07.2012, Bul. No. 13, 4.
4. Onischuk, V. (2014). Pat. No. 92873 UA. Supercosmic ship. MPK: B64G 1/00. No. u 2014 03053; declared: 26.03.2014; published: 10.09.2014, Bul. No. 17, 5.
5. Onyschuk, V. (2016). Solving the Navier-Stokes equations for the wing of an aircraft. Vol. 1. Differential and integral equations, their application. Kyiv. NTU "KPI", 222–225.
6. Onyschuk, V. (2016). Solving the Navier-Stokes equations for estimating the dynamic equilibrium of the "flow-channel" system. Hydrology, hydrochemistry and hydroecology, 4, 6–24.
7. Onyschuk, V. (2017). Solving of the Navier-Stokes equations for assessing the dynamic equilibrium of the cyclone-anticyclone system. Physical geography and geomorphology, 1 (85), 90–100.
8. Sedov, L. (1983). Mechanics of a continuous medium. Vol. 1. Moscow: Nauka, 528.
9. Dmitrevsky, V. (1962). Hydromechanics. Moscow: Marine Transport, 296.
10. Voytkunsky, Ya., Fadeev, Yu., Fedyaevsky, K. (1982). Hydromechanics. Leningrad: Shipbuilding, 456.

Поступила (received) 06.07.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розв’язування системи рівнянь Нав’є-Стокса для оцінки динамічної рівноваги системи «галактика – космічний простір Всесвіту» / *Онищук В. В.* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.30–36. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Решение системы уравнений Навье-Стокса для оценки динамического равновесия системы «галактика - космическое пространство Вселенной» / *Онищук В. В.* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.30–36. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Solving the Navier-Stokes equations for estimating the dynamic equilibrium of the "galaxy-space universe" system/ *Onischuk V.* //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 20 (1242).– P.30–36. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Онищук Василь Варфоломійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідного сектору гідроекології і гідрохімії географічного факультету, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033; e-mail: willy38@ukr.net.

Онищук Василий Варфоломеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского сектора гидроэкологии и гидрохимии географического факультета, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко; ул. Владимирская, 60, г. Киев, Украина, 01033; e-mail: willy38@ukr.net.

Onyschuk Vasylyl – PhD, Senior Researcher of the Research Sector of Hydroecology and Hydrochemistry of the Geography Faculty, Taras Shevchenko National University of Kyiv; Volodymyrska str., 60, Kyiv, Ukraine, 01033; e-mail: willy38@ukr.net.

*А. А. СЕРГЕЕВ-ГОРЧИНСКИЙ***ВЫБОР МЕРЫ РАЗЛИЧИЯ ЗНАЧЕНИЙ ОБРАЗЦОВОГО И ОТФИЛЬТРОВАННОГО БИОМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ**

У статті розглянуто вибір міри відмінності результатів фільтрації спотворених біомедичних сигналів в задачі пошуку оптимальних значень параметра цифрового фільтра нижніх частот "просте ковзне середнє". Для порівняння були вибрані міри відмінності – середньоквадратична помилка, корінь середньоквадратичної помилки, середня абсолютна помилка. Виконана серія експериментів з генерування та фільтрації спотворених сигналів. В результаті порівняння визначена міра, для якої характерна більша кількість знайдених локальних оптимальних значень параметра цифрового фільтра за високих рівнів флуктуаційної завади.

Ключові слова: дискретний сигнал, цифровий фільтр, ковзне середнє, оптимальний параметр, міра відмінності

В статье рассмотрен выбор меры различия результатов фильтрации искажённых электрических биомедицинских сигналов в задаче поиска оптимальных значений параметра цифрового фильтра нижних частот «простое скользящее среднее». Для сравнения были выбраны меры различия – среднеквадратичная ошибка, корень среднеквадратичной ошибки, средняя абсолютная ошибка. Выполнена серия экспериментов по генерированию и фильтрации искажённых сигналов. В результате сравнения выбрана мера, для которой характерно большее количество найденных локальных оптимальных значений параметра цифрового фильтра при высоких уровнях флуктуационной помехи.

Ключевые слова: дискретный сигнал, цифровой фильтр, скользящее среднее, оптимальный параметр, мера различия

The article covers selection of a error measure for the results of filtering distorted quantized periodic signals when searching for optimum values of low band digital filter parameter represented by a "simple moving average" in a non-recursive form. The following error measures were selected for comparison – Mean Squared Error, Root Mean Squared Error, Mean Absolute Error. To perform the experiments, a program library was created for generation of periodic discrete quantized signals, and for their distortion using fluctuating interference (noise) with normal distribution, and for further filtering of the distorted signals. A series of experiments was carried out for the generation and filtering of distorted periodic signals with different noise levels. As a result, error measures were found for filtered signals with different values of the digital filter parameter. Ultimately, a measure was selected based on comparison results, representing greater number of local optimum values of the digital filter parameter at high fluctuating noise levels.

Keywords: discrete signal, digital filter, moving average, optimal parameter, error measure

Введение. В различных технических задачах требуется сравнение данных, которые в общем случае имеют различное представление. Одним из типов представления данных является представление в виде последовательности значений дискретных квантованных сигналов (временных рядов). В цифровой обработке сигналов при проектировании цифровых фильтров, осуществляющих подстройку по образцовым сигналам, требуется расчёт меры различия значений образцового и отфильтрованного временных рядов [1].

В прикладных методах анализа данных применяются численные показатели различия временных рядов, которые называются «мерами расстояния» (distance measures) [2], «мерами ошибки» (error measures) [3, 4], либо «метриками расстояния» (distance metrics) [5]. В [6, 7] выполнено сравнение трёх мер различия цифровых сигналов применительно к задаче поиска оптимальных значений параметра цифрового фильтра нижних частот (ФНЧ) «простое скользящее среднее» (ПСС) при обработке искажённых периодических сигналов различных форм. Из результатов экспериментов было установлено, что выбор меры «средняя абсолютная ошибка» (САО) увеличивает количество оптимальных значений параметра цифрового фильтра при высоки уровнях флуктуацiонной помехи [7].

Чтобы проверить целесообразность применения меры САО в задаче поиска оптимальных значений параметра цифрового фильтра ПСС применительно к задаче обработки биомедицинских сигналов была создана программная библиотека для цифровой обработки сигналов. Из базы данных [8, 9] были импортированы образцовые биомедицинские сигналы различной формы и сгенерированы их модифицированные копии, полученные путём добавления к исходным сигналам случайной составляющей (помехи) и последующей фильтрации искажённых сигналов.

Создание тестовой среды. В процессе исследования была создана библиотека программных модулей для импорта и обработки дискретных квантованных биомедицинских сигналов с различными характеристиками.

Функции программных модулей следующие. «Модуль генерирования искажённого сигнала» предназначен для генерирования значений дискретных квантованных биомедицинских сигналов и шумовой составляющей (помехи).

«Модуль генерирования сигнала по отсчётам» реализует импортирование из базы данных Sleep Heart Health Study (SHHS) [9] значений образцовых дискретных квантованных биомедицинских сигналов, генерирование значений искажённых сигналов следующих форм: электрокардиограмма (ЭКГ), электроэнцефалограмма (ЭЭГ), электромиограмма (ЭМГ), электроокулограмма (ЭОГ). Программная реализация модуля включает программный метод, который предоставляет возможность настройки частоты дискретизации и длительности воспроизведения исходного неискаженного сигнала.

«Модуль генерирования шумовой составляющей» добавлен для моделирования различных условий передачи неискаженного сигнала. В модуле реализована программная процедура (программный метод) генерирования случайной составляющей искажённого сигнала с нормальным распределением и возможностью задания значений математического ожидания и среднеквадратичного отклонения.

В компоненте «Модуль оценки фильтрации» были реализованы программные методы оценки различия сигналов (меры различия): среднеквадратичная ошибка, корень среднеквадратичной ошибки, средняя абсолютная ошибка. Перечисленные программные

© А. А. Сергеев-Горчинский. 2017

методы были объединены в «Модуль оценки различия сигналов». Для дополнительной оценки значений числовых последовательностей был реализован «Модуль статистической оценки».

Созданная программная библиотека была применена для формирования искажённых сигналов и их последующей цифровой обработки. Целью выполненных экспериментов было определение меры различия, для результата применения которой характерно большее количество найденных локальных оптимальных значений параметра цифрового фильтра при высоких уровнях флуктуационной помехи.

Выбор мер различия. В процессе исследования была создана библиотека программных модулей для генерирования исходных неискажённых дискретных квантованных сигналов различной формы и их модифицированных копий, полученных путём добавления к исходным сигналам случайной составляющей (помехи) и последующей фильтрации искажённых сигналов. Для минимизации уровня шума был создан «Модуль нерекурсивной фильтрации сигнала». В модуле реализован программный метод фильтрации «простое скользящее среднее» (ПСС). В фильтре ПСС обработанное значение $y[k]$ в момент времени k определяется

выражением [10, Р. 19-20]:

$$y_{\text{отфильтр}}[k] = \frac{1}{m_1 + m_2 + 1} \times \sum_{i=-m_1}^{m_2} x_{\text{искаж}}[k-i], \quad (1)$$

где $m_1 + m_2 + 1$ – параметр цифрового фильтра m (количество искажённых значений сигнала, участвующих в расчете отфильтрованного значения для заданного момента времени k), $x_{\text{искаж}}[k-i]$ – значение искажённого сигнала в момент времени дискретизации $k-i$, $y_{\text{отфильтр}}[k]$ – сигнал на выходе фильтра в текущий момент времени k .

В [2-7] рассмотрены различные математические выражения для расчёта меры различия числовых последовательностей, которые можно разделить на следующие группы: меры расстояния, угловые меры, корреляционные меры. Из трёх упомянутых групп мер были выбраны следующие [2, 6]. Мера «среднеквадратичная ошибка» (СКО, Mean Square Error, MSE) определяется выражением [3]:

$$M_{\text{СКО}}(\{x_{\text{неискаж}}[k]\}, \{y_{\text{отфильтр}}[k]\}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} (x_{\text{неискаж}}[k] - y_{\text{отфильтр}}[k])^2, \quad (2)$$

где k – номер отсчёта, $x_{\text{неискаж}}[k]$ – значение неискажённого сигнала в момент времени дискретизации k , $y_{\text{отфильтр}}[k]$ – значение отфильтрованного сигнала в момент времени дискретизации k , N – общее количество отсчётов искажённого сигнала.

Мера «корень среднеквадратичной ошибки» (КСКО, Root Mean Square Error, RMSE) определяется выражением [5]:

$$M_{\text{КСКО}}(\{x_{\text{неискаж}}[k]\}, \{y_{\text{отфильтр}}[k]\}) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} (x_{\text{неискаж}}[k] - y_{\text{отфильтр}}[k])^2}, \quad (3)$$

где k – номер отсчёта, $x_{\text{неискаж}}[k]$ – значение неискажённого сигнала в момент времени дискретизации k , $y_{\text{отфильтр}}[k]$ – значение отфильтрованного сигнала в момент времени дискретизации k , N – общее количество отсчётов искажённого сигнала.

Мера «средняя абсолютная ошибка» (САО, Mean Absolute Error, MAE) определяется выражением [7]:

$$M_{\text{САО}}(\{x_{\text{неискаж}}[k]\}, \{y_{\text{отфильтр}}[k]\}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} |x_{\text{неискаж}}[k] - y_{\text{отфильтр}}[k]|, \quad (4)$$

где k – номер отсчёта, $x_{\text{неискаж}}[k]$ – значение неискажённого сигнала в момент времени дискретизации k , $y_{\text{отфильтр}}[k]$ – значение отфильтрованного сигнала в момент времени дискретизации k , N – общее количество отсчётов искажённого сигнала.

Постановка эксперимента. С помощью разработанной программной библиотеки, для оценки характеристик целевых функций сформированных из значений выбранных мер различия при различных значениях параметра цифрового фильтра, из базы данных Sleep Heart Health Study (SHHS) [9] были импортированы значения сигнала ЭКГ и сгенерирован тестовый искажённый сигнал со следующими характеристиками: продолжительность регистрации – 2 с, амплитуда сигнала – 0.5 мВ; распределение шумовой составляющей – нормальное; отношение сигнал/шум (ОСШ) – 0.1 дБ; частота дискретизации импортированного образцового сигнала – 250 Гц; частота дискретизации сгенерированного искажённого сигнала – 125 Гц.

Чтобы оценить уровень шума в сгенерированном искажённом сигнале ЭКГ было рассчитано значение отношения сигнал/шум (ОСШ), которое определяется выражением [10, С. 227-229]:

$$\text{ОСШ} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} (x_{\text{неискаж}}[k])^2}{\sum_{k=0}^{N-1} (x_{\text{искаж}}[k] - x_{\text{неискаж}}[k])^2} \right), \quad (5)$$

где k – номер отсчёта, $x_{\text{неискаж}}[k]$ – значение неискажённого сигнала в момент времени дискретизации k , $x_{\text{искаж}}[k]$ – значение искажённого сигнала в момент времени дискретизации k , N – общее количество отсчётов искажённого сигнала.

Значение ОСШ для сгенерированного сигнала ЭКГ равно 0.1 дБ. Сгенерированный сигнал был обработан при помощи фильтра ПСС со значениями параметра m в диапазоне от 1 до 250, где m – количество искажённых значений сигнала, участвующих в расчете отфильтрованного значения для заданного момента времени k [см. выражение (1)]. Были проведены 250 сравнений и рассчитаны значения мер различия для двух временных рядов: временного ряда исходного неискажённого сигнала и 250 временных рядов отфильтрованных сигналов.

Поскольку значения мер различия могут находиться вне интервала $[0, 1]$, для приведения мер к одному диапазону значений, в их выражения было

включено деление на максимальное значение (среди всех значений для каждой меры различия) и округление до сотых долей (рис. 1).

Из рис. 1 следует, что нормированные значения мер различия имеют локальные минимальные значения (экстремумы), т. е. могут быть рассмотрены в качестве целевых функций в задаче поиска оптимальных значений параметра m цифрового фильтра ПСС.

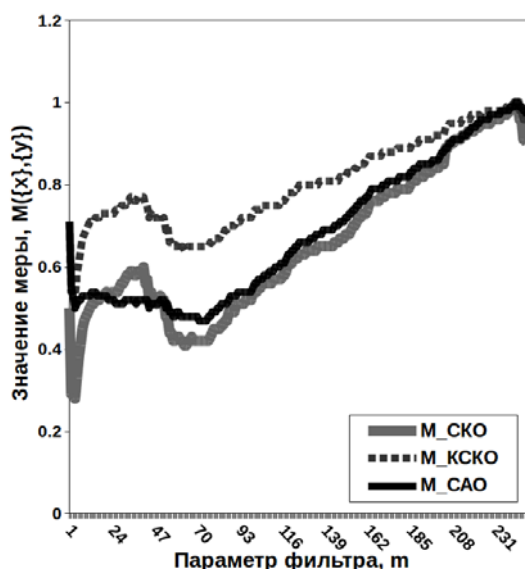


Рис. 1 – Нормированные округлённые значения мер различия для значений параметра m от 1 до 250 при $OSN = 0.1$ дБ

На рис. 2 изображены результаты фильтрации с двумя значениями параметра m фильтра ПСС, определёнными в соответствии с локальными экстремумами целевой функции меры СКО: $m_1 = 5$; $m_2 = 65$.

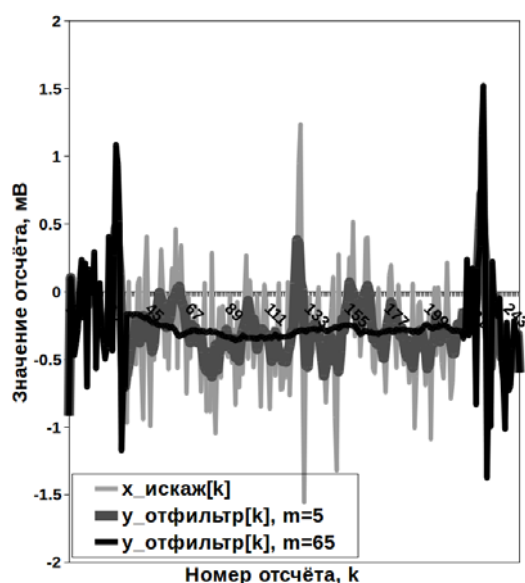


Рис. 2 – Значения отфильтрованных сигналов для заданных значений параметра m при $OSN = 0.1$ дБ

Из рис. 2 следует, что применение цифровой фильтрации с оптимальными значениями параметра m позволяет выделить различные частотные составля-

ющие искажённого сигнала и проанализировать их амплитудные характеристики.

Поскольку целью экспериментов было определение меры различия, для результата применения которой характерно большее количество найденных локальных оптимальных значений параметра цифрового фильтра ПСС при высоких уровнях флуктуационной помехи, были рассчитаны значения целевых функций при значениях OSN равных -5 дБ (рис. 3) и -10 дБ (рис. 4).

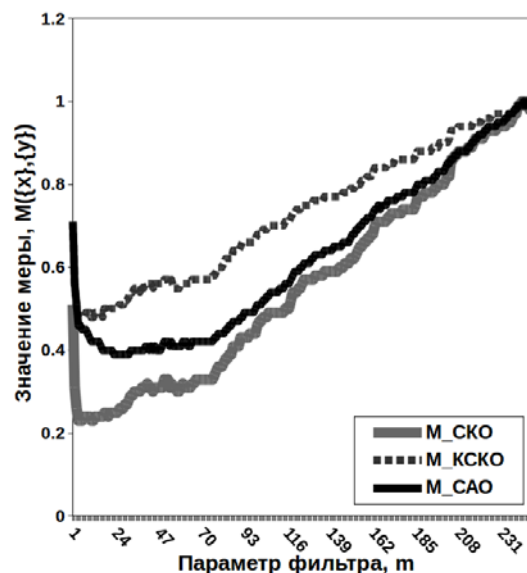


Рис. 3 – Нормированные округлённые значения мер различия для значений параметра m от 1 до 250 при $OSN = -5$ дБ

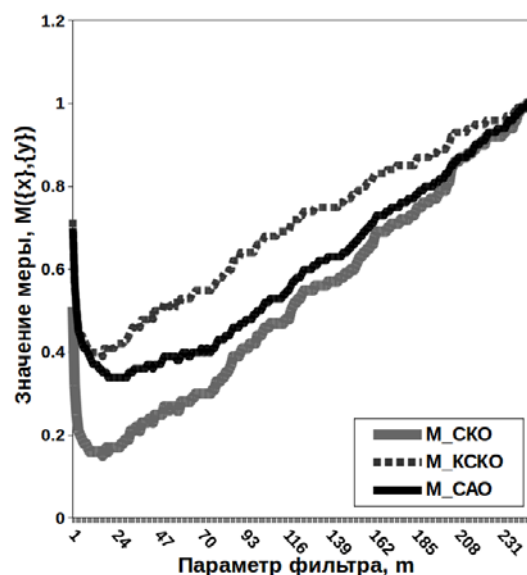


Рис. 4 – Нормированные округлённые значения мер различия для значений параметра m от 1 до 250 при $OSN = -10$ дБ

Из значений целевых функций изображённых на рис. 3, 4 следует, что при увеличении уровня помехи, количество локальных экстремумов уменьшается, следовательно уменьшается и количество частотных составляющих искажённого сигнала, которые можно

отфильтровать с учётом локальных оптимальных значений параметра m фильтра ПСС.

Чтобы оценить наличие закономерности уменьшения количества локальных экстремумов целевых функций при увеличении уровня помехи в искажённом сигнале, проведена серия экспериментов по расчёту количества локальных оптимальных значений параметра m для мер различия при заданных значениях $ОСШ_{искаж}$ от -10 дБ до +10 дБ (рис. 5).

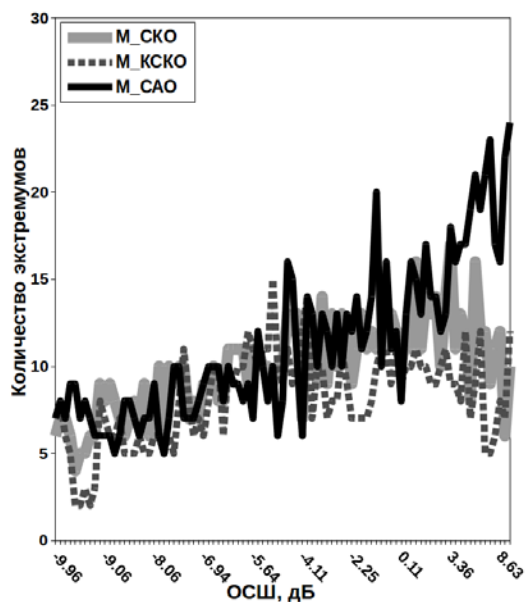


Рис. 5 – Количество экстремумов целевых функций мер различия при заданных $ОСШ$

Из результатов экспериментов, изображённых на рис. 5 следует, что для всех мер существует закономерность уменьшения количества локальных экстремумов при увеличении уровня помехи.

Сравнение мер различия. Поскольку необходимо выбрать меру, для результата применения которой характерно большее количество найденных локальных оптимальных значений параметра цифрового фильтра ПСС, выполнена серия экспериментов по расчёту значений среднего суммарного количества локальных экстремумов, которое определяется выражением:

$$\bar{M}(ОСШ[k]) = \frac{\sum_{i=0}^k M(ОСШ[i])}{k+1}, \quad (6)$$

где i – порядковый номер $ОСШ$ из заданного диапазона, k – фиксированный порядковый номер $ОСШ$, $ОСШ[i]$ – значение $ОСШ$ ($ОСШ[0] = -10$ дБ), $M(ОСШ[i])$ – количество локальных экстремумов при заданном значении $ОСШ$.

Для оценки значений количества локальных оптимальных значений параметра m цифрового фильтра ПСС для различных типов биомедицинских сигналов, была проведена серия экспериментов по расчёту значений среднего суммарного количества экстремумов при $ОСШ$ от -10.0 дБ до +10.0 дБ (рис. 7–9).

На рис. 6 изображены результаты серии экспериментов по расчёту значений среднего суммарного количества экстремумов для сигнала ЭКГ.

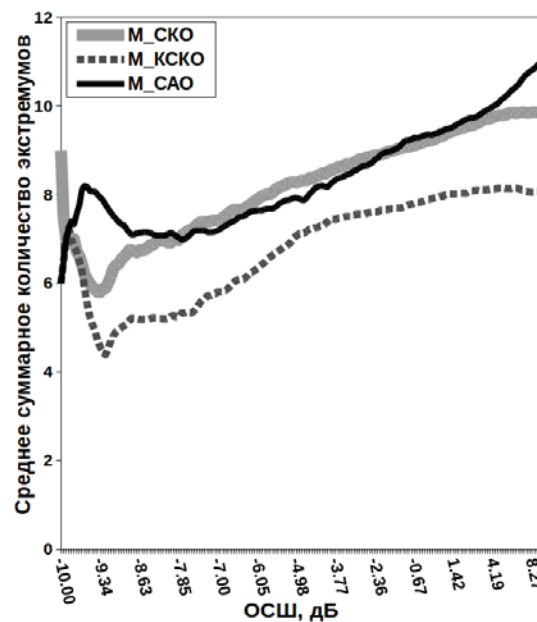


Рис. 6 – Среднее суммарное количество локальных экстремумов при заданных $ОСШ$ для сигнала ЭКГ

Из результатов экспериментов, изображённых на рисунке 6 следует, что для сигнала ЭКГ при $ОСШ$ от -7.0 дБ до +3.0 дБ в значениях целевых функций мер СКО и CAO найдены схожие количества локальных экстремумов.

На рис. 7 изображены результаты экспериментов по расчёту значений среднего суммарного количества экстремумов для сигнала ЭЭГ.

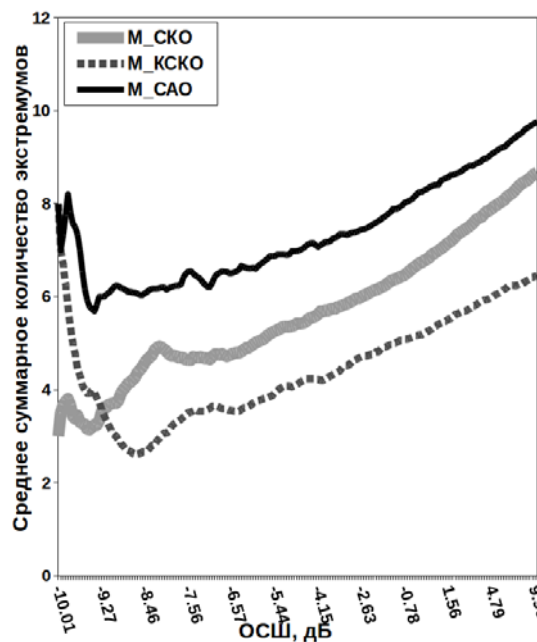


Рис. 7 – Среднее суммарное количество локальных экстремумов при заданных $ОСШ$ для сигнала ЭЭГ

На рис. 8 изображены результаты экспериментов для сигнала ЭМГ.

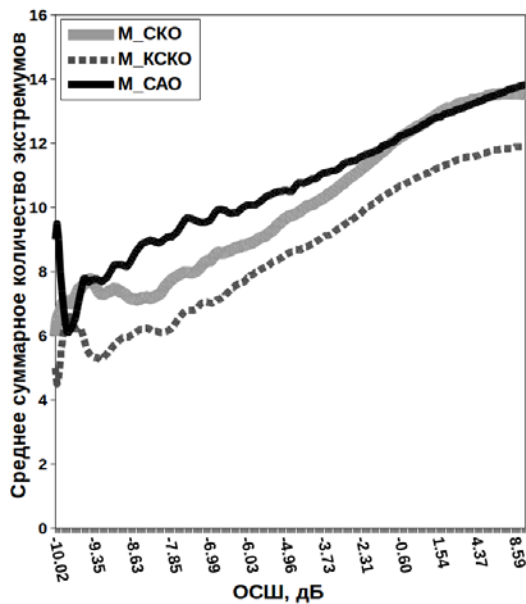


Рис. 8 – Среднее суммарное количество локальных экстремумов при заданных ОСШ для сигнала ЭМГ

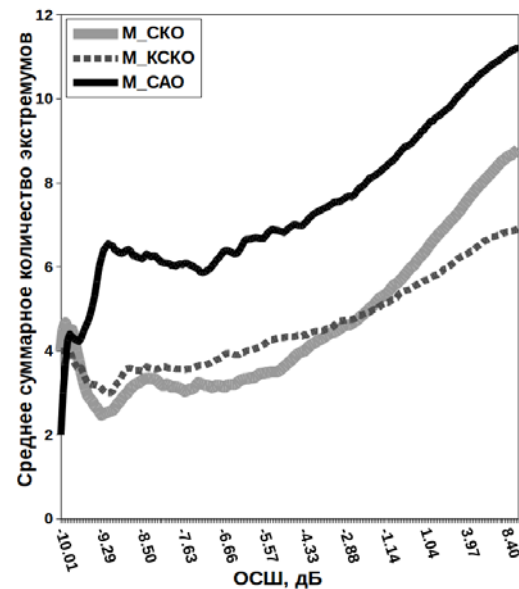


Рис. 9 – Среднее суммарное количество локальных экстремумов при заданных ОСШ для сигнала ЭОГ

На рис. 9 изображены результаты экспериментов для сигнала ЭОГ.

Из результатов проведенных экспериментов, изображенных на рис. 9 следует, что при ОСШ от -10.0 дБ до +10.0 дБ для сигнала ЭОГ в значениях целевых функций мер СКО и КСКО количество локальных экстремумов является схожим, также как для мер СКО и CAO в эксперименте с сигналом ЭКГ (рис. 6).

Для сигналов ЭЭГ, ЭМГ и ЭОГ количество локальных экстремумов целевой функции меры CAO превышает количество экстремумов для мер СКО и КСКО в интервале значений ОСШ от -9.0 дБ до +3.0 дБ (рис. 7–9), вследствие чего можно сделать вывод о том, что для результата применения меры «средняя абсолютная ошибка» характерно большее количество найденных локальных оптимальных значений параметра цифрового фильтра ПСС при высоких уровнях флуктуационной помехи.

Список литературы:

1. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко. – 3-е изд. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 593–595.
2. Cha, S.-H. Comprehensive Survey on Distance/Similarity Measures between Probability Density Functions [Text] / S.-H. Cha // International journal of mathematical models and methods in applied sciences. – 2007. – Vol. 1, Issue 4. – P. 300–307.
3. Willmott, C. J. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance [Text] / C. J. Willmott, K. Matsuura // Climate Research. – 2005. – Vol. 30. – P. 79–82. doi: [10.3354/cr030079](https://doi.org/10.3354/cr030079)
4. Willmott, C. J. On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators [Text] / C. J. Willmott, K. Matsuura // International Journal of Geographical Information Science. – 2006. – Vol. 20, No. 1. – P. 89–102. doi:10.1080/13658810500286976
5. Chai, T. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature [Text] / T. Chai, R. R. Draxler // Geoscientific Model Development. – 2014. – Vol. 7, Issue 3. – P. 1274–1250. doi: [10.5194/gmd-7-1247-2014](https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014)
6. Serheiev-Horchynskiy, O. Selection of error measure for reference and filtered periodic signals at high levels of fluctuating noise [Text] / O. Serheiev-Horchynskiy // Summer InfoCom 2017: Conference Proceedings. – Kyiv, 2017. – P. 100–103.
7. Сергеев-Горчинский, А. А. Выбор меры различия образцового и отфильтрованного периодических сигналов в задаче поиска оптимальных значений параметра цифрового фильтра при высоких уровнях флуктуационного шума [Текст] / А. А. Сергеев-Горчинский // Вісник НТУ «ХПИ». – 2017. – Т. 58, № 2. – С. 123–130.
8. Goldberger, A. L. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals [Text] / A. L. Goldberger, L. A. N. Amaral, L. Glass, J. M. Hausdorff, P. C. Ivanov, R. G. Mark et. al. // Circulation. – 2000. – Vol. 101, Issue 23. – P. e215–e220. doi: [10.1161/01.cir.101.23.e215](https://doi.org/10.1161/01.cir.101.23.e215)
9. Lind, B. K. Recruitment of Healthy Adults into a Study of Overnight Sleep Monitoring in the Home: Experience of the Sleep Heart Health Study [Text] / B. K. Lind, J. L. Goodwin, J. G. Hill, T. Ali, S. Redline, S. F. Quan // Sleep and Breathing. – 2003. – No. 7 (1). – P. 13–24. doi: 10.1007/s11325-003-0013-z
10. Oppenheim, A. V. Discrete-Time Signal Processing [Text] / A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer. – 3-rd ed. – London, 2010. – 1055 p.

Bibliography (transliterated):

1. Sergienko, A. B. (2011). Cifrovaya obrabotka signalov. Sankt-Peterburg, 593–595.
2. Cha, S.-H. (2007). Comprehensive Survey on Distance/Similarity Measures between Probability Density Functions. International journal of mathematical models and methods in applied sciences, 1 (4), 300–307.
3. Willmott, C., Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Research, 30, 79–82. doi: [10.3354/cr030079](https://doi.org/10.3354/cr030079)
4. Willmott, C. J., Matsuura, K. (2006). On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators. International Journal of Geographical Information Science, 20(1), 89–102. doi:10.1080/13658810500286976
5. Chai, T., Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific Model Development, 7 (3), 1247–1250. doi: [10.5194/gmd-7-1247-2014](https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014)
6. Serheiev-Horchynskiy, O. (2017). Selection of error measure for reference and filtered periodic signals at high levels of fluctuating noise. Summer InfoCom 2017: Conference Proceedings. Kyiv, 100–103.
7. Serheiev-Horchynskiy, O. O. (2017). Selection of error measure for reference and filtered periodic signals in the problem of searching for

- optimum values of digital filter parameters at high levels of fluctuating noise. Measuring and Computing Devices in Technological Processes, 58 (2), 123–130.
8. Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., Glass, L., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. C., Mark, R. G. et. al. (2000). PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. Circulation, 101 (23), e215–e220. doi: [10.1161/01.cir.101.23.e215](https://doi.org/10.1161/01.cir.101.23.e215)
 9. Lind, B. K., Goodwin, J. L., Hill, J. G., Ali, T., Redline, S., & Quan, S. F. (2003). Recruitment of Healthy Adults into a Study of Overnight Sleep Monitoring in the Home: Experience of the Sleep Heart Health Study. Sleep and Breathing, 7(1), 13–24. doi:10.1007/s11325-003-0013-z
 10. Oppenheim, A. V., Schaffer, R. W. (2010). Discrete-Time Signal Processing. London, 1055.

Поступила (received) 21.07.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вибір міри відмінності значень зразкового та відфільтрованого біомедичних сигналів / Сергеев-Горчинський О. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.37–42. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Выбор меры различия значений образцового и отфильтрованного биомедицинских сигналов / Сергеев-Горчинский А. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.37–42. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Selection of Error Measure for Reference and Filtered Biomedical Signals Values / Serheiev-Horchynskyi O. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.37–42. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сергеев-Горчинський Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, асистент кафедри системного проектування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: alexey.sergeev@ymail.com

Сергеев-Горчинский Алексей Александрович – кандидат технических наук, Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского, ассистент кафедры системного проектирования; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: alexey.sergeev@ymail.com

Serheiev-Horchynskyi Oleksii – PhD, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, an Assistant Teacher in the Department of System Design; 37, Peremohy ave., Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: alexey.sergeev@ymail.com

УДК 004.9

О. Ю. СЕРДЮК

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВЕРИФІКАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРІОДИЧНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ВИЯВЛЕННЯ ПРОГНОСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВЕРИФІКОВАНИХ ПОКАЗНИКІВ

В роботі представлено інформаційну технологію верифікації показників оптимізації простих операцій та її реалізацію у програмному продукті EF Expert. Для вирішення поставленого завдання створено шість обмежених класів простих моделей операцій, кожен з яких призначений для виявлення певної властивості показника оцінювання. Реалізовано процедуру верифікації показників оцінювання, структура яких відповідає формальним ознакам простої моделі операції. У результаті дослідження виявлено додаткову формальну ознаку оціночного показника, що забезпечує його прогностичні властивості.

Ключові слова: методи верифікації показників, прогностичні властивості показника, критерій оптимізації, інформаційна технологія.

В работе представлена информационная технология верификации показателей оптимизации простых операций и ее реализация в программном продукте EF Expert. Для решения поставленной задачи создано шесть ограниченных классов простых моделей операций, каждый из которых предназначен для выявления определенного свойства оценочного показателя. Реализована процедура верификации оценочных показателей, структура которых соответствует формальным признакам простой модели операции. В результате исследования выявлен дополнительный формальный признак оценочного показателя, который обеспечивает его прогностические свойства.

Ключевые слова: методы верификации показателей, прогностические свойства показателя, критерий оптимизации, информационная технология.

The article deals with issues related to the development of information technology and software for the verification of assessment indicators of general simple models of operations of controlled systems and the study of signs of presence of verified indicator prognostic properties. The result of the study is: creation of limited classes of simple operations general models, each of which characterizes the presence of certain property of assessment indicator; development of information technology and software product for the indicators verification; selection of assessment indicators, structure of which corresponds to the parameters of the general simple operation model; implementation of the procedure for their verification; conducting research on the availability of prognostic features in the assessment indicator in order to identify such formal signs that they are valid.

As scientific novelty, for the first time formulated and solved the task of operational verification of the assessment indicator for the possibility of using it as optimizing criterion for operations of controlled systems. The practical significance of the developed technology implemented in the software product is that the use of the indicator, which has passed all the verification procedures, contributes to the maximum harmonization of executive systems functioning of enterprise for purpose of its owner and to achieve maximum economic effect.

Keywords: indicators' verification methods, prognostic properties of indicator, optimization criterion, information technology.

© О. Ю. Сердюк. 2017

Вступ. Максимізація темпів розвитку сучасного підприємства може бути досягнена тільки в тому випадку, якщо процесуальна діяльність кожної керованої системи, що входить у його склад, працює з максимальною ефективністю використання ресурсів.

Це можливо, якщо в якості критерію оптимізації використовується єдиний системно обґрунтований показник ефективності.

При цьому, до теперішнього часу, інформаційна технологія верифікації оціночного показника та програмний продукт для реалізації оперативного дослідження властивостей існуючої множини оціночних показників та виявлення оригінальної формули ефективності, відсутні.

Результати оглядового дослідження показали, що через відсутність системно обґрунтованого методу верифікації, а відповідно і інформаційної технології тестування показника ефективності, розробники оціночних показників свідомо чи несвідомо уникають етапу верифікації.

Оскільки визначення формули ефективності відкриває можливості узгодженого функціонування операційних процесів будь-якого виробництва з метою його власника, розробка інформаційної технології та програмного продукту верифікації показника ефективності є важливим науково-практичним завданням.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Інформаційні технології є потужним інструментом для підвищення ефективності функціонування періодичних операційних процесів. При цьому вкрай важливим питанням є узгодження результатів процесуальної діяльності керованих систем, оскільки вони мають бути погоджені з кібернетичною та фінансовою метою власника, який виступає в ролі суперсистеми [1].

Наряду з цим розробляються методи верифікації і валідації моделей, які використовуються для ухвалення відповідальних рішень. Інтенсивні кроки в цьому напрямі зроблені саме в області розробки програмного забезпечення (ПЗ) [2].

Існує велика кількість нормативних актів, в яких встановлена необхідність вимоги до процедури верифікації ПЗ [3] та прописані правила її здійснення [4]. Але вони не стосуються верифікації критеріїв, за якими координується робота як ПЗ, так і іншої керованої системи.

Автори роботи [5] вперше запропонували метод формальної верифікації кібернетичних показників оцінки операцій на предмет їх можливості використання в якості критерію оптимізації керованих систем, що базуються на загальній простій моделі системної операції [6]. Як затверджується в [7–10], перевагою формального виду процедури є здійснення перевірки об'єкту (показника оцінювання), яке виконується для усіх можливих варіантів поведінки моделі та дозволяє вважати верифікацію вичерпною.

Для розвитку запропонованого методу та створення програмного продукту оперативної перевірки адекватності результатів функціонування показників оцінки, необхідно удосконалити формальні моделі, які і є предметом верифікації [11] та їх класифікувати [12]. Класи моделей повинні виявити найбільш суттєві характеристики об'єкту дослідження.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є розробити програмний продукт верифікації показників оптимізації періодичних операційних процесів та виявити формальні ознаки, що вказують на існування у верифікованих показників прогностичних властивостей.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Розробити класи простих моделей операцій, кожен з яких призначений для виявлення певної властивості показника оцінки, що проходить процедуру верифікації;

2. Розробити алгоритм роботи програмного продукту верифікації оціночних показників;

3. Створити програмний продукт верифікації на базі розробленого алгоритму;

4. Підібрати оціночні показники, що відповідають параметрам простої загальної моделі операції;

5. Провести процедуру верифікації кожного показника;

6. Дослідити властивості кожного показника та виявити формальні ознаки структури показника, що надають йому прогностичних властивостей.

Матеріали та методи дослідження щодо створення програмного комплексу для реалізації методу верифікації показників оптимізації загальних моделей простих операцій. Створення програмного комплексу обумовлено необхідністю реалізувати метод верифікації показників оптимізації періодичних операційних процесів керованих систем засобами інформаційних технологій.

В роботі [4] авторами запропоновано метод верифікації загальних простих моделей операцій. На першому етапі верифікації здійснюється відбір оціночних показників, структура яких відповідає формальним ознакам загальної моделі простої операції (вартісна оцінка вхідних продуктів операції IRE, час операції TO, вартісна оцінка вихідних продуктів операції IPE). Визначено види операцій для порівняльної оцінки таких моделей системних операцій та локальних критеріїв ефективності (LKE), за допомогою яких можна ідентифікувати операції відносно ефективності використання ресурсів.

На першому етапі реалізації інформаційної технології визначаються правила формування класів загальних моделей простих операцій (табл. 1), які перетворюються в формалізовану базу знань. Визначаються локальні критерії ефективності і встановлюється відповідність між класами операцій та локальними критеріями (етап 1).

Шляхом реалізації вищезазначених правил формуються загальні моделі простих операцій (ЗПМО) (етап 2), які потім ідентифікуються з використанням ЛКЕ (етап 3). Після чого, для кожної операції розраховується рейтингове значення їх ефективності (етап 4) та здійснюється їх ранжування (етап 5).

На слідуючому етапі операції оцінюються з використанням показника, що проходить процедуру верифікації (етап 6) і, за допомогою результатів отриманих значень ефективності, визначається рейтинг ідентифікованих операцій (етап 7).

На восьмому етапі здійснюється порівняння рей-

тингів ЗМО класу, ідентифікованих за допомогою ЛКЕ та досліджуваного показника.

Далі програмою перевіряється, чи усі класи операцій були ідентифіковані за проходження процедури

(етап 9). Якщо так, то характеристика результатів узгодженості співставлення відображається на екрані (етап 10).

Таблиця 1 – Правила формування класу

Клас	Початкові дані	Правила	ЛКЕ
1	IRE_x, TO_x, k_x $\{IRE_x; TO_x\} \in Q^+$ $k_x \in (1; 2]$	$IRE_y = IRE_x; TO_y = TO_x;$ $IPE_x > IRE_x; IPE_y > IRE_y;$ $IPE_x = (k_x + 1) \cdot IRE_x; k_x \neq k_y;$ $IPE_y = (k_y + 1) \cdot IRE_x = (k_y + 1) \cdot IRE_y$	$IPE, AOE,$ k
2	IRE_x, TO_x, k_x $\{IRE_x; TO_x\} \in Q^+$ $k_x \in (1; 2]$	$k_y = k_x; IRE_y = IRE_x; TO_y \neq TO_x;$ $IPE_x > IRE_x; IPE_y > IRE_y;$ $IPE_x = (k_x + 1) \cdot IRE_x;$ $IPE_y = (k_y + 1) \cdot IRE_y$	TO
3	IRE_x, TO_x, k_x $\{IRE_x; TO_x\} \in Q^+$ $k_x \in (1; 2]$	$IRE_y \neq IRE_x; TO_y = TO_x; IPE_y = IPE_x;$ $IPE_x > IRE_x; IPE_y > IRE_y;$ $IPE_x = (k_x + 1) \cdot IRE_x;$ $k_x \neq k_y; k_y = \frac{IPE_y - IRE_y}{IRE_y}$	$IRE, AOE,$ k
4	IRE_x, TO_x, k_x $\{IRE_x; TO_x\} \in Q^+$ $k_x \in (1; 2]$	$IRE_y \neq IRE_x; TO_y = TO_x; IPE_y \neq IPE_x;$ $IPE_x > IRE_x; IPE_y > IRE_y;$ $k_x \neq k_y$	k
5	$IRE_x, TO_x, k_x, n = 0.5$ $\{IRE_x; TO_x\} \in Q^+$ $k_x \in (1; 2]$	$IRE_y \neq IRE_x; TO_y = n \cdot TO_x;$ $IPE_x > IRE_x;$ $IPE_x = (k_x + 1) \cdot IRE_x;$ $IPE_y \neq IRE_x;$ $IPE_y = 2 \cdot IRE_x \cdot (k_x + 1)$	$\begin{cases} AOE(x) \\ AME_+(\tilde{y}) \end{cases}$
6	$IRE_x, TO_x, k_x, n \in N$ $\{IRE_x; TO_x\} \in Q^+$ $k_x \in (1; 2]$	$IRE_y = n \cdot IRE_x; TO_y > 0; TO_y = TO_x;$ $k_y = k_x; IRE_x > 0; IPE_x > IRE_x;$ $IPE_x = IRE_x \cdot (k_x + 1);$ $IPE_y \neq IRE_x;$ $IPE_y = n \cdot IRE_x \cdot (k_x + 1) = IRE_y \cdot (k_y + 1)$	—

У разі, якщо тестований показник протестовано на усіх формальних класах ЗПМО та після виведення звіту на екран, здійснюється перехід до верифікації наступного оціночного критерію (етап 11), процедура верифікації якого проходить аналогічним шляхом.

З огляду на необхідність зовнішнього введення верифікованих показників, з невідомою заздалегідь структурою, реалізація можливостей методу здійснювалася з використанням можливостей електронних таблиць Excel.

При цьому в Excel аркуші попередньо створюються порожні структури загальних моделей простих операцій і формули верифікованих показників з посиланням до конкретних комірок Excel листа.

Формування моделей еталонних операцій здійснюється програмою EF-Expert, написаної на мові Pascal в середовищі Delphi.

При активації кнопки «Тестування» сформовані програмою EF-Expert моделі операцій ідентифікуються за допомогою шаблонних локальних критеріїв ефективності. Після цього дані кожної операції завантажуються в попередньо визначені структури листа Excel. З комірок Excel, в яких записана формула верифікованого показника, вилучаються результати оцінки моделей операцій, які в програмі EF-Expert порівнюються з результатами тестової ідентифікації.

Результати верифікації показника відображаються в інтерфейсній формі програми EF-Expert (рис. 1).

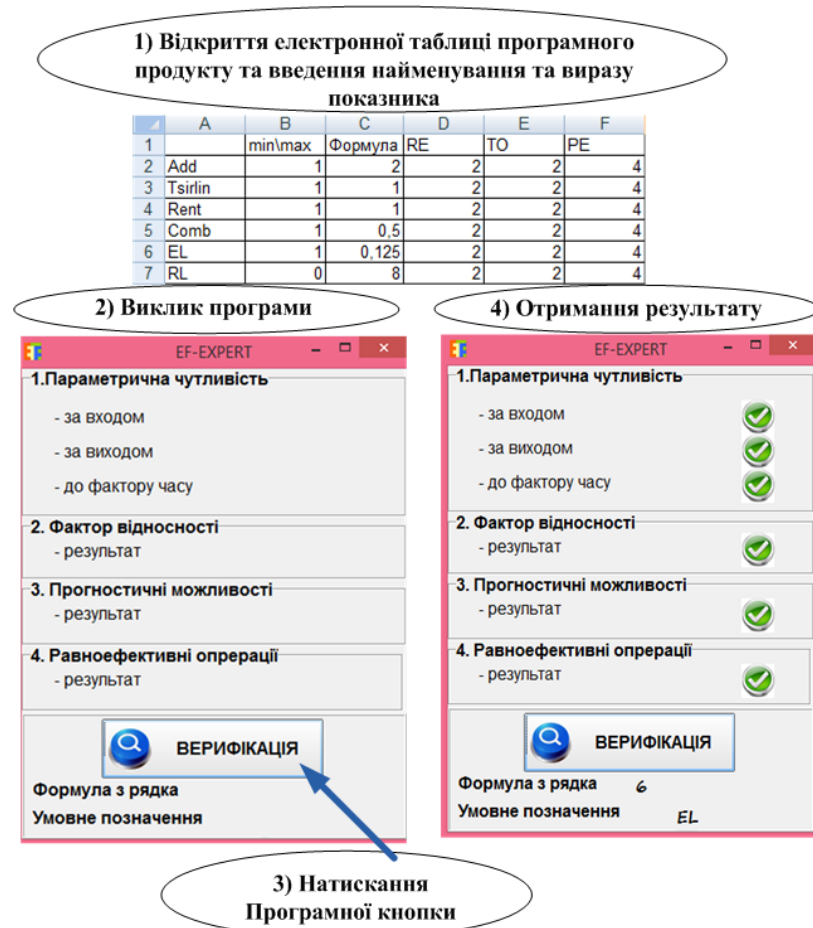


Рис. 1 – Етапи роботи з програмним продуктом верифікації оціночних показників

Кожне наступне натискання кнопки «Верифікація» призводить до виведення на інтерфейсну форму результатів верифікації наступного за чергою показника.

Успішне проходження процедури верифікації досягається в тому випадку, якщо результати рейтингового оцінювання ЗМПО з використанням тестового показника повністю збігаються з результатами оцінок, які отримані з використанням ЛКЕ.

Результати дослідження дослідження прогностичних властивостей верифікованих показників. В якості ілюстрації принципів методу були обрані такі показники: коефіцієнт Цирліна (EC) [13], коефіцієнт доданої вартості (рентабельність) (ER) [14], показник комплексної рентабельності (R) [15], показник ефективності (EL) [16], показник ресурсоємності (RL) [17] (табл. 2).

Таблиця 2 – Показники, внутрішня структура яких відповідає формальним ознакам дослідження

Показник	min\max	Формула
ER	1	$\frac{IPE - IRE}{IRE}, TO = const$
EC	1	$\frac{IPE - IRE}{TO}$
EL	1	$EL = \frac{(IPE - IRE)^2 \cdot TO_1^2}{IPE \cdot IRE \cdot TO^2}, TO_1 = 1$
R	1	$\frac{IPE - IRE}{IRE \cdot TO}$
RL	0	$RL = \frac{IPE \cdot IRE \cdot TO_1^2}{2 \cdot (IPE - IRE)}, TO_1 = 1$

Наведені показники верифіковано на предмет можливості їх використання в якості критерію ефективності.

В результаті проведеної процедури верифікації було вивлено, що показник ER невірно виконав оцінювання класів ЗМПО 2, 5 та 6. Показник EC не впорався з оцінкою класів 4 і 5. Результат оцінки за допомогою показника комплексної рентабельності R має неузгодженість з рейтинговою оцінкою еталонних операцій для п'ятого класу операцій. При оцінюванні равноефективних операцій за допомогою показника ресурсоемності RL для шостого класу було також виявлено неузгодженість з попередньо створеною рейтинговою оцінкою.

В результаті проведених досліджень встановлено, що процедуру верифікації успішно пройшов показник EL .

Обговорення результатів проходження процедури верифікації показників оптимізації системних операцій. В результаті проведення процедури верифікації було виявлено, що показники EC та R не мають прогностичних властивостей, хоча в структурі виразу цих показників присутній фактор часу. В виразах верифікованих показників, що за результатами верифікації мають прогностичні властивості, показник часу возведено у другий ступінь.

Це спостереження дозволило висунути гіпотезу про те, що саме квадрат часу у виразах оціночних показників, зумовлює наявність у них прогностичних властивостей.

Для перевірки цієї гіпотези, у виразах EC та R параметр часу було підвищено до другого ступеня.

У результаті перетворень отримано такі вирази:

$$EC = \frac{IPE - IRE}{TO^2}; \quad (1)$$

$$R = \frac{IPE - IRE}{IRE \cdot TO^2}. \quad (2)$$

В результаті тестування показників підтверджено гіпотезу про те, що наявність показника квадрату часу вказує на наявність в ньому прогностичних властивостей. Це дає можливість оцінювати ефективність

процесу, що складається з операцій, породжених від вкладання в них додаткової вартості першочергової операції.

Отже, експериментально виведений показник R на другому етапі верифікації адекватно оцінив операції усіх обмежених класів.

Проведені експерименти дисертаційного дослідження підтвердили працездатність запропонованого методу і його реалізацію в створеному програмному продукті, що дозволяє рекомендувати його фахівцям - практикам для відбору оціночного критерію з безлічі показників, які пропонуються дослідниками в якості критерію оптимізації періодичних системних процесів. Показник, який успішно пройшов верифікацію, забезпечує можливість узгодження параметрів операційного процесу з метою власника (суперсистеми). При цьому передбачається, що метою суперсистеми є максимізація фінансових можливостей, прямо пов'язаних з ефективністю використання доступних ресурсів.

Висновки. У дисертаційному дослідженні вдалося вирішити задачу автоматизованої ідентифікації оригінального показника ефективності серед безлічі оціночних показників, які відповідають формальним ознакам критерія оптимізації.

В результаті проведених досліджень в роботі було отримано такі наукові результати:

1. Формальними ознаками показника ефективності є наявність в його структурі об'єктів загальної моделі системної операції, а саме вартісної оцінки вхідних продуктів операції, квадрату часу операції, вартісної оцінки вихідних продуктів операції.

2. Розроблено правила формування обмежених класів моделей простих операцій з визначеними для кожного класу операцій локальними критеріями ефективності, що дає змогу ідентифікувати моделі операцій, у відповідності з їх рейтинговою ефективністю, в рамках класу.

4. Отримала подальший розвиток інформаційна технологія верифікації оціночних показників, що дозволило реалізувати процедуру ідентифікації критерію оптимізації.

Список літератури:

1. Lutsenko, I. Definition of efficiency indicator and study of its main function as an optimization criterion [Text] / I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 6, Issue 2 (84). – P. 24–32. doi: [10.15587/1729-4061.2016.85453](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85453)
2. Пауко, А. О. Експертна система прийняття рішень з нечіткою логікою для оцінки технічного стану об'єктів будівництва [Текст]: міжнар. наук. конф. / А. О. Пауко, С. А. Теренчук, Б. М. Єременко // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту. – 2016. – С. 213–215.
3. Липаев, В. В. Обеспечение качества программных средств. Методы и стандарты [Текст] / В. В. Липаев. – М.: СИНТЕГ, 2001. – 380 с.
4. Lutsenko, I. Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations [Text] / I. Lutsenko, E. Vihrova, E. Fomovskaya, O. Serdiuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 2, Issue 4 (80). – P. 42–50. doi: [10.15587/1729-4061.2016.66307](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.66307)
5. Lutsenko, I. Formal signs determination of efficiency assessment indicators for the operation with the distributed parameters [Text] / I. Lutsenko, E. Fomovskaya, I. Oksanych, E. Vihrova, O. Serdiuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, Issue 4 (85). – P. 24–30. doi: [10.15587/1729-4061.2017.91025](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91025)
6. Lutsenko, I. Development of system operations models hierarchy on the aggregating sign of system mechanisms [Text] / I. Lutsenko, E. Fomovskaya, E. Vihrova, O. Serdiuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 3, Issue 2 (81). – P. 39–46. doi: [10.15587/1729-4061.2016.71494](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71494)
7. Камкин, А. С. Средства функциональной верификации микропроцессоров [Текст] / А. С. Камкин, А. М. Коцыняк, С. А. Смолов, А. Д. Татарников, М. М. Чушилко, А. А. Сортон // Труды Института системного программирования РАН. – 2014. – № 1 (26). – С. 149–199.
8. Model Driven Architecture (MDA) [Electronic resource]. – Document number ormsc/2001-07-01. – 2001. – 31 p. – Available at: <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?ormsc/2001-07-01>
9. Jain, H. VCEGAR: Verilog CounterExample Guided Abstraction Refinement [Text] / H. Jain, D. Kroening, N. Sharygina, E. Clarke // Lecture Notes in Computer Science. – 2007. – P. 583–586. doi: [10.1007/978-3-540-71209-1_45](https://doi.org/10.1007/978-3-540-71209-1_45)
10. Lam, W. K. Hardware Design Verification: Simulation and Formal Method-Based Approaches [Text] / W. K. Lam. – Prentice Hall, 2005. – 624 p.

11. Литвинов, В. В. Формальная верификация диаграммы классов [Текст] / В. В. Литвинов, И. В. Богдан // Математические машины и системы. – 2013. – № 2. – С. 41–47.
12. Буч, Г. UML. Классика CS [Текст] / Г. Буч, А. Якобсон, Дж. Рамбо. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 736 с.
13. Цирлин, А. М. Оптимальное управление технологическими процессами [Текст] / А. М. Цирлин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
14. Демчук, О. В. Прибыль и рентабельность предприятия: сущность, показатели и пути повышения [Текст] / О. В. Демчук, С. Г. Арефьева // Проблемы экономики и менеджмента. – 2015. – № 8 (48). – С. 6–9.
15. Луценко, И. А. Разработка динамической модели экономической операции [Текст] / И. А. Луценко, О. Ю. Сердюк, О. В. Фомовська // Научные исследования. – 2016. – С. 77–87.
16. Lutsenko, I. Identification of target system operations. The practice of determining the optimal control [Text] / I. Lutsenko, E. Fomovskaya // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 6, Issue 2 (78). – P. 30–36. doi: [10.15587/1729-4061.2015.54432](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54432)
17. Lutsenko, I. Identification of target system operations. Determination of the value of the complex costs of the target operation [Text] / I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 1, Issue 2 (73). – P. 31–36. doi: [10.15587/1729-4061.2015.35950](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.35950)

Bibliography (transliterated):

1. Lutsenko, I. (2016). Definition of efficiency indicator and study of its main function as an optimization criterion. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (2 (84)), 24–32. doi: [10.15587/1729-4061.2016.85453](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85453)
2. Pashko, A. O., Terenchuk, S. A., Yerenenko, B. M. (2016). Ekspertna systema pryiniattia rishen z nechitkoiu lohikoiou dlia otsinky tekhnichnoho stanu ob'ektiv budivnytstva. Intelktualni systemy pryiniattia rishen ta problemy obchysluvalnoho intelektu, 213–215.
3. Lipaev, V. V. (2001). Obespechenie kachestva programmyh sredstv. Metody i standarty. Moscow: SINTEG, 380.
4. Lutsenko, I., Vihrova, E., Fomovskaya, E., Serdiuk, O. (2016). Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (4 (80)), 42–50. doi: [10.15587/1729-4061.2016.66307](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.66307)
5. Lutsenko, I., Fomovskaya, E., Oksanych, I., Vihrova, E., Serdiuk, O. (2017). Formal signs determination of efficiency assessment indicators for the operation with the distributed parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (4 (85)), 24–30. doi: [10.15587/1729-4061.2017.91025](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91025)
6. Lutsenko, I., Fomovskaya, E., Vihrova, E., Serdiuk, O. (2016). Development of system operations models hierarchy on the aggregating sign of system mechanisms. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (2 (81)), 39–46. doi: [10.15587/1729-4061.2016.71494](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71494)
7. Kamkin, A. S., Kocyniak, A. M., Smolov, S. A., Tatarnikov, A. D., Chupilko, M. M., Sortov, A. A. (2014). Credstva funktsional'noj verifikatsii mikroprocessorov. Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN, 1 (26), 149–199.
8. Model Driven Architecture (MDA) (2001). Document number ormsc/2001-07-01, 31. Available at: <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?ormsc/2001-07-01>
9. Jain, H., Kroening, D., Sharygina, N., Clarke, E. (2007). VCEGAR: Verilog CounterExample Guided Abstraction Refinement. Lecture Notes in Computer Science, 583–586. doi: [10.1007/978-3-540-71209-1_45](https://doi.org/10.1007/978-3-540-71209-1_45)
10. Lam, W. K. (2005). Hardware Design Verification: Simulation and Formal Method-Based Approaches. Prentice Hall, 624.
11. Litvinov, V. V., Bogdan, I. V. (2013). Formal'naya verifikatsiya diagrammy klassov. Matematicheskie mashiny i sistemy, 2, 41–47.
12. Buch, G., Yakobson, A., Rambo, Dzh. (2006). UML. Klassika CS. Sankt-Peterburg Piter, 736.
13. Cirilin, A. M. (1986). Optimal'noe upravlenie tekhnologicheskimi processami. Moscow: Ehnergoatomizdat, 400.
14. Demchuk, O. V., Arefeva, S. G. (2015). Pribyl' i rentabel'nost' predpriyatiya: sushchnost', pokazateli i puti povysheniya. Problemy ehkonomiki i menedzhmenta, 8 (48), 6–9.
15. Lucenko, I. A., Serdyuk, O. Yu., Fomov'ska, O. V. (2016). Razrabotka dinamicheskoi modeli ehkonomicheskoi operatsii. Nauchnye issledovaniya, 77–87.
16. Lutsenko, I., Fomovskaya, E. (2015). Identification of target system operations. The practice of determining the optimal control. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (2 (78)), 30–36. doi: [10.15587/1729-4061.2015.54432](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54432)
17. Lutsenko, I. (2015). Identification of target system operations. Determination of the value of the complex costs of the target operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (2 (73)), 31–36. doi: [10.15587/1729-4061.2015.35950](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.35950)

Надійшла (received) 16.07.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка інформаційної технології верифікації показників оптимізації періодичних операційних процесів та виявлення прогностичних властивостей верифікованих показників/ Сердюк О. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.42–47. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Разработка информационной технологии верификации показателей оптимизации периодических операционных процессов и исследование прогностических свойств верифицированных показателей/ Сердюк О. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.42–47. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Development of information technology of verification of optimization indicators for periodic operating processes and determination of prognostic properties of verified indicators/ Serdiuk O. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.42–47. – Bibliogr.:17. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сердюк Ольга Юрійвна – аспірант, Криворізький національний університет, Кафедра комп'ютерних систем та мереж, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027, e-mail: olgajs28@gmail.com.

Сердюк Ольга Юрьевна – аспірант, Криворожский национальный университет, Кафедра компьютерных систем и сетей, ул. Виталия Матусевича, 11, г. Кривой Рог, Украина, 50027, e-mail: olgajs28@gmail.com.

Serdiuk Olga – Postgraduate student, Department of computer systems and networks, Kryvyi Rih National University, Vitaliia Matuskevycha str., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, e-mail: olgajs28@gmail.com.

Н. В. ФЕДОРОВ, А. М. ХРЕНОВ

СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕТИ

Рассматривается задача определения оптимальной структуры и параметров функционирования локальной подсистемы инженерной сети, при заданных граничных условиях. Локальная подсистема состоит из активных и пассивных элементов, образующих сложную сетевую структуру. Проведена декомпозиция задачи оптимизации локальной подсистемы инженерной сети. Предложены алгоритмы определения оптимального распределения расходов целевого продукта и соответствующих им давлений на входах сети, а также выбора рациональной структуры линейной части магистрального газопровода, в основе которого лежит один вариант поиска коллективом автоматов Буша-Мостеллера.

Ключевые слова: инженерная сеть, локальная подсистема, оптимизация, магистральный газопровод, декомпозиция, рациональная структура

Розглядається задача визначення оптимальної структури та параметрів функціонування локальної підсистеми інженерної мережі, при заданих граничних умовах. Локальна підсистема складається з активних і пасивних елементів, що утворюють складну мережеву структуру. Проведена декомпозиція задачі оптимізації локальної підсистеми інженерної мережі. Запропоновано алгоритми визначення оптимального розподілу витрат цільового продукту і відповідних їм тисків на входах мережі, а також вибору раціональної структури лінійної частини магистрального газопроводу, в основі якого лежить один варіант пошуку колективом автоматів Буша-Мостеллера.

Ключові слова: інженерна мережа, локальна підсистема, оптимізація, магістральний газопровід, декомпозиція, раціональна структура

The problem of determining the optimal structure and parameters of the functioning of a local subsystem of an engineering network, under given boundary conditions, is considered. It is shown that this task has a hierarchical structure, corresponding tasks are formulated for each level of the hierarchy. The local subsystem consists of active and passive elements forming a complex network structure. The solution of the problem of finding the optimal structure and parameters of the active elements of the local subsystem can be obtained by solving the problem of determining the optimal structure of the linear part and the problem of determining the optimal structure and parameters of the compressor station for a given structure of the linear part. Determination of the optimal structure and parameters of the compressor station, in turn, reduces to solving the problem of determining the optimal distribution of gas flow through the inputs of the linear part and the problem of determining the optimal structure and control parameters of the compressor station. Decomposition of the optimization problem of the local subsystem of the engineering network is carried out. Algorithms are proposed for determining the optimal distribution of the target product costs and the corresponding pressures at the grid inputs, as well as choosing the rational structure of the linear part of the main gas pipeline, which is based on one variant of searching for the Bush-Mosteller automata.

Keywords: engineering network, local subsystem, optimization, main gas pipeline, decomposition, rational structure

Введение. Под инженерной сетью понимают различные системы энергоснабжения, к которым безусловно относят и системы газо- и водоснабжения, а также тепловые сети[1,2]. Некоторые из таких систем, в частности системы магистрального газоснабжения, имеют сложную структуру, компонентами которой являются локальные подсистемы[3,4]. Для успешного управления работой всей системы необходимо уметь находить оптимальные режимы работы локальных подсистем при заданных граничных условиях[5,6,7].

Цель работы. Задачу структурной и параметрической оптимизации локальной подсистемы инженерной сети рассмотрим на примере оптимизации локальной подсистемы магистрального газопровода. Такая система состоит из двух частей: активной части и пассивной части. Под активной частью понимается компрессорная станция (КС), а под пассивной – сеть магистрального газопровода, прилегающая к данной компрессорной станции.

В качестве критерия оптимизации работы локальной подсистемы магистрального газопровода целесообразно принять критерий минимума энергозатрат N [8].

Вектор управляемых переменных локальной подсистемы магистрального газопровода может быть представлен в виде

$$\bar{r} = \{P_v, \bar{q}_{vx}, \bar{b}, \bar{u}\}, \quad (1)$$

где P_v – давление на входе компрессорной станции; $\bar{q}_{vx}$ – вектор переменных, определяющий распределение поставок газа между потребителями подсистемы;

$\bar{b}$ – вектор переменных определяющий структуру подсистемы; $\bar{u}$ – вектор управления активными элементами подсистемы. P_v и компоненты вектора $\bar{q}_{vx}$ для данной задачи считаются заданными.

Таким образом целью работы является определение компоненты векторов $\bar{b}$ и $\bar{u}$ при которых достигается минимума энергозатрат N . Значения $\bar{b}$ и $\bar{u}$ должны быть определены в результате решения задачи структурной и параметрической оптимизации локальной подсистемы.

Декомпозиция задачи оптимизации локальной подсистемы инженерной сети. Конкретная структура сети устанавливается заданием положения запорных задвижек сети. Каждая задвижка может иметь два положения «открыто» - «закрыто». Компоненты вектора $\bar{b}$ являются двоичными переменными (1 – задвижка открыта, 0 – задвижка закрыта). Представим вектор в виде совокупности двух векторов:

$$\bar{b} = \{\bar{b}_a, \bar{b}_p\} \quad (2)$$

где $\bar{b}_a$ – вектор переменных, определяющих структуру S_1 компрессорной станции; $\bar{b}_p$ – вектор переменных, определяющих структуру S_2 линейной части локальной подсистемы.

Активными элементами локальной подсистемы магистрального газопровода являются газоперекачивающие аппараты, установленные на компрессорной станции.

© Н. В. Федоров, А. М. Хренов. 2017

При заданных значениях P_v и $\bar{q}_{vx}$ для структуры S_2 существует множество V_d допустимых наборов $\{S_1, \bar{u}\}$.

Множество структур линейной части, для которых при заданных условиях транспорта и распределения газа существуют непустые множества V_d называются, множеством допустимых структур T_d .

Оптимальный режим функционирования локальной подсистемы определяется как результат минимизации выбранного критерия N на множестве $\{(S_1, \bar{u}) \in V_d, S_2 \in T_d\}$ при заданных значениях P_v и $\bar{q}_{vx}$.

Вектор управлений $\{S_1^*, \bar{u}^*\}$, для которого выполняется равенство

$$N(S_1^*, \bar{u}^*, S_2) = \min_{\{S_1, \bar{u}\} \in V_d} N(S_1, \bar{u}, S_2), \quad S_2 \in T_d \quad (3)$$

будем называть вектором оптимальных управлений компрессорной станцией при структуре S_2 .

Оптимальная структура линейной части определяется в результате решения задачи вида:

$$N(S_1^{**}, \bar{u}^{**}, S_2^*) = \min_{S_2 \in T_d} N(S_1^*, \bar{u}^*, S_2) \quad (4)$$

Структура S_2^* называется оптимальной структурой, соответствующей заданным условиям транспорта и распределения газа.

Таким образом, решение исходной задачи отыскания оптимальной структуры и параметров активных элементов локальной подсистемы может быть получено путем решения задачи определения оптимальной структуры линейной части и задачи определения оптимальной структуры и параметров компрессорной станции при заданной структуре линейной части.

Обозначим $\bar{P}_{vaks}$ – вектор переменных, определяющих давления на выходах компрессорной станции; $\bar{q}_{vaks}$ – вектор переменных, определяющих расходы на выходах компрессорной станции.

Переменные определяющие значения давлений и расходов на выходах КС в то же время являются переменными, определяющими значения давлений и расходов на входах линейной части локальной подсистемы.

Для заданных значений компонент векторов $\bar{q}_{vx}$ и $\bar{q}_{vaks}$ и известных ограничениях на значения давлений на выходах сети можно рассчитать минимальные значения давлений на входах сети (или что то же самое – на выходах КС) при которых будут выполнены поставленные условия транспорта газа по линейной части.

Критерий оптимизации N можно представить как функцию

$$N(P_v, \bar{P}_{vaks}, \bar{q}_{vaks}, S_1, \bar{u}) \quad (5)$$

При заданных значениях P_{vx} , $\bar{P}_{vaks}$, $\bar{q}_{vaks}$, существует множество V_d^z допустимых наборов управлений $\{S_1, \bar{u}\}$.

Вектор управлений $\{S_1^M, \bar{u}^M\}$, для которого выполняется

$$N(P_v, \bar{P}_{vaks}, \bar{q}_{vaks}, S_1^M, \bar{u}^M) = \min_{\{S_1, \bar{u}\} \in V_d^z} N(P_v, \bar{P}_{vaks}, \bar{q}_{vaks}, S_1, \bar{u}) \quad (6)$$

назовем вектором оптимальных управлений компрессорной станции при заданных условиях ее работы.

Q_d – область допустимых значений компонент вектора $\bar{q}_{vaks}$.

Пусть для вектора $\bar{q}_{vaks}^*$ и соответствующего ему вектора минимальных давлений на входах сети $\bar{P}_{vaks}^*$ справедливо

$$N(P_v, \bar{P}_{vaks}^*, \bar{q}_{vaks}^*, S_1^{M*}, \bar{u}^{M*}) = \min_{\bar{q}_{vaks} \in Q_d} N(P_v, \bar{P}_{vaks}, \bar{q}_{vaks}, S_1^{M*}, \bar{u}^{M*}) \quad (7)$$

тогда S_1^{M*} и $\bar{u}^{M*}$ определяют оптимальную структуру, и параметры управления активными элементами компрессорной станции при заданной структуре линейной части, т.е.

$$S_1^{M*} \equiv S_1^*, \quad \bar{u}^{M*} \equiv \bar{u}^* \quad (8)$$

Таким образом, решение задачи определения оптимальной структуры и параметров компрессорной станции в свою очередь сводится к решению задачи определения оптимального распределения расходов газа по входам линейной части и задачи определения оптимальной структуры и управляющих параметров компрессорной станции при заданных значениях P_v , $\bar{P}_{vaks}$, $\bar{q}_{vaks}$.

Определение оптимального распределения расходов целевого продукта и соответствующих им давлений на входах сети. Задача определения оптимального распределения расходов целевого продукта по входам сети заключается в минимизации функции

$$N(P_v, \bar{P}_{vaks}, \bar{q}_{vaks}, S^M, \bar{U}^M) \quad (9)$$

на множестве значений $\bar{q}_{vaks} \in Q_d$.

Обозначим q_v – заданное значение расхода на входе компрессорной станции.

Так как расходы на входе компрессорной станции связаны между собой соотношением

$$\sum_i q_{vaks} = q_v, \quad (10)$$

то число независимых переменных, по которым проводится минимизация функции N на единицу меньше числа выходов КС.

Число выходов компрессорной станции соответствует числу входов линейной части локальной подсистемы, на которых мы можем варьировать расходы:

$$\bar{q}_{vs} \equiv \bar{q}_{vks} \quad (11)$$

Если линейная часть имеет два выхода, то задача определения оптимальных значений компонент вектора $\bar{q}_{vs}$ сводится к задаче одномерной поисковой оптимизации и для ее решения можно применять эффективные методы: дихотомию, метод золотого сечения или Фибоначчи.

Рассмотрим случай, когда линейная часть имеет три входа. Для решения такой задачи предлагается алгоритм, основанный на использовании метода частичного минимума.

Сам метод основан на синтезе двух идей: идеи покоординатного спуска и идеи минимума, т.е. идеи отыскания $\min_{\bar{X} \in R_n} F(\bar{X})$, как

$$\min_{x_i \in X_1} \min_{x_i \in X_2} F(\bar{X}), \quad (12)$$

где X_1 множество «внешних» переменных; X_2 множество «внутренних» переменных.

Алгоритм определения оптимального распределения расходов состоит в следующем:

1. Расходы на одном из входов сети объявляются внешней переменной – пусть это будет q_{1vs} , и пусть расход q_{2vs} будет внутренней переменной.

2. Задаем начальное значение вектора $\bar{q}_{vs}^{(0)}$ и запоминаем его в качестве лучшего значения $\bar{q}_{vs}^{(M)}$.

3. Вычисляем значение функции

$$N^{(M)} = N(\bar{q}_{vs}^{(M)}) \quad (13)$$

4. $q_{1vs} = q_{1vs} + \Delta$

5. Для нового значения внешней переменной определяем значение внутренней переменной, так чтобы вектор $\bar{q}_{vs}$ остался в области Q_d .

6. При фиксированном значении внешней переменной производится оптимизация по внутренней переменной и определяется значение функции $N^{(m)}$:

$$N^{(m)} = N(\bar{q}_{vs}^{(m)}),$$

где $\bar{q}_{vs}^{(m)} = \{q_{1vs}, q_{2vs}^{(m)}, q_{3vs}^{(m)}\}$; $q_{2vs}^{(m)}$ – значение внутренней переменной доставляющей минимум функции N при фиксированном значении внешней переменной; $q_{3vs} = q_v - q_{1vs} - q_{2vs}^{(m)}$.

7. Если $N^{(m)} < N^{(M)}$, то $N^{(M)}$ присваиваем значение $N^{(m)}$, $\bar{q}_{vs}^{(M)}$ присваиваем значение $\bar{q}_{vs}^{(m)}$, а Δ – значение $\gamma_1 \Delta$ ($\gamma_1 > 1$).

Если $N^{(m)} > N^{(M)}$, то значение $N^{(M)}$ и $\bar{q}_{vs}^{(M)}$ остаются прежними, а Δ получает значение $\gamma_2 \Delta$ ($-1 < \gamma_2 < 0$).

Последовательность действий 4–7 выполняется до тех пор, пока не будет обнаружена точка минимума.

Одномерная оптимизация может быть осуществлена либо по тому же принципу, что и оптимизация по внешней переменной, либо каким-либо другим методом одномерной поисковой оптимизации.

При заданных значениях компонент векторов $\bar{q}_{vs}$ и $\bar{q}_{vx}$, а также заданных ограничениях на давления на выходах сети – вектор $\bar{P}_{vx}$, в результате гидравлического расчета сети можно определить минимально допустимые давления на входах сети.

Для математической формулировки задачи произведем следующее кодирование сети: дерево графа выберем таким образом, чтобы фиктивные участки сети, кроме одного, который соответствует входу сети, стали хордами. При этом реальные участки частично станут хордами, а частично ветвями дерева. Ветви дерева, которая соответствует фиктивному участку, присвоим номер 1.

Таким образом, $L_1 = \{1\}$, а $K_2 = K$.

С учетом приведенного выбора дерева сети, а также того факта, что

$$h_r + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} h_i = 0, \quad (14)$$

по любому замкнутому циклу, содержащему реальные участки сети, математическая модель линейной части магистрального газопровода примет вид

$$f_r = c_r q_r |q_r| + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} c_i q_i |q_i| = 0 \quad (r \in M_2) \quad (15)$$

$$f_r = -P_{rk} |P_{rk}| - P_{lk} |P_{lk}| + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} c_i q_i |q_i| = 0 \quad (r \in L_2) \quad (16)$$

$$f_r = P_{rn} |P_{rn}| - P_{lk} |P_{lk}| + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} c_i q_i |q_i| = 0 \quad (r \in K_2) \quad (17)$$

$$q_i = \sum_{r \in M_2} b_{1ri} q_r + Q_i^+ \quad (i \in M_1 \cup L_1), \quad (18)$$

$$\text{где} \quad Q_i^+ = \sum_{r \in L_2 \cup K_2} b_{1ri} q_r = \text{const} \quad (i \in M_1 \cup L_1) \quad (19)$$

Алгоритм решения задачи состоит в следующем:

1. Производится увязочный расчет, т.е. решаем систему нелинейных алгебраических уравнений (15)–(17) при $(v-1)$ – м линейном уравнении связи (18), используя метод Ньютона;

2. Определяем минимальные необходимые давления на входах сети. Для этого в уравнения (15)–(17) подставим полученные в результате увязочного расчета расходы и найдем значения h'_r ($r \in K_2$) при условии, что вместо значения P_m подставляется значение соответствующей компоненты вектора P_{vx} , а вместо P_{lv} значение 0.

$$h'_r = (P'_{rx})^2 + \sum_{i \in M_1} b_{ri} c_i q_i |q_i| \quad (r \in K_2) \quad (20)$$

Величины h'_r , найденные по формуле (20), соответствуют потерям квадрата давления входа сети, соответствующего концу ветви с номером 1, плюс квадрат минимально допустимого давления на выходе сети, который соответствует началу хорды r .

Сравнивая полученные величины h'_r ($r \in K_2$), определим путь с максимальной потерей квадрата давления и выберем:

$$P_{lk}^2 = \max_r \{h'_r\} \quad (21)$$

Теперь, решая уравнения (16) относительно P_{rk} найдем минимально необходимые значения давлений на остальных входах сети.

Выбор рациональной структуры линейной части магистрального газопровода. Задача структурной оптимизации линейной части магистрального газопровода является задачей определения экстремума функции на множестве дискретных переменных. Обозначим левую часть равенства (4) $N_{str}(\bar{b})$, считая ее функцией структуры, которая определяется значениями компонент вектора $b_p = \{b_{p1}, \dots, b_{pw}\}$ (w – количество запорных задвижек сети). Тогда задачу поиска оптимальной структуры (4) можем записать как

$$N_{str}(\bar{b}) \rightarrow \min_{b_p} \quad (22)$$

$$b_{pi} = \{0, 1\}.$$

Для реальных сетей величина w достигает нескольких сотен, что исключает возможность простого перебора структур. В качестве задвижек, положение которых, необходимо определить, имеет смысл рассматривать те задвижки, которые подключают потребителей к той или иной магистрали газопровода, а также задвижки, открывающие переключки между магистралями. Положение остальных задвижек сети является очевидным еще до решения задачи. При таком подходе размерность, решаемой задачи существенно уменьшается, однако и в этом случае она остается достаточно большой.

Для решения задачи может быть использован алгоритм, в основе которого лежит один вариант поиска коллективом автоматов Буша-Мостеллера [9,10].

Пусть $\bar{\xi}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$ случайный булевский вектор, и пусть $x_i = P\{\xi_i = 1\}$. Тогда задаче (22) можно

поставить в соответствие следующую задачу: определить такое значение $\bar{x}^*$, для которого справедливо

$$y(\bar{x}^*) = \min_x N_{str}(\bar{\xi}) \quad (23)$$

$$\bar{x} = (x_1, \dots, x_w), \quad 0 \leq x_i \leq 1.$$

Зададим начальный вектор меры $\bar{x}^0 = (x_1^0, \dots, x_w^0)$, вектор шагов $\bar{h} = (h_1, \dots, h_w)$ и начальный вектор вероятностей направлений $\bar{p}^0 = (p_1^0, \dots, p_w^0)$.

Поиск состоит из последовательного построения мер $\bar{x}^k$, реализаций N_{str}^k , соответствующих этим мерам (по одной для каждого $\bar{x}^k$) и векторов $\bar{p}^k$ по формулам:

1. $\Delta x_i = \pm h_i$, где $P\{\Delta x_i = +h_i\} = p_i$;
2. $x_i^k = x_i^{k-1} + \Delta x_i^{k-1}$, причем при выходе x_i^k за интервал $[0,1]$, x_i^k туда возвращается симметричным отражением от точки 0 или 1;
3. $\xi_i^k = 0$ или 1, где $P\{\xi_i^k = 1\} = x_i^k$;
4. $N_{str}^k = N_{str}(\bar{\xi}^k)$;
5.
$$p_i^k = \begin{cases} p_i^{k-1}, & \text{если } S_i^k = \text{sign}[(\xi_i^k - \xi_i^{k-1})(N_{str}^k - N_{str}^{k-1})] = 0 \\ (1-\alpha)p_i^k, & \text{если } S_i^k = 1, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \\ (1-\alpha)p_i^k + \alpha, & \text{если } S_i^k = -1 \end{cases}$$

Специфика рассматриваемой задачи состоит в том, что $N_{str}(\bar{b}_p)$ задана алгоритмически.

Область T_d задается условием

$$\bigcup_{j=1}^r b_p^{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, w_1 \quad (24)$$

где b_p^{ij} задвижка, соединяющая i – го потребителя с j – ой магистралью; r – количество магистралей; w_1 – количество потребителей.

Поэтому рассматриваются только те $\bar{\xi}$, которые принадлежат области T_d .

Область распределения рациональных структур T_d^* мала по отношению к T_d . Эффективность алгоритма будет тем выше, чем более точно удастся выделить область рациональных структур T_d^* и организовать поиск $\bar{x}^*$ только в этой области. Априорно эта область неизвестна, однако можно получить некоторую оценку этой области путем анализа фактически используемых структур за достаточно большой промежуток времени.

Пусть в процессе оперативного управления на интервале времени $[0, T]$ диспетчер использовал M вариантов структур. Представим эту информацию в виде матрицы A размерности $M \times W$, каждая строка которой представляется соответствующим вектором $\bar{b}_p$.

При достаточно большом M получим оценки математического ожидания S_i ($i=1, \dots, w$) состояний каждой i -ой задвижки на интервале времени $[0, T]$.

$$S_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M A_{ji} \quad (25)$$

Если $S_i=1$ или $S_i=0$, то осуществляем их коррекцию:

$$S_i = \begin{cases} S_i + \varepsilon, & \text{если } S_i = 0 \\ S_i - \varepsilon, & \text{если } S_i = 1 \end{cases} \quad (26)$$

где ε – параметр расширения области.

Значения S_i используем для формирования начального вектора вероятностей направлений $\bar{p}^0$. Для повышения скорости сходимости алгоритма поиск $\bar{x}^*$ осуществляется одновременно только по некоторой части компонент вектора $\bar{x}$ при временной фиксации остальных.

Выводы. В работе дана математическая постановка задачи оптимизации локальной подсистемы магистрального газопровода. Показано, что данная задача имеет иерархическую структуру и сформулированы задачи каждого уровня иерархии. Разработан комплекс алгоритмов, позволяющий по заданным граничным условиям функционирования локальной подсистемы проводить выбор ее структуры и параметров функционирования ее активных элементов, минимизирующих энергозатраты на компримирование газа.

Список литературы:

1. Евдокимов, А. Г. Потокораспределение в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, В. В. Дубровский, А. Д. Тевяшев. – М.: Стройиздат, 1979. – 199 с.
2. Евдокимов, А. Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев. – Харьков: Вища школа, 1980. – 144 с.
3. Химко, М. П. Розрахунок параметрів газотранспортних систем [Текст] / М. П. Химко, В. Б. Коток, В. А. Павленко // Науково-виробничий журнал України Нафтова і газова промисловість. – 2006. – № 3. – С. 33–37.
4. Каминская, А. В. Численный анализ режимов работы газораспределительных сетей высокого давления [Текст] / А. В. Каминская, И. Г. Гусарова // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – № 3 (54). – С. 50–54.
5. Федоров, Н. В. Оптимизация технологических режимов работы локальных подсистем инженерной сети [Текст] / Н. В. Федоров, А. М. Хренов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2017. – № 19 (1241). – С. 107–113.
6. Тевяшев, А. Д. Об одном классе задач нестационарного неизотермического транспорта газа по ЛУ МГ [Текст] / А. Д. Тевяшев, В. Б. Коток, Е. Н. Выходцев, И. А. Пшеняник // Проблемы нефтегазовой промышленности. – 2006. – Вып. 3. – С. 302–314.
7. Гусарова, И. Г. Классы задач моделирования и численного анализа нестационарных режимов работы газотранспортной системы [Текст] / И. Г. Гусарова, Ю. В. Боярская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 3, № 6 (45). – С. 26–33. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2845/2649>
8. Тевяшев, А. Д. Об одной стратегии оптимизации режимов работы газотранспортных систем [Текст] / А. Д. Тевяшев, О. А. Тевяшева, В. С. Смирнова, В. А. Фролов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 4, № 3 (46). – С. 48–52. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2948/2751>
9. Дегтярев, Ю. И. Методы оптимизации [Текст] / Ю. И. Дегтярев. – М.: Сов. радио, 1980. – 272 с.
10. Короп, В. Ф. О рандомизации и решении оптимизационных задач с булевскими или целочисленными переменными [Текст] / В. Ф. Короп, А. Д. Тевяшев, Н. В. Федоров // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 1979. – Вып. 52. – С. 37–41.

Bibliography (transliterated):

1. Evdokimov, A. G., Dubrovskiy, V. V., Tevyashev, A. D. (1979). Potokoraspredelenie v inzhenernyh setyah. Moscow: Stroyizdat, 199.
2. Evdokimov, A. G., Tevyashev, A. D. (1980). Operativnoye upravleniye potokoraspredeleniem v inzhenernyh setyah. Kharkiv: Vishcha shkola, 144.
3. Khymko, M. P., Kotok, V. B., Pavlenko, V. A. (2006). Rozrakhunok parametriv hazotransportnykh system. Naukovovirobnychii zhurnal Ukrainy Naftova i gazova promyslovist, 3, 33–37.
4. Kaminskaya, A. V., Gusarova, I. G. (2011). Chislennyi analiz rezhimov raboty gazoraspredelitel'nykh setey vysokogo davleniya. Radioelektronika i informatika, 3 (54), 50–54.
5. Fedorov, N. V., Khrenov, A. M. (2017). Optimization of technological modes of operation of local subsystems of an engineering network. Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes, 19 (1241), 107–113.
6. Tevyashev, A. D., Kotok, V. B., Vyhodcev, E. N., Pshenyanik, I. A. (2006). Ob odnom klasse zadach nestacionarnogo neizotermicheskogo transporta gaza po LU MG. Problemy neftegazovoy promyshlennosti, 3, 302–314.
7. Gusarova, I. G., Boyarskaya, Yu. V. (2010). Classes of tasks of mathematical modelling and the numerical analysis of unstationary non-isothermal operating modes of gas-transport system and methods of their decision. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (6 (45)), 26–33. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2845/2649>
8. Tevyashev, A. D., Tevyasheva, O. A., Smirnova, V. S., Frolov, V. A. (2010). About one strategy of optimization of operating modes of gas-transport systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (3 (46)), 48–52. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2948/2751>
9. Degtyarev, Yu. I. (1980). Metody optimizatsii. Moscow: Sov. radio, 272.
10. Korop, V. F., Tevyashev, A. D., Fedorov, N. V. (1979). On the randomization and solution of optimization problems with Boolean or integer variables Automated Control Systems and Automation Devices, 52, 37–41.

Поступила (received) 10.07.2017

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Структурная и параметрическая оптимизация локальной подсистемы инженерной сети/ Федоров Н. В., Хренов А. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.48–52. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Структурна і параметрична оптимізація локальної підсистеми інженерної мережі/ Федоров М. В., Хренов О. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.48–52. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Structural and parametric optimization of the local subsystem of the engineering network/ Fedorov N., Khrenov A. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.48–52. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors

Федоров Микола Вікторович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри прикладної математики та інформаційних технологій; вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, Україна, 61204; e-mail: nickvief@gmail.com.

Федоров Николай Викторович, кандидат технических наук, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий; ул. Маршала Бажанова, 17, г. Харьков, Украина, 61204; e-mail: nickvief@gmail.com.

Fedorov Nikolaj – PhD, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, associate professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies; str., Marshal Bazhanov, 17, Kharkiv, Ukraine, 61204; E-mail: xrenov.aleksandr@ukr.net.

Хренов Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри прикладної математики та інформаційних технологій; вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, Україна, e-mail: xrenov.aleksandr@ukr.net.

Хренов Александр Михайлович, кандидат технических наук, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий; ул. Маршала Бажанова, 17, г. Харьков, Украина, 61204; e-mail: xrenov.aleksandr@ukr.net.

Khrenov Alexander – PhD, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, associate professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies; str., Marshal Bazhanov, 17, Kharkiv, Ukraine, 61204; E-mail: xrenov.aleksandr@ukr.net.

УДК 621.396

В. А. РОМАНЮК, О. В. ЖУК, Д. В. ТКАЧЕНКО

УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

У статті проведено аналіз методів управління витратами енергоресурсу вузлів, які використовуються в безпроводових сенсорних мережах. Проведена їх класифікація та запропоновано напрямки їх подальшого вдосконалення. Проведені дослідження показали, що застосування розглянутих методів дозволяє, в середньому, збільшити тривалість роботи мережі в 1, 5 ... 2 рази і зменшити середню потужність передачі на сайт ретрансляції на 10 %.

Ключові слова: безпроводні сенсорні мережі, методи управління витратами енергоресурсу вузлів.

В статье проведен анализ методов управления расходом энергоресурса узлов, используемых в беспроводных сенсорных сетях. Проведена их классификация и предложены направления их дальнейшего усовершенствования. Проведенные исследования показали, что применение рассмотренных методов позволяет в среднем увеличить продолжительность работы сети в 1, 5 ... 2 раза и снизить среднюю мощность передачи на место повторной передачи на 10 %.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, методы управления затратами энергоресурса узлов.

In the article the analysis of methods of energy resources management of nodes used in wireless sensory networks is carried out. Their classification has been carried out and directions of their further improvement are offered. The conducted studies have shown that the application of the considered methods allows, on average, to increase the duration of the network operation in 1, 5 ... 2 times and reduce the average transmission power per retransmission site by 10%. Synthesis of the optimal method for controlling the energy losses of nodes (or their aggregate) will be determined by the characteristics of a specific network and the decisions taken to implement other network management functions.

Keywords: wireless sensory networks, methods for controlling the cost of energy resources of nodes.

Вступ. Безпроводні сенсорні мережі (Wireless Sensor Network) – розподілені мережі, що складаються з маленьких вузлів (сенсорів), з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних. [1].

БСМ відносяться до класу радіомереж, що самоорганізуються [2]. Однак вони мають свої особливості: обмеженість ресурсів вузлів мережі (за пам'яттю, продуктивністю процесору, потужністю радіопередавача), мала

дальність та пропускна здатність каналів радіозв'язку між вузлами, концентрація трафіку навколо шлюзу тощо. Тип вузлів (стаціонарний, рухомий), кількість параметрів моніторингу, розмірність мережі, тип трафіка, організація управління (централізована, децентралізована або гібридна) залежить від призначення БСМ та її функцій.

В. А. Романюк, О. В. Жук, Д. В. Ткаченко. 2017

Електроживлення сенсорних вузлів у більшості випадків здійснюється від батарей (їх ємність визначає як параметри процесора, пам'яті, пристрою моніторингу так і потужність прийомопередавача) відпо-

відно до цього в системі управління БСМ виділена підсистема управління витратами енергоресурсу вузлів (рис. 1).

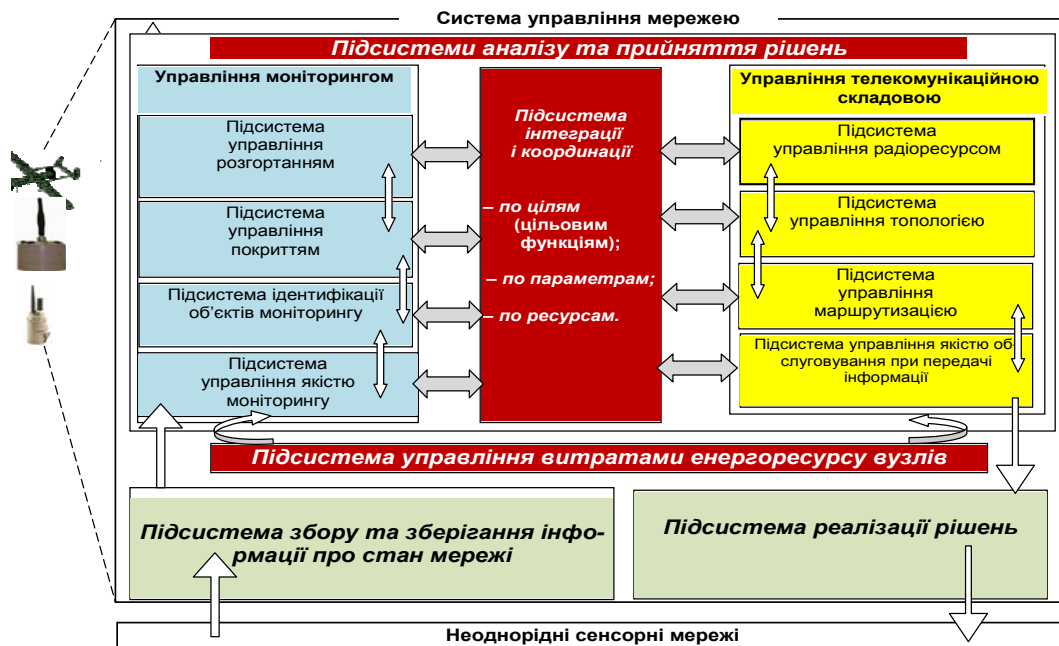


Рис. 1 – Функціональна модель системи управління БСМ

Управління втратами енергоресурсу вузлів – мінімізація споживаної енергії вузлами мережі (максимізація тривалості функціонування мережі $T_{\text{БСМ}}$ – часу роботи мережі до моменту відмови вузла через нульову ємність його батарей).

Управління витратами енергоресурсу вузлів може бути реалізоване за різними функціями управління і рівнями еталонної моделі взаємодії відкритих систем (фізичному, каналному, мережевому, прикладному) методами управління потужністю передачі і методами збереження енергії батарей (рис. 2).

Методи управління потужністю передачі. Зменшення потужностей передач між сусідніми вузлами. Зменшення потужностей передач між сусідніми вузлами із збереженням необхідних параметрів радіоканалу: необхідного рівня відношення сигнал/перешкода нормованого на біт $\text{SINR} = E_b / N_0$ (де E_b – енергія сигналу, N_0 – спектральна потужність шуму), вірогідність бітової помилки (BER) та ін. Кожен вузол зберігає „історію” сигналів, що приймаються, від сусідніх вузлів.

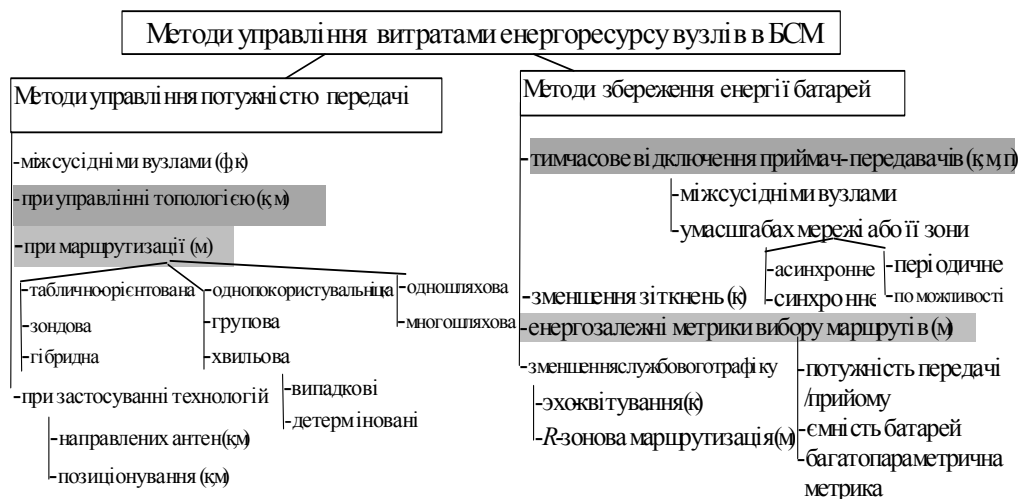


Рис. 2 – Методи управління витратами енергоресурсу вузлів (ф – фізичний, к – каналний, м – мережевий, п – прикладний рівні еталонної моделі OSI)

Нехай мережа являє собою N випадково розташованих вузлів, максимальна потужність передавача i -го вузла $P_i^{\max}$. Тоді для успішної передачі повідомлення від вузла i до j необхідно, щоб відношення SINR був більше певного порогу β , що визначає BER [3]

$$\text{SINR} = \frac{P_{ij} G_{ij}}{\sum_{k \neq j} P_{kj} G_{kj} + \eta_j} \geq \beta, \quad (1)$$

де $i, j, k \in N$, P_{ij} – потужність передачі i -го вузла, $G_{ij} = k_a F d_{ij}^{-\alpha}$ – величина загасання між вузлами $i-j$ (k_a – коефіцієнт, що враховує характеристики антен; F – множник ослаблення; d – відстань, $\alpha = 2 \dots 4$ – ступінь втрати потужності), η_j – спектральна потужність шуму приймача j -го вузла.

Цикл управління потужністю передачі схожий з регулюванням потужності, яка використовується в стільниковій мережі з кодовим розділенням каналів. Якщо рівень сигналу перевищує поріг, то потужність передачі зменшується. Якщо час очікування повідомлення для протоколу каналного рівня перевищений, то передача здійснюється з більшою потужністю. Регулювання потужності передачі в каналі (ij) здійснюється за наступним ітераційним правилом [3]

$$P_{ij}(n+1) = \min(P_i^{\max}, \frac{\beta}{\text{SINR}_{ij}(n)} P_{ij}(n)),$$

де n – номер ітерації.

Наприклад, протокол PCM (Power Control MAC) припускає, що відправник передає запит на передачу (RTS) і одержувач згоду (CTS) з однаковою потужністю, проте передача інформації (DATA) і квитанції (ACK) здійснюється мінімальною потужністю необхідною для безпомилкового прийому [4]. Хоча необхідно відзначити, що для уникнення можливих зіткнень в зоні виявлення під час передачі DATA потужність передачі збільшується до максимального значення. Результати моделювання показали, що регулювання потужності передачі дозволяє зменшити витрати енергії на 10–20 % при збільшенні пропускної спроможності до 15 % [4].

б). *При управлінні топологією сенсорної мережі.* Управління топологією припускає перерозподіли потужностей передач вузлів P_i і/або спрямованості їх антен γ_i [5, 6]. Збільшення потужностей передач вузлів приводить до збільшення вірогідності успішної передачі пакетів (за рахунок збільшення SINR), скорочення часу їх доставки і об'єму службової маршрутною інформації (унаслідок зменшення діаметру мережі), проте вимагає більшої витрати енергії батарей і визначає високий рівень взаємних перешкод (що призводить до різкого зниження пропускної спроможності мережі). Зменшення потужності передачі дозволяє зменшити витрати енергії, збільшити пропускну спроможність мережі

(за рахунок просторового рознесення каналів і зниження рівня взаємних перешкод), але приводить до збільшення часу доставки повідомлення і об'єму службового трафіку.

Однією з множини цілей управління топологією $Z_k, k = \overline{1, K}$ є мінімізація потужностей передач вузлами мережі із збереженням її зв'язності і заданого рівня SINR [4]

$$\min_{P_{ij}} \sum_{\forall i, j} P_{ij}, \forall \text{ SINR}_{ij} > \beta, i, j \in N, i \neq j.$$

Реально це полягає в колективній роботі вузлів за погодженням кількості сусідів за певними критеріями. Запропоновано ряд децентралізованих алгоритмів побудови енергоефективної топології BPS (planar power efficient structure) [7], COMPOW (COMmon POWer) [8] і др.

Наприклад, протокол BSP, використовуючи систему позиціонування, будує планарний граф, що має мінімальну сумарну потужність передачі за всіма маршрутами мережі. Протокол COMPOW припускає оптимізацію загальної потужності передачі в мережі за допомогою зміни її зв'язності (менша потужність передачі – менша зв'язність). У [8] аналітично доведено, що оптимізація пропускної спроможності вузла $O(1/\sqrt{n \log n})$ досягається при потужності передачі вузла, яка визначається верхньою межею $O(1/\sqrt{n})$.

в). *При маршрутизації.* Завданням методу маршрутизації є створення, зберігання і підтримання маршруту(ів) заданої якості між відправником і адресатом. У якості критерію оцінки маршруту можуть виступати наступні параметри: енергоємність батарей, ширина смуги пропускання каналу, час затримки передачі пакетів у мережі та ін. Аналіз методів маршрутизації наведено в четвертому розділі.

г). *При застосуванні направлених антен і системи позиціонування* [7]. Застосування направлених антен і системи позиціонування дозволяє знизити рівень взаємних перешкод і збільшити енергетику радіоканалів (при цьому зменшення потужності, що витрачається, може досягати 60 %).

Методи збереження енергії батарей сенсорних вузлів.

а). *Тимчасове відключення приймача-передавача вузла* (так званий пасивний режим або режим „сон”). Для сучасних бездротових карт зменшення потужності, що витрачається, при різних режимах роботи вузла сягає 95 % (наприклад, для Lucent IEEE 802.11 WarePC Card витрата енергії для режимів “сон”/пошук/прийм/передача складає 0,06:0,84:0,97:1,33 Вт [9]). Необхідно відзначити, що пасивний режим вже стандартизований для повнозв'язних (кожен з кожним) безпроводних мереж в протоколі IEEE 802.11 PCF (Power Save Mode).

Децентралізований протокол PAMAS (Power Aware Multiple-Access Protocol) [10], який реалізує пасивний режим між сусідніми вузлами, полягає в наступному. Вузол, виявивши, що передаваний пакет

призначений не йому, відключається на час передачі даного пакету, що повідомляється в його заголовок. Даний протокол ефективний при високому трафіку і щільності вузлів (дозволяє зменшити витрату енергоресурсу 10–50 %) і менш ефективний у високошвидкісних мережах (через малий час передачі повідомлень виграш в застосуванні пасивного режиму зменшується за рахунок частого перемикавання режимів). Окрім цього його недоліками є: наявність окремого управляючого каналу для передачі службової інформації, а також непередбачуваність затримки передачі інформації.

б). *Тимчасове відключення приймачів-передавачів* сенсорних вузлів. Тимчасове відключення приймачів-передавач вузлів в масштабах мережі або її зони може здійснюватися: синхронно або асинхронно, періодично або за можливістю.

Синхронний пасивний режим. Припускає глобальну синхронізацію вузлів мережі. Синхронізація відключення вузлів може бути здійснена поєднанням із зондовою маршрутизацією (хвильовою розсилкою управляючої інформації, наприклад, протокол Puls [11]) або кластеризацією мережі (розбиттям мережі на зони з виділенням головних вузлів зони з привласненням їм функцій управління). Наприклад, протокол GAF (Geographical Adaptive Fidelity), що припускає використання системи позиціонування, розбиває мережу на географічні квадрати з виділенням головних вузлів, керуючих режимами вузлів в кожному квадраті [12]. Недоліками даного методу є: необхідність фази синхронізації (що досить проблематично в умовах динамічної мережі), а також додатковий службовий трафік і можливість затримки передачі даних. Окрім цього, фаза синхронізації пасивного режиму відрізняється від завдання тимчасової синхронізації мережі, яка може бути здійснена при використанні устаткування позиціонування (GPS- приймачів).

Асинхронний режим. Може бути реалізований незалежно кожним вузлом мережі з узгодженням часу відключення з сусідніми вузлами. Його недоліком є значний вплив на етапі побудови маршруту і час доставки пакету.

в). *Зменшення числа повторних передач*, викликаних зіткненнями пакетів. Зменшення числа повторних передач, викликаних зіткненнями пакетів, тобто методи каналного доступу, що забезпечують мінімум зіткнень пакетів, зменшують енергію, що витрачається. Тому методи часового розділення каналів (TDMA) або навіть гібридні (TDMA/CDMA) з погляду енергозбереження, кращі за методи випадкового доступу.

г). *Вибір маршрутів за метриками*, що враховують витрату енергоресурсу вузлів при передачі/прийомі повідомлень і/або місткість батарей [13, 15].

Для зменшення витрат енергії батарей при побудові маршрутів можуть бути використані різні енергозберігаючі метрики: потужність, що витрачається на передачу (прийом); місткість батарей вузлів; багато-параметрична метрика (потужність передачі вузлів, смність батарей) та ін.

1. Метрика – потужність, що витрачається на передачу/ прийом вузла. Ідея даного методу полягає в наступному: залежність необхідної потужності передачі від відстані носить нелінійний характер і отже маршрут, що складається з декількох „коротких” ретрансляцій, витрачає менше енергії, ніж з „довгих” – $P_{ab} > P_{ac} + P_{cd}$ (рис. 3). Тому в якості метрики вартості радіоканалу C_{ij} можна використовувати мінімальний рівень потужності передачі $P_{ij}^{\min}$ між вузлами i та j , що забезпечує задане значення вірогідності бітової помилки (1).

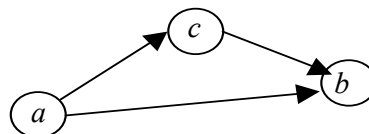


Рис. 3 – Приклад мережі

Окрім цього C_{ij} повинна враховувати потужність $P^{\text{по}}$, що витрачається на прийом і обробку повідомлень (зокрема службових, наприклад, для протоколу випадкового доступу – це пакети „запит на передачу” CTS, „згода” RTS, „квитанція” ACK), а також їх розмір L :

$$C_{ij}^p = (P_{ij}^{\min} + P_j^{\text{по}}) (L_c + L_{\text{CTS}}) + (P_{ji}^{\min} + P_i^{\text{по}}) (L_{\text{ACK}} + L_{\text{RTS}}), j \in N_i. \quad (2)$$

Тоді загальна вартість C_m^p передачі за маршрутом m визначається як

$$C_m^p = \sum_{i=1}^{r-1} C_{ij}^p, \forall i, j \in m, i \neq j, j \in N_i,$$

де r – число вузлів в маршруті m . Тому маршрут m_{ab}^* з мінімальною потужністю передачі/прийому між відправником a і адресатом b визначається

$$m_{ab}^* = \arg \min_{m \in M_{ab}} C_m^p,$$

де M_{ab} – множина всіх можливих маршрутів між a і b .

Проте, оскільки потужність передачі залежить від відстані ($d^{-\alpha}$), то запропонований метод вибиратиме маршрут з великим числом ретрансляцій (в порівнянні з критерієм мінімуму ретрансляцій). Це приведе до збільшення: часу доставки пакету, кількості зіткнень (для протоколів випадкового доступу), об'єму службового трафіку і вірогідності нестабільності маршруту (через переміщення вузлів). Тобто використання даної метрики доцільне у разі значної різниці витрати енергії при режимах передача/прийм. Можливим рішенням також є обмеження кількості ретрансляцій граничним

значенням $r^{\max}$, яке може бути визначене на етапі проектування мережі.

2. Метрика – ємність батарей вузлів. Маршрутизація з використанням метрики (2) дозволяє зменшити енергоспоживання вузлів, проте вона не враховує їх енергетичні можливості. Нехай e_i^t – величина ємності батареї i -го вузла у момент часу t . Визначимо $f_i(e_i^t) = 1/e_i^t = 0, \dots, 100$, як функцію вартості ємності його батареї (зменшення ємності – збільшення вартості). Вартість ємності батарей для маршруту m , що складається з r вузлів, визначається

$$C_m^e = \sum_{i=1}^{r-1} f_i(e_i^t), \forall i \in m. \quad (3)$$

Тоді для знаходження між вузлами $a-b$ маршруту з максимальною ємністю батарей m_{ab}^* необхідно обчислити

$$m_{ab}^* = \arg \min_{m \in M_{ab}} C_m^e = \arg \min_{m \in M_{ab}} \sum_{i=1}^{r-1} f_i(e_i^t),$$

де M_{ab} – множина всіх можливих маршрутів між вузлами a та b .

3. Багатопараметрична метрика – потужність передачі вузлів, ємність батарей та ін. Недоліком розглянутої метрики (3) є те, що підсумовування вартостей вузлів не дозволяє відстежити їх критичні ємності. Наприклад, на рис. 4 показано два можливі маршрути між відправником і адресатом. Хоча вузол 3 і має найменшу ємність батареї, але загальна вартість першого маршруту менша другого ($80 < 90$) і, відповідно, для маршрутизації пакетів буде вибраний перший маршрут.

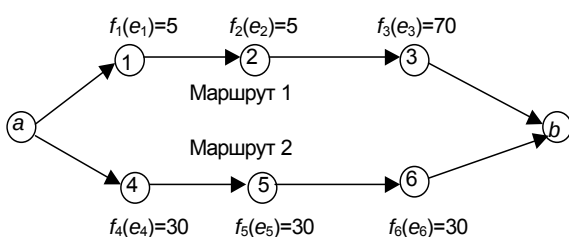


Рис. 4 – Приклад мережі

Тому вартість маршруту m можна визначити як мінімальна ємність батареї вузла (максимальна вартість) у даному маршруті

$$C_m^e = \max_{i \in m} f_i(e_i^t). \quad (4)$$

Проте (4) не гарантує отримання маршруту з мінімальною потужністю передачі. Позначимо M_{ab}^e – множина всіх маршрутів між відправником a і адресатом b , що задовольняють наступній умові: всі вузли у момент часу t мають вартість ємності

батарей більшу за допустиме значення $f_i(e_i^t) \geq f_i(e_0^t)$.

Отримати згортку метрик (за потужністю передачі і ємністю батарей) через їх різноманітність важко, тому, залежно від величини ємності батарей вузлів, вибір маршруту необхідно здійснювати за однією з метрик

$$m_{ab}^* = \begin{cases} \arg \min_{m \in M_{ab}} \sum_{i=1}^{r-1} C_{ij}^p, & \text{якщо } M_{ab}^e \neq \emptyset \\ \arg \min_{m \in M_{ab}} (\max_{i \in m} f_i(e_i^t)), & \text{в інших випадках} \end{cases}$$

де $i, j \in m$, $i \neq j$, $j \in N_i$ – сусіди вузла i . При функціонуванні мережі величина порогу $f_i(e_0^t) = 0 \dots 100$ повинна поступово зменшуватися для встановлення балансу ємностей батарей у вузлах мережі.

Аналіз існуючих методів управління втратами енергоресурсу вузлів на мережевому рівні показав, що їхнє використання в БСМ характеризується рядом недоліків: використання однієї метрики пошуку маршруту, неможливість роботи з різними типами трафіка, високі вимоги до апаратних ресурсів та ін.

д). Зменшення службового трафіку за рахунок зменшення числа службових повідомлень:

на каналному рівні – виключення частини службових повідомлень RTS, CTS або ACK, наприклад, застосування ехо-квітування (вузол, що передає пакет, „чує” його ретрансляцію сусідом [15]).

на мережевому рівні – застосування R -зонного гібридного методу маршрутизації, що акумулює достоїнства двох основних методів побудови маршрутів (табличного і зондового). Даний метод припускає виділення кожним i -м вузлом так званої маршрутною R_i -зони, де R – кількість ретрансляцій [16]. Побудова маршрутів всередині R_i здійснюється табличним способом (обмін службовою інформацією періодичний і за подіями), а за її межами – зондовим (в міру необхідності за наявності трафіка). Адаптація розмірів R_i до ситуації на мережі дозволить мінімізувати об'єм службового трафіку і тим самим зменшити витрату енергоресурсу [17].

ВИСНОВОК. Проведений вище аналіз показав, що, управління витратами енергоресурсу вузлів повинне здійснюватися за функціями управління на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем. Проведені дослідження показали, що застосування розглянутих методів дозволяє в середньому збільшити тривалість функціонування мережі в 1, 5...2 рази і зменшити середню потужність передачі на одну ділянку ретрансляції на 10%. Синтез оптимального методу управління втратами енергоресурсу вузлів (або їх сукупності) визначатиметься характеристиками конкретної мережі і ухваленими рішеннями з реалізації інших функцій управління мережею.

Список літератури:

1. Жук, О. В. Методологічні основи управління перспективними неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами тактичної ланки управління військами [Текст]: IX наук.-практ. конф. / О. В. Жук, В. А. Романюк, О. Я. Сова // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. – К.: ВПІ НТУУ „КПІ”, 2016. – С. 34–44.
2. Жук, О. В. Архітектура системи управління мережами MANET [Текст]: V Міжнар. наук.-тех. конф. / О. В. Жук, О. Я. Сова, В. А. Романюк // Проблеми телекомунікацій – 2011. – К.: ІТС НТУУ „КПІ”, 2011. – С. 77.
3. ElBatt, T. Joint Scheduling and Power Control for Wireless Ad Hoc Networks [Text] / T. ElBatt, A. Ephremides // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2004. – Vol. 3, Issue 1. – P. 74–85. doi: [10.1109/twc.2003.819032](https://doi.org/10.1109/twc.2003.819032)
4. Jung, E.-S. A power control MAC protocol for ad hoc networks [Text] / E.-S. Jung, N. H. Vaidya // Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking – MobiCom '02. – 2002. doi: [10.1145/570649.570651](https://doi.org/10.1145/570649.570651)
5. Миночкин, А. И. Управление топологией мобильной радиосети [Текст] / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 28–33.
6. Song, W.-Z. Localized algorithms for energy efficient topology in wireless ad hoc networks [Text] / W.-Z. Song, Y. Wang, X.-Y. Li // Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing – MobiHoc '04. – 2004. doi: [10.1145/989459.989473](https://doi.org/10.1145/989459.989473)
7. Nasipuri, A. Power consumption and throughput in mobile ad hoc networks using directional antennas [Text] / A. Nasipuri, K. Li, U. R. Sappidi // Proceedings. Eleventh International Conference on Computer Communications and Networks. – 2002. doi: [10.1109/iccnn.2002.1043137](https://doi.org/10.1109/iccnn.2002.1043137)
8. Narayanaswamy, S. Power control in ad-hoc networks: Theory. Architecture, algorithm and implementation of the COMROW protocol [Text] / S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. S. Sreenivas, P. R. Kumar // In Proceedings of EuroWireless'02. – 2002. – P. 156–162.
9. Feeney, L. M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment [Text] / L. M. Feeney, M. Nilsson // Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No.01CH37213). – 2001. doi: [10.1109/infcom.2001.916651](https://doi.org/10.1109/infcom.2001.916651)
10. Singh, S. PAMAS – power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks [Text] / S. Singh, C. S. Raghavendra // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 1998. – Vol. 28, Issue 3. – P. 5–26. doi: [10.1145/293927.293928](https://doi.org/10.1145/293927.293928)
11. Awerbuch, B. The pulse protocol: energy efficient infrastructure access [Text] / B. Awerbuch, D. Holmer, H. Rubens // IEEE INFOCOM 2004. – 2004. doi: [10.1109/infcom.2004.1357031](https://doi.org/10.1109/infcom.2004.1357031)
12. Heinzelman, W. R. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks [Text] / W. R. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan // Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking – MobiCom '99. – 1999. doi: [10.1145/313451.313529](https://doi.org/10.1145/313451.313529)
13. Toh, C.-K. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks [Text] / C.-K. Toh // IEEE Communications Magazine. – 2001. – Vol. 39, Issue 6. – P. 138–147. doi: [10.1109/35.925682](https://doi.org/10.1109/35.925682)
14. Zhu, J. A comprehensive minimum energy routing scheme for wireless ad hoc networks [Text] / J. Zhu, C. Qiao, X. Wang // IEEE INFOCOM 2004. – 2004. doi: [10.1109/infcom.2004.1357028](https://doi.org/10.1109/infcom.2004.1357028)
15. Миночкин, А. И. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях [Текст] / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок. – 2004. – № 2. – С. 46–50.
16. Романюк, В. А. R-зонный метод маршрутизації в автоматизованих мережах радіозв'язку [Текст] / В. А. Романюк // Збірник наукових праць КВІУЗ. – 2001. – № 3. – С. 182–186.
17. Миночкин, А. И. Методология оперативного управления мобильными радиосетями [Текст] / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53–58.

Bibliography (transliterated):

1. Zhuk, O. V., Romaniuk, V. A., Sova, O. Ya. (2016). Metodolohichni osnovy upravlinnia perspektyvnymy neodnorodnymy bezprovodovymy sensorynymy merezhamy taktychnoi lanky upravlinnia viiskamy. Priorytetni napriamky rozvytku telekomunikatsiinykh system ta merezh spetsialnoho pryznachennia. Kyiv: VITI NTUU „KPI”, 34–44.
2. Zhuk, O. V., Sova, O. Ya., Romaniuk, V. A. (2011). Arkhitektura systemy upravlinnia merezhamy MANET. Problemy telekomunikatsii – 2011. Kyiv: ITS NTUU „KPI”, 77.
3. ElBatt, T., Ephremides, A. (2004). Joint Scheduling and Power Control for Wireless Ad Hoc Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 3 (1), 74–85. doi: [10.1109/twc.2003.819032](https://doi.org/10.1109/twc.2003.819032)
4. Jung, E.-S., Vaidya, N. H. (2002). A power control MAC protocol for ad hoc networks. Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking – MobiCom '02. doi: [10.1145/570649.570651](https://doi.org/10.1145/570649.570651)
5. Minochkin, A. I., Romanyuk, V. A. (2003). Upravlenie topologией mobil'noy radioseti. Zv'yazok, 2, 28–33.
6. Song, W.-Z., Wang, Y., Li, X.-Y. (2004). Localized algorithms for energy efficient topology in wireless ad hoc networks. Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing – MobiHoc '04. doi: [10.1145/989459.989473](https://doi.org/10.1145/989459.989473)
7. Nasipuri, A., Li, K., Sappidi, U. R. (2002). Power consumption and throughput in mobile ad hoc networks using directional antennas. Proceedings. Eleventh International Conference on Computer Communications and Networks. doi: [10.1109/iccnn.2002.1043137](https://doi.org/10.1109/iccnn.2002.1043137)
8. Narayanaswamy, S., Kawadia, V., Sreenivas, R. S., Kumar, P. R. (2002). Power control in ad-hoc networks: Theory. Architecture, algorithm and implementation of the COMROW protocol. In Proceedings of EuroWireless'02, 156–162.
9. Feeney, L. M., Nilsson, M. (2001). Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No.01CH37213). doi: [10.1109/infcom.2001.916651](https://doi.org/10.1109/infcom.2001.916651)
10. Singh, S., Raghavendra, C. S. (1998). PAMAS – power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 28 (3), 5–26. doi: [10.1145/293927.293928](https://doi.org/10.1145/293927.293928)
11. Awerbuch, B., Holmer, D., Rubens, H. (2004). The pulse protocol: energy efficient infrastructure access. IEEE INFOCOM 2004. doi: [10.1109/infcom.2004.1357031](https://doi.org/10.1109/infcom.2004.1357031)
12. Heinzelman, W. R., Kulik, J., Balakrishnan, H. (1999). Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking – MobiCom '99. doi: [10.1145/313451.313529](https://doi.org/10.1145/313451.313529)
13. Toh, C.-K. (2001). Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks. IEEE Communications Magazine, 39 (6), 138–147. doi: [10.1109/35.925682](https://doi.org/10.1109/35.925682)
14. Zhu, J., Qiao, C., Wang, X. (2004). A comprehensive minimum energy routing scheme for wireless ad hoc networks. IEEE INFOCOM 2004. doi: [10.1109/infcom.2004.1357028](https://doi.org/10.1109/infcom.2004.1357028)
15. Minochkin, A. I., Romanyuk, V. A. (2004). Metody mnozhestvennogo dostupa v mobil'nykh radiosetях. Zviazok, 2, 46–50.
16. Romaniuk, V. A. (2001). R-zonovyi metod marshrutyzatsii v avtomatyzovanykh merezhakh radiozviazku. Zbirnyk naukovykh prats KVIUZ, 3, 182–186.
17. Minochkin, A. I., Romanyuk, V. A. (2005). Metodologiya operativnogo upravleniya mobil'nymi radioset'yami. Zviazok, 2, 53–58.

Надійшла (received) 07.07.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Управління енергоспоживанням в безпроводових сенсорних мережах/ Романюк В. А., Жук О. В., Ткаченко Д. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.53–59. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Управление энергоспоживанням в беспроводных сенсорных сетях/ Романюк В. А., Жук А. В., Ткаченко Д. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.53–59. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Power management in wireless sensor networks/ Romaniuk V., Zhuk O., Tkachenko D. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.53–59. – Bibliogr.:17. – ISSN 2079-545

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Романюк Валерій Антонович – Доктор технічних наук, професор, Заступник начальника Військового інституту телекомунікацій та інформатизації з наукової роботи, вул. Московська, м. Київ, 45/1, Україна, 01011, E-mail: romval2016@gmail.com.

Жук Олександр Володимирович – Кандидат технічних наук, доцент, Докторант науково-організаційного відділу Військового інституту телекомунікацій та інформатизації. вул. Московська, м. Київ, 45/1, Україна, 01011, E-mail: beatle135@ukr.net.

Ткаченко Дмитро Віталійович – Начальник кафедри військової підготовки Військового інституту телекомунікацій та інформатизації, вул. Московська, м. Київ, 45/1, Україна, 01011, E-mail: tkachenkodv9@gmail.com.

Романюк Валерій Антонович – доктор технических наук, профессор, заместитель начальника Военного института телекоммуникаций и информатизации по научной работе, ул. Московская, м. Киев, 45/1, Украина, 01011, E-mail: romval2016@gmail.com.

Жук Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, докторант научно-организационного отдела Военного института телекоммуникаций и информатизации. ул. Московская, м. Киев, 45/1, Украина, 01011, E-mail: beatle135@ukr.net.

Ткаченко Дмитрий Витальевич – начальник кафедры военной подготовки Военного института телекоммуникаций и информатизации, ул. Московская, м. Киев, 45/1, Украина, 01011, E-mail: tkachenkodv9@gmail.com.

Romaniuk Valeriy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Military Institute of Telecommunications and Informatization on Scientific Work, Moscow str., Kyiv, 45/1, Ukraine, 01011, E-mail: romval2016@gmail.com.

Zhuk Oleksandr – PhD, Associate Professor, Doctorate in the scientific-organizational department of the Military Institute of Telecommunications and Informatization, Moscow str., Kyiv, 45/1, Ukraine, 01011, E-mail: beatle135@ukr.net.

Tkachenko Dmitry – Head of Department of Military Training of the Military Institute of Telecommunications and Informatization, Moscow str., Kiev, 45/1, Ukraine, 01011

Ю. Е. МЕГЕЛЬ, В. П. ПУТЯТИН, Д. А. ЛЕВКИН, А. В. ЛЕВКИН

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА МНОГОСЛОЙНЫЕ БИОМАТЕРИАЛЫ

В статье приведена содержательная постановка основной оптимизационной задачи поиска рациональных значений основных параметров действия лазерного луча на многослойный биоматериал, с учетом ограничений на результирующее температурное поле биоматериала для осуществления его деления и обеспечения жизнеспособности. Осуществлена формализация и систематизация прикладных задач оптимизации, являющихся частными случаями основной оптимизационной задачи, рассмотрены соответствующие им математические модели. Это позволило, обосновано осуществить выбор методов их численной реализации.

Ключевые слова: основная оптимизационная задача, деление, формализация, систематизация, прикладные задачи, математические модели.

В статті наведена змістовна постановка основної оптимізаційної задачі пошуку раціональних значень основних параметрів дії лазерного променя на багатослойовий біоматеріал з урахуванням обмежень на результирує температурне поле біоматеріала задля здійснення його ділення. Здійснена формалізація і систематизація прикладних задач оптимізації, які є частковими випадками основної оптимізаційної задачі, розглянуті відповідні їм математичні моделі. Це дозволило обґрунтовано здійснити вибір методів їх чисельної реалізації.

Ключові слова: основна оптимізаційна задача, ділення, формалізація, систематизація, прикладні задачі, математичні моделі.

Optimization problem of laser beam effect on multilayered biomaterial with complex spatial for has been observed in this article in order to ensure its division according to limitations on the resulting thermal field and viability of the biomaterial. To do so the authors have formulated the main conceptual optimization problem statement for searching the reasonable values of basic laser parameters effected on the biomaterial. Formalization and systematization of the applied optimization problems have been performed, which are the particular cases of the main optimization problem. The article depicts four mathematical model samples of applied optimization.

It should be noted that the state of the object under research (multilayered biomaterial effected by a laser beam) is described via boundary-value problem in a general form. The boundary-value problem is stated for the system of non-stationary heterogeneous multidimensional differential equations of thermal conductivity in partial derivatives. To obtain the objective function (thermal field) included in the problem statement of applied mathematical optimization models, solution of a series of boundary-value problems is needed to be performed multiple times during the modeling process. This specificity significantly complicates the process of corresponding mathematical model formulation for laser beam parameters effected multilayered biomaterials as well as its application aiming at increasing the quality of biotechnological process of the biomaterial division.

The novelty of the aforementioned applied mathematical optimization models consists in the fact that thermal fields of the biological objects are represented in accordance with the characteristics of a discrete moving laser beam. With this, along with the standalone importance of the applied problems, they are also used for the solution of the main optimization problem. The analysis of the proposed mathematical models provides information needed for reasonable selection of methods for numerical model implementation.

The results obtained in this article enable modeling process automation to effect laser beam on multilayered biological material in order to increase quality of biotechnological process of the biomaterial division.

Keywords: main optimization problem, division, formalization, systematization, applied problems, mathematical models.

Введение. Основной трудностью при параметризации температурных полей многослойного биоматериала является получение аналитического (приближенно-аналитического) или алгоритмического (численного) представления решения краевой задачи в зависимости от изменяемых (в процессе синтеза системы) параметров, входящих в постановку исходных краевых задач.

В том случае, когда имеется аналитическое решение краевой задачи, куда органически входят искомые параметры, можно исключить затратный по времени процесс решения серии однотипных краевых задач. Такие аналитические решения, к сожалению, имеются только для классических областей (отрезок, окружность, круг, шар, сфера и др.).

Отметим, что рассмотрение всякой новой краевой задачи, описывающей температурное поле в рассматриваемой системе, требует преодоления сложностей, связанных с этапом параметризации поля. Существующие немногочисленные математические модели задач расчёта и оптимизации параметров действия лазерного излучения на многослойные биологические материалы рассматривались ранее по принципу: математическая модель под частную задачу. При этом математическим моделям оптимизации параметров действия лазерного излучения посвящено относительно мало работ и связано это, прежде всего,

с необходимостью решения специфических, многомерных, многоэкстремальных задач.

В связи с этим, актуальной научной задачей является усовершенствовать математическую модель основной оптимизационной задачи с учетом ограничений на результирующее температурное поле биоматериала для обеспечения жизнеспособности сегментируемых частей. С этой целью рассмотрена содержательная постановка основной оптимизационной задачи, осуществлена формализация и систематизация прикладных задач оптимизации, которые являются частными случаями основной оптимизационной задачи. Полученные в статье основные результаты являются дальнейшим развитием методов математического моделирования задач оптимизации параметров действия лазерного луча на многослойные биоматериалы, рассмотренных в работе [1].

Анализ литературных данных. Ряд аспектов отмеченной задачи исследовались в работах [2–10].

В монографиях [3, 4] проведён обширный анализ научных исследований, касающихся вопросов оптимизации теплофизических, механических, экологических, гидродинамических, электротехнических и других систем, содержащих подвижные локальные источники соответствующих физических полей. Однако, в работах [3, 4] вопросы оптимизации теплофизических процессов в многослойных микробиологиче-

ских системах, с учётом локального лазерного воздействия, не рассматривались.

В фундаментальной работе [6] дан обзор большого числа научных публикаций, касающихся решения задач расчёта и оптимизации многослойных механических конструкций (пластин и оболочек), подвергаемых импульсным, ударным и нестационарным температурным нагрузкам. Однако, специфика рассматриваемых в данной работе задач такова, что воспользоваться результатами работы [6] невозможно из-за особенностей параметров рассматриваемого источника воздействия (лазерного луча) на многослойную микробиологическую систему.

В работах [8, 9] авторами приведен обзор существующих методик технологии рассечения зоны пеллюцида эмбриона (хетчинг), применяемой для обеспечения процесса отделения зародышей. Однако, для уменьшения травмируемости зоны пеллюцида и зародышей, необходима постановка и решение задачи оптимизации действия лазерного луча на эмбрион.

Постановка основной оптимизационной задачи. Суть содержательной постановки основной оптимизационной задачи состоит в следующем.

Предложить принципы построения расчётных и оптимизационных математических моделей, а так же численных методов и специализированных вычислительных средств, позволяющих осуществить:

– оптимизацию параметров действия лазерного луча на многослойный микробиологический материал с учётом ограничений на результирующее температурное поле материала и обеспечением жизнеспособности сегментов микробиологического материала;

– автоматизацию процесса моделирования действия лазерного луча на многослойный микробиологический материал с целью повышения качества технологического процесса деления микробиоматериала.

В наиболее общем случае рассматриваемая нами система «микробиоматериал-лазер» представляет собой ограниченную многослойную область $\Omega \in R^3$, на которую действует лазерное излучение F с областью носителя L в виде пятна заданного радиуса.

Температурное поле в N -слойной области Ω , порождаемое источником излучения F и окружающей средой, в общем случае описывается краевой задачей:

$$AT = F \quad (1)$$

$$B_j T = b_j, \quad (2)$$

где A – заданный дифференциальный оператор в частных производных; $T = T(x, y, z, t)$ – температурное поле; (x, y, z) – пространственные переменные; t – время действия лазерного луча на многослойный (N -слойный) микробиологический материал; F – функция, характеризующая пространственно-временное распределение теплового воздействия и имеющая вид

$$F = \begin{cases} F(x, y, z, t, u, E, s(t), v(t), Q(x, y, z, t), S), & (x, y, z) \in L; \\ 0, & (x, y, z) \notin L, \end{cases} \quad (3)$$

где u – интенсивность источника лазерного луча, т.е. пятна; E – энергия теплового воздействия; $s(t)$ – траектория движения лазерного источника; $v(t)$ – скорость движения лазерного источника; $Q(x, y, z, t)$ – плотность теплового воздействия; S – диаметр лазерного источника, т.е. пятна; L – носитель теплового воздействия; B_j – заданные операторы, характеризующие граничные условия, начальные условия и условия сопряжения на границах области Ω , $j = 1, \dots, N$ – слоев; b_j – заданные функции.

В общем случае температурное поле $T(x, y, z, t)$ микробиоматериала Ω , при действии на него лазерного луча F , зависит от искомым параметров лазера и представляется в виде следующей зависимости:

$$T = T(x, y, z, t, u, E, s(t), v(t), Q(x, y, z, t), S). \quad (4)$$

Вектор параметров лазерного воздействия z^*

$$z^* = (x, y, z, t, u, E, s(t), v(t), Q(x, y, z, t), S). \quad (5)$$

Ограничения на характер распределения температурного поля в области Ω^* многослойного (N -слойного) микробиологического материала Ω , в общем случае будут иметь следующий вид:

$$G_i T(x, y, z, t, z^*)|_{\Omega^*} \leq (\geq) T_i^*, \quad i = 1, \dots, N, \quad (6)$$

где G_i – некоторый заданный оператор; $T(x, y, z, t, z^*)$ – температурное поле; $(x, y, z) \in \Omega^*$ – область многослойного (N -слойного) микробиоматериала Ω ; t_0 – начальный момент времени t ; t^* – конечный момент времени t ; T_i^* – допустимые значения температурного поля.

В свою очередь, на пределы изменения параметров теплового воздействия на многослойный микробиологический материал накладываются следующие ограничения.

Ограничение на размер области многослойного микробиологического материала Ω :

$$\begin{cases} x_{\min} \leq x \leq x_{\max}; \\ y_{\min} \leq y \leq y_{\max}; \\ z_{\min} \leq z \leq z_{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Ограничение на длительность действия лазерного луча t :

$$t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (8)$$

где $t_{\min}$ – минимальная длительность действия лазерного луча на многослойный (N -слойный) микробиологический материал; $t_{\max}$ – максимальная

длительность действия лазерного луча на многослойный (N -слойный) микробиологический материал.

Ограничение на интенсивность источника $t \in [1; 3]$:

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \quad (9)$$

где $u_{\min}$ – минимальное значение интенсивности; $u_{\max}$ – максимальное значение интенсивности.

Ограничение на энергию E теплового воздействия:

$$E_{\min} \leq E \leq E_{\max}, \quad (10)$$

где $E_{\min}$ – минимальное значение энергии теплового воздействия; $E_{\max}$ – максимальное значение энергии теплового воздействия.

При этом, для расчета энергии действия лазерного луча на многослойный (N -слойный) микробиологический материал воспользуемся следующей формулой:

$$E = Wt. \quad (11)$$

В формуле (11) W – это мощность действия лазерного луча на многослойный (N -слойный) микробиологический материал, а t – длительность действия лазерного луча.

Ограничение на траекторию $s(t)$:

$$s(t) \in M^*, \quad (12)$$

где M^* – множество всех возможных траекторий движения лазерного источника, т.е. пятна по поверхности многослойного (N -слойного) микробиологического материала.

Ограничение на скорость $v(t)$ движения источника:

$$v_{\min} \leq |\dot{s}(t)| \leq v_{\max}, \quad (13)$$

где $v_{\min}$ – минимальное значение скорости движения источника лазерного луча, т.е. пятна, по поверхности многослойного (N -слойного) микробиологического материала; $v_{\max}$ – максимальное значение скорости движения пятна.

Частным случаем ограничения на скорость является ограничение:

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max}. \quad (14)$$

Для источников с произвольной формой накладывается ограничение на плотность теплового воздействия:

$$Q_{\min} \leq Q(x, y, z, t) \leq Q_{\max}, \quad (15)$$

где $Q_{\min}$ – минимальная плотность теплового воздействия; $Q_{\max}$ – максимальная плотность.

Ограничение на диаметр лазерного источника в виде пятна S :

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, \quad (16)$$

где $S_{\min}$ – минимальный диаметр лазерного источника, т.е. пятна; $S_{\max}$ – максимальный диаметр лазерного источника.

Ограничение на результирующее температурное поле:

$$T(x, y, z, t, z^*) \leq T^*, \quad (17)$$

где T^* – допустимые значения температурного поля.

Рассмотрим постановку прикладных оптимизационных задач и формализацию их математических моделей при контроле температурного поля многослойного микробиологического материала.

Математические модели прикладных задач оптимизации.

Математическая модель 1.

Необходимо минимизировать разность между значениями температурного поля T_i в заданных точках

$$(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \in \Omega^*, i = 1, \dots, N$$

многослойного микробиологического материала Ω и наперед заданными допустимыми значениями температурного поля T^* , т.е. найти

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \\ i=1, N \\ t \in [t_0; t^*]}} |T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*) - T^*|, \quad (18)$$

где $T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*)$ – температурное поле;

$(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \in \Omega^*, i = 1, \dots, N$ – область многослойного (N -слойного) микробиоматериала Ω .

Математическая модель 2.

Необходимо минимизировать максимальное значение, среди точек контроля, температурного поля, т.е. найти

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \\ i=1, N \\ t \in [t_0; t^*]}} T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*). \quad (19)$$

Обозначения как математической модели 1.

Математическая модель 3

Необходимо минимизировать, по параметрам теплового воздействия, максимальное значение модуля градиента температурного поля в области точек Ω^* многослойного микробиологического материала Ω , т.е. найти

$$\min_{z^* \in Z} \left[\max_{\substack{(x,y,z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0, t^*]}} |grad T(x, y, z, t, z^*)| \right]. \quad (20)$$

При этом, $T(x, y, z, t, z^*)$ является температурным полем области точек $(x, y, z) \in \Omega^*$ многослойного (N -слойного) микробиологического материала Ω , а z^* – вектор параметров лазерного воздействия.

Математическая модель 4.

На практике часто встречаются задачи, когда необходимо оценить число жизнеспособных и термически-травмируемых зародышей. Такая задача возникает при лазерном делении ранних элитных эмбрионов крупного рогатого скота для дальнейшей трансплантации частей эмбриона. В этом случае необходимо максимизировать число жизнеспособных зародышей, т.е. найти

$$\sum_{i=1}^N T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*) \rightarrow \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega^* \\ t \in [t_0, t^*] \\ z^* \in Z \\ i=1, N}}, \quad (21)$$

где $T_i = \begin{cases} 0, & \text{если } T_i > T^*, \\ 1, & \text{если } T_i \leq T^*; \end{cases}$

T_i – значение температурного поля в области точек многослойного (трехслойного) микробиологического объекта (эмбриона) Ω . Заметим, что

некоторые приведенные выше математические модели, на первый взгляд, кажутся известными. Однако если обратить внимание на то обстоятельство, что температурные поля биообъектов представляются в параметрическом виде (в зависимости от характеристик дискретного подвижного источника), то эти модели обладают новизной. Кроме того, вопросам моделирования процессов действия лазерного луча на многослойный биологический материал в научных публикациях уделяется недостаточно внимания.

Выводы. Проведённые в статье исследования позволили предложить методику моделирования и оптимизации основных параметров теплового воздействия на многослойный биологический материал с учётом требования обеспечения жизнеспособности сегментируемых частей биоматериала. В рамках решения этой основной задачи авторами усовершенствована математическая модель основной оптимизационной задачи с учетом специфики параметров сканируемых лазерных источников. Рассмотрены прикладные оптимизационные математические модели, являющиеся частными случаями, после их формализации, основной оптимизационной задачи. Это дало возможность осуществить автоматизацию процесса моделирования действия лазерного луча на многослойный биологический материал с целью повышения качества биотехнологического процесса деления биоматериала.

Список литературы:

1. Левкін, Д. А. Математичні моделі оптимізації параметрів дії лазерного променя на багатощарові біосистеми [Текст] / Д. А. Левкін // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2014. – № 60 (1102). – С. 77–84.
2. Мегель, Ю. Е. Обработка визуальной информации для оценки состояния биообъектов с помощью автоматической системы [Текст] / Ю. Е. Мегель, А. И. Рыбалка // АСУ и приборы автоматики. – 2002. – Вып. 118. – С. 11–16.
3. Стоян, Ю. Г. Размещение источников физических полей [Текст] / Ю. Г. Стоян, В. П. Пуятин. – К.: Наук. думка, 1981. – С. 59–87.
4. Стоян, Ю. Г. Оптимизация технических систем с источниками физических полей [Текст] / Ю. Г. Стоян, В. П. Пуятин. – К.: Наук. думка, 1988. – С. 44–48.
5. Рвачев, В. Л. Алгебро-логические и проекционные методы в задачах теплообмена [Текст] / В. Л. Рвачев, А. П. Слесаренко. – К.: Наук. думка, 1978. – 140 с.
6. Сметанкина, Н. В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек [Текст]: монография / Н. В. Сметанкина. – Х.: Мис'друк, 2011. – 376 с.
7. Стоян, Ю. Г. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования [Текст] / Ю. Г. Стоян, С. В. Яковлев. – К.: Наук. думка, 1986. – 268 с.
8. Antinori, S. Experience with the UV non contact laser in a assisted hatching in human [Text] / S. Antinori // J. of Assist Reprod and Genet. – 1997. – Vol. 14, Issue 5.
9. Obruca, A. Fertilization and early embryology: Use of lasers in assisted fertilization and hatching [Text] / A. Obruca, H. Strohmer, D. Sakkas, Y. Menezes, A. Kogosowski, Y. Barak, W. Feichtinger // Human Reproduction. – 1994. – Vol. 9, Issue 9. – P. 1723–1726. doi: [10.1093/oxfordjournals.humrep.a138781](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.humrep.a138781)
10. Douglas-Hamilton, D. H. Thermal effects in laser-assisted pre-embryo zona drilling [Text] / D. H. Douglas-Hamilton, J. Conia // Journal of Biomedical Optics. – 2001. – Vol. 6, Issue 2. – P. 205. doi: [10.1117/1.1353796](https://doi.org/10.1117/1.1353796)

Bibliography (transliterated):

1. Levkin, D. A. (2014). Matematychni modeli optymizatsii parametriv dii lazernoho promeniya na bahatosharovi biosystemy. Visnyk NTU «KhPI». Ser.: Mekhaniko-tehnologichni systemy ta komplekxy, 60 (1102), 77–84.
2. Megel', Yu. E., Rybalka, A. I. (2002). Obrabotka vizual'noy informatsii dlya ocenki sostoyaniya bioob'ektov s pomoshch'yu avtomaticheskoy systemy. ASU i pribory avtomatiki, 118, 11–16.
3. Stoyan, Yu. G., Putyatin, V. P. (1981). Razmeshchenie istochnikov fizicheskikh poley. Kyiv: Nauk. dumka, 59–87.
4. Stoyan, Yu. G., Putyatin, V. P. (1988). Optimizatsiya tekhnicheskikh sistem s istochnikami fizicheskikh poley. Kyiv: Nauk. dumka, 44–48.
5. Rvachev, V. L., Slesarenko, A. P. (1978). Algebro-logicheskie i proekcionnye metody v zadachah teploobmena. Kyiv: Nauk. dumka, 140.
6. Smetankina, N. V. (2011). Nestacionarnoe deformirovanie, termouprugost' i optimizatsiya mnogoslownykh plastin i cilindricheskikh obolochek. Kharkiv: Mis'kdruk, 376.
7. Stoyan, Yu. G., Yakovlev, S. V. (1986). Matematicheskie modeli i optimizatsionnye metody geometricheskogo proektirovaniya. Kyiv: Nauk. dumka, 268.
8. Antinori, S. (1977). Experience with the UV non contact laser in a assisted hatching in human. J. of Assist Reprod and Genet, 14 (5).

9. Obruca, A., Strohmer, H., Sakkas, D., Menezo, Y., Kogosowski, A., Barak, Y., Feichtinger, W. (1994). Fertilization and early embryology: Use of lasers in assisted fertilization and hatching. *Human Reproduction*, 9 (9), 1723–1726. doi: [10.1093/oxfordjournals.humrep.a138781](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.humrep.a138781)
10. Douglas-Hamilton, D. H., Conia, J. (2001). Thermal effects in laser-assisted pre-embryo zona drilling. *Journal of Biomedical Optics*, 6 (2), 205. doi: [10.1117/1.1353796](https://doi.org/10.1117/1.1353796)

Поступила (received) 12.07.2017

Библиографические описания / Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Математическое моделирование и оптимизация параметров действия лазерного луча на многослойные биоматериалы/ Мегель Ю. Е., Путятин В. П., Левкин Д. А., Левкин А. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.60–64. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Математичне моделювання та оптимізація параметрів дії лазерного променя на багатослойні біоматеріали/ Мегель Ю. Є., Путятін В. П., Левкін Д. А., Левкін А. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.60–64. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Mathematical modeling and optimization of parameters of action of a laser beam on multilayered biomaterials/ Megely Yu., Pytyatin V., Levkin D., Levkin A. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.60–64. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-545

Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors

Мегель Юрий Евгеньевич – доктор технических наук, Харьковский Национальный Технический Университет Сельского Хозяйства имени Петра Василенка, профессор кафедры „Кибернетики”, ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: megel_ye@mail.ru.

Путятин Валерий Петрович – доктор технических наук, Харьковский Национальный Технический Университет Сельского Хозяйства имени Петра Василенка, профессор кафедры „Кибернетики”, ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: vasiltsova_natali@mail.ru.

Левкин Дмитрий Артурович – кандидат технических наук, Харьковский Национальный Технический Университет Сельского Хозяйства имени Петра Василенка, ассистент кафедры „Высшая математика”, ул. Мироносицкая, 92, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: valoi@i.ua.

Левкин Артур Владимирович – кандидат технических наук, Харьковский Национальный Технический Университет Сельского Хозяйства имени Петра Василенка, доцент кафедры „Кибернетики”, ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: artur.lav@3g.ua.

Мегель Юрий Евгеньевич – доктор технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарства імені Петра Василенка, професор кафедри „Кибернетики”, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: megel_ye@mail.ru.

Путятин Валерий Петрович – доктор технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарства імені Петра Василенка, професор кафедри „Кибернетики”, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: vasiltsova_natali@mail.ru.

Левкин Дмитрий Артурович – кандидат технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарства імені Петра Василенка, асистент кафедри „Вищої математики”, вул. Мироносицька, 92, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: valoi@i.ua.

Левкин Артур Владимирович – кандидат технічних наук, Харківський Національний Технічний Університет Сільськогосподарства імені Петра Василенка, доцент кафедри „Кибернетики”, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: artur.lav@3g.ua.

Yuri Megely – Doctor of technical sciences, professor, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, department of kibernetics, Alchevskykh St., 44, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: megel_ye@mail.ru.

Valery Pytyatin – Doctor of technical sciences, professor, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, department of kibernetics, Alchevskykh str., 44, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: vasiltsova_natali@mail.ru.

Dmitry Levkin – PhD, Assistant, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, department of higher mathematics, Myronosytska str., 92, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: valoi@i.ua.

Artur Levkin – PhD, Associate Professor, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, department of kibernetics, Alchevskykh str., 44, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: artur.lav@3g.ua.

С. О. БЕРЕЗОВСЬКИЙ**3D ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІ КОМУТАЦІЙНІ СТРУКТУРИ НА ЕЛЕМЕНТАХ БЕРЕЗОВСЬКОГО**

Показано використання графічної моделі комутаційного елемента Березовського, як складової компоненти набору - інструментарію для мови образів, що дозволяє створити відповідну бібліотеку образів для творчого людино-машинного процесу проектування масштабованих і 3D топологій комутаційних фабрик і структур, мереж під завдання "Індустрія 4.0"

Підхід, що розглядається пропонує розробку відкритої платформи для розподілених мережевих сервісів, яка дозволить централізовано керувати комп'ютерними мережами, ПКС що, зокрема, дасть можливість незабаром випустити незалежні від виробників апаратного забезпечення системи віртуалізації мережевого обладнання.

Ключові слова: програмно-конфігурується мережі, комутаційний елемент Березовського, використання графічної моделі.

Показано использование графической модели коммутационного элемента Березовского, как составной компоненты набора - инструментария для языка Образов, что позволяет создать соответствующую библиотеку образов для творческого человеко-машинного процесса проектирования масштабируемых и 3D топологий коммутационных фабрик и структур, сетей под задачи "Индустрия 4.0"

Рассматриваемый подход, предполагает разработку открытой платформы для распределенных сетевых сервисов, которая позволит централизованно управлять компьютерными сетями, КС что, в частности, даст возможность в скором времени выпустить независимые от производителей аппаратного обеспечения системы виртуализации сетевого оборудования.

Ключевые слова: программно-конфигурируемой сети, коммутационный элемент Березовского, использование графической модели.

The use of the graphic model of the switching element by Berezovsky as a component of the toolkit for the Imagery language is shown, which allows creating an appropriate image library for the creative human-machine process of designing scalable and 3D topologies of switching factories and structures, networks for tasks "Industry 4.0" This approach assumes the development of an open platform for distributed network services that will allow centralized management of computer networks, which, in particular, will make it possible in the near future to release hardware-independent virtualization systems for network equipment. Using switching element by Berezovsky in the construction of software-reconfigurable PCS (SDN) allows us to scale segments of local networks over networks of clouds connected by software-controlled information tunnels. Importantly, the network virtualization engine is built on the basis of free software, which allows network administrators to manage large data flows more quickly and efficiently from one console. 3D technology is planned to be used in the production of new communication technology, automated control systems, computer systems, robotics and encryption, for example, in dynamic cryptographic devices. Due to the unique design and improved characteristics, the modules can be used in various types of radio electronic equipment, in fault-tolerant on-board systems and portable equipment. The new technology will lead to a fundamentally new level of the development and assembly of radio electronic equipment. New approaches in the design, development and application of images - models of elements, and on their basis automated production technologies will allow solving the problems of "Industry 4.0" more economically, flexibly, efficiently, and above all, at the same time maintaining the high life cycle of the projected PKS (SDN).

Keywords: software-defined networking, switching elements by Berezovsky, use graphic model.

Вступ. Світова спільнота знаходиться на порозі нової промислової революції – четвертої за рахунком, яка повинна ґрунтуватися на концепції нової індустріальної парадигми. Це епоха нових відкриттів і нових технологій, покликаних збільшити продуктивність праці, радикально змінити цілі галузі економіки швидкими темпами.

Натхненники німецької концепції "революційної ситуації" – "Індустрія 4.0" – обґрунтовують її базовий принцип кастомізації, і стверджують, що це ера настане, коли виробничі потужності будуть взаємодіяти з виробленими товарами і адаптуватися при необхідності під нові потреби виробників.

Концепція "розумних фабрик" - нові типи промислових самоналагоджувальних автоматизованих виробництв, пов'язаних один з одним за допомогою нових мережевих рішень в режимі реального часу і базуються на понятті Big Data і їх аналізі; використовують адаптивні технології доповненої реальності, інтернет-речей. Цілі етапи виробництва повинні функціонувати без участі людини.

Обробка Big Data (Великих Даних) зумовлює стрімке зростання обсягів трафіку, зміна його структури і зростаючої чисельності складових модулів автоматизованих виробництв, армії мобільних замовників-користувачів. При цьому традиційні мережі занадто статичні і тому не відповідають динаміці, властивій сучасному економіки. Традиційні схеми адресації, логічного розподілу мереж і способи призначення правил обробки трафіку в таких динамічних середовищах ста-

ють неефективні, а природа наявних коштів управління значно ускладнює масштабування сучасних мереж.

Розробники реалізують ідею програмно-конфігурується мережі (ПКС) (англ. Software-defined networking, SDN), в якій здійснюється розподіл функцій передачі трафіку від функцій управління (включаючи контроль як самого трафіку, так і пристроїв здійснюють його передачу). В ПКС логіка і управління передається спецконтроллеру, який одночасно відстежує роботу всієї мережі.

У минулому, технологічні досягнення і масштабованість частоти дозволяли більшості комп'ютерних програм збільшувати продуктивність без структурних змін або апаратного прискорення.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Актуальним стає можливість необмеженого масштабування мереж, усунення їх блокування, прозорі засоби управління і живучість.

Сьогодні для інтеграції і масштабування ПКС не вистачає стандартів, єдиної, відкритої для всіх вендорів платформи, загального стека технологій.

У разі програмного підходу можна створити відкриту платформу, побудовану за модульним принципом. Питання вже не в неможливості зробити це, а в необхідній кваліфікації проектувальників програмно-реконфігурованих мереж.

Відбувається зсув парадигми споживання з апаратних на програмно-реконфігуровані продукти вимагає для своєї реалізації нових рішень.

© С. О. Березовський. 2017

Потрібна концепція і реалізація програмно-реконфігурованих комутаційних структур (ПКС), за допомогою яких можна автоматизувати стандартні функції на кшталт створення віртуальних машин і розподілу ресурсів зберігання.

Потрібно підхід, що пропонує розробку відкритої платформи для розподілених мережевих сервісів, яка дозволить централізовано керувати комп'ютерними мережами, ПКС що, зокрема, дасть можливість незабаром випустити незалежні від виробників апаратного забезпечення системи віртуалізації мережевого обладнання.

Комутаційний елемент Березовського. У разі програмного підходу можна створити відкриту платформу, побудовану за модульним принципом. Питання вже не в неможливості зробити це, а в необхідній кваліфікації проєктувальників програмно-реконфігурованих комутаційних революційних 3D структур на нових елементах, наприклад, таких як N-мірні комутаційні елементи Березовського (КЕБ) [1,2].

Основним елементом концепції ПКС (SDN) є фреймворк з новим програмованим комутаційним елементом Березовського, на базі якого можливі 2D і 3D розробки топології мережевих і комутаційних структур.

Основним елементом концепції ПКС (SDN) і програмно-конфігуруються комутаційних структур (КС) є фреймворк з новим програмованим комутаційним елементом Березовського, на базі якого можливі 2D і 3D розробки топології мережевих і комутаційних структур.

Основною вимогою до нового фреймворку є можливість безлімітного масштабування і 3D розвитку топології, швидка розробка і висока живучість за рахунок фрагментально реконфігурації.

Існуючі стандарти передбачають використання в документації ГОСТи по умовному графічному позначенню (УДО) в електричних схемах і наказують як повинен бути позначений і підписаний кожен елемент на схемах, які виконуються вручну або автоматичним способом у всіх галузях промисловості.

"Як заведено" УДО елемента має форму прямокутника, який може містити три поля: основне і два додаткових і ряд інших вимог.

Традиційне моделювання починається зі створення 2D-геометрії.

Плоский двовірний комутаційний елемент Березовського, Який розглядається в [1], має 15 базових станів до яких відповідно надано характеристичні рівняння.

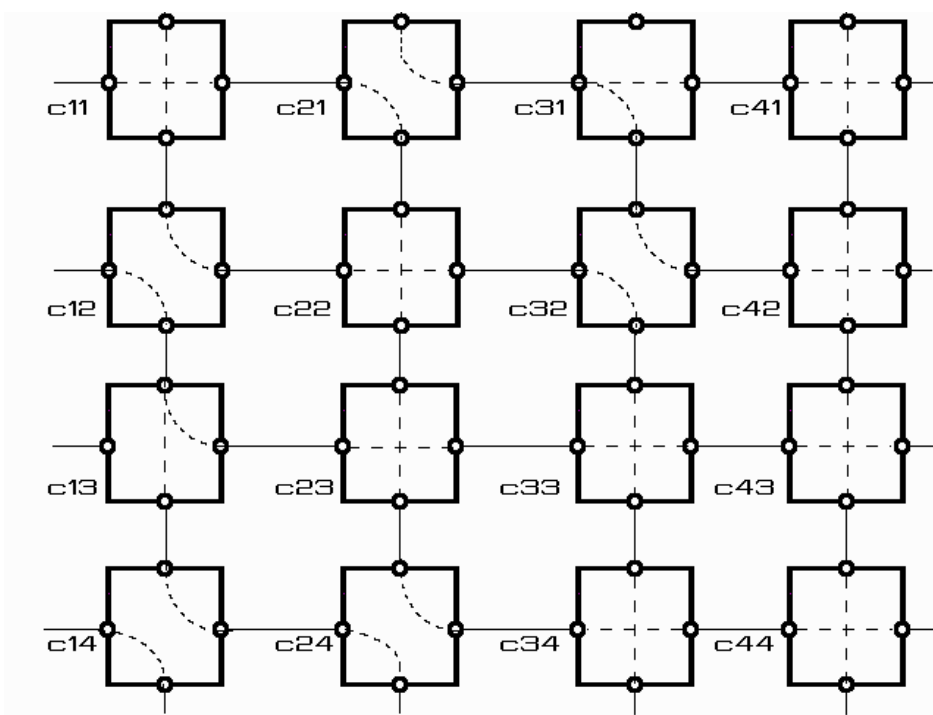


Рис. 1 – Комутаційне поле на 2D елементах Березовського

Тоді регулярна структура комутаційного поля з 16 елементів із зазначенням комутаційних станів кожного елемента поля і з урахуванням копланарності може бути представлена як на рис. 1. .

Розширення області застосування ПКС можливо за рахунок збільшення числа базових комутаційних станів КЕБ.

Двоплощинна модель комутаційного елемента. Перехід від 2D- до 3D-проектування здійснюється за схожим сценарієм: розробники

продовжують працювати в 2D і одночасно освоюють технології 3D-проектування, потім інтегрують 2D-креслення в 3D-моделі і поступово припиняють використання 2D-проектування, за винятком тих випадків, коли необхідна розробка схем, планувань і креслень в 2D. При цьому основне завдання полягає в передачі 2D-даних і інтеграції креслень в процес 3D-проектування. 3D-проектування сприяє значному підвищенню продуктивності, однак найчастіше необхідність попередньої підготовки УДО з історією

побудови підвищує складність навчання і перешкоджає швидкому переходу до використання системи.

УГО двомірного (двоплощинного) комутаційного модуля на елементах Березовського наведено на рис. 2.

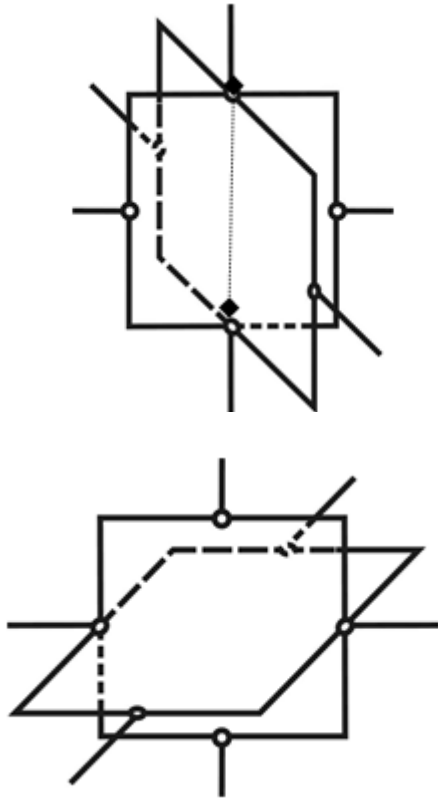


Рис. 2 – Умовна графічна модель двомірного комутаційного модуля

Об'єднання 2D – комутаційних елементів дозволяє отримати комутаційні модулі з більшим числом станів. З'єднання в єдиний n -вимірний комутаційний елемент – $(N-1)$ 2D – елементів дозволяє будувати комутаційні модулі з 15^{n-1} [2].

Регулярне комутаційне поле на зазначених моделях зображено рис. 3.

Підвищення продуктивності, живучості ресурсу паралельних, розподілених систем може бути реалізовано при використанні нових можливостей – 3D реконфігурованих комутаційних структур (РКС). 3D РКС дозволяють спростити масштабованість, підвищити безпеку; автоматизувати управління, збільшити потужність фізичної інфраструктури, знизити капітальні та операційні витрати.

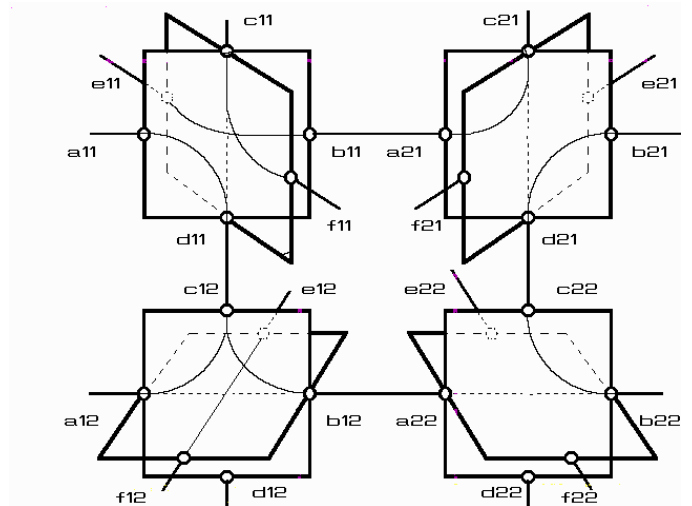


Рис. 3 – Регулярне комутаційне поле на 2-мірних КЕБ

3-мірна модель комутаційного елемента.

Представимо тривимірний комутаційний модуль у вигляді тривимірного куба, утвореного перетинанням 2D – комутаційних елементів у декартовій системі координат (рис. 4).

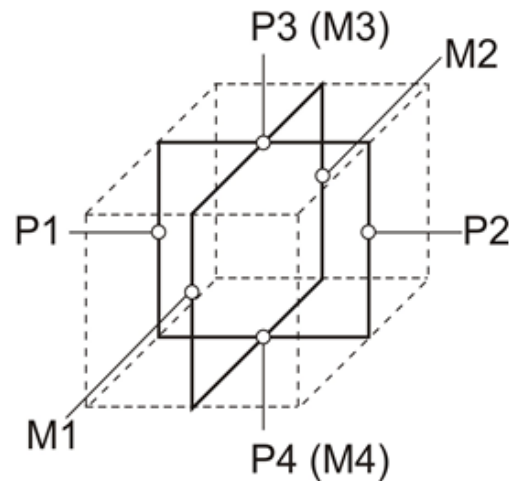


Рис. 4 – 3-мірний комутаційний елемент

Інколи такий модуль зручніше представляти у вигляді моделі – куба, усередині якого розташовані пересічні площини з нанесеними на них базовими станами.

3D комутаційне поле 2x2 на елементах Березовського має зображення як на рис. 5 де складові площини зображені штрих-пунктирною лінією для здебільш адекватної наочності.

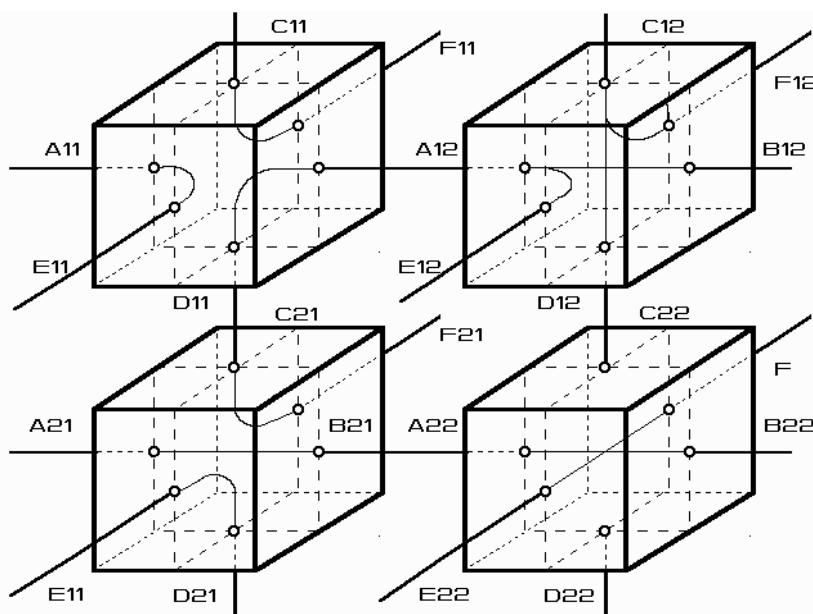


Рис. 5 – Комутаційне поле на 3-мірних комутаційних елементах

Промальовування і розрахунок 2D-ескізів площин комутаційного елемента Березовського значно спрощує процес проектування, і, якщо результати можна застосувати в 3D-середовищі, процес стає ще більш ефективним.

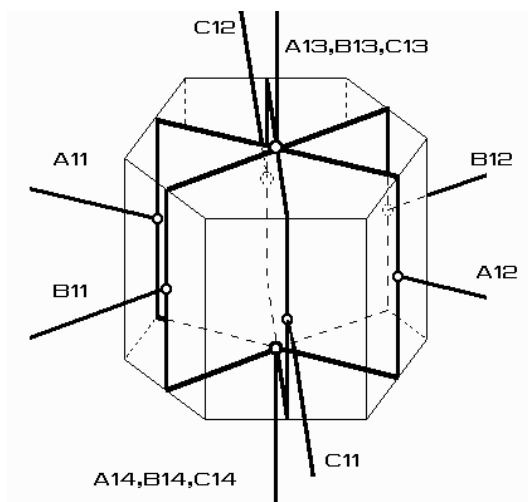


Рис. 6 – Модель елемента з промальованими площинами.

Для збільшення кількості складових площинах використано аксонометрическую проекцію моделі рис. 6.

Для поліпшення зорового сприйняття модель може бути зображена без інформації про комутаційних стан площин що складають елемент (рис. 7).

Однак подальше збільшення числа площин, складових N-мірний комутаційний елемент Березовського ускладнює процес промальовування - графічного представлення моделі елемента.

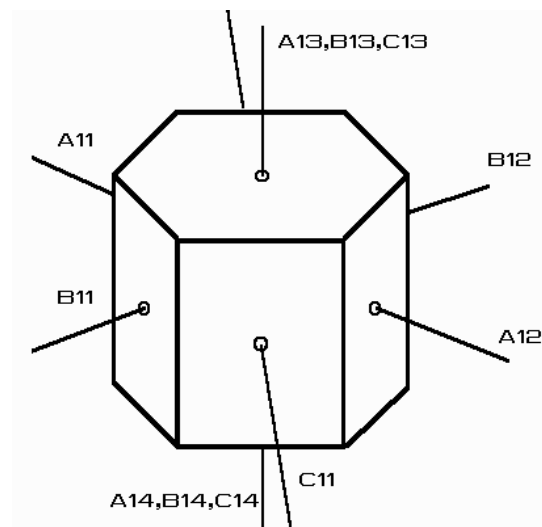


Рис. 7 – Модель елемента без інформації про комутаційних стан площин

Нове УГО комутаційного елемента Березовського. Традиційна літеро-цифрова технологія спілкування користувача з ЕОМ украй обмежує можливості людини щодо переробки символічної, n -вимірної інформації і вступає в явну суперечність з головним достоїнством СУПЕР-ЕОМ – з їхньою високою швидкістю.

Одна з найближчих стратегічних перспектив науки полягає в розробці нової технології інтерактивно-графічної взаємодії людини і його образних механізмів творчого мислення вже не просто з ЕОМ, а безпосередньо з самою досліджуваною проблемою [3].

Успіхи розробок Hard – і Software дозволяють активувати процес створення Brainware – сукупності інтелектуальних алгоритмічних засобів, що складають фактичну основу всієї методології сучасного математичного моделювання й обчислювального експерименту.

Одним з унікальних елементів із засобів сучасної інформаційної технології є динамічна Інтерактивна комп'ютерна графіка з використанням інтелектуальних мов програмування, що дозволяють задіяти обчислювальні можливості графічних процесорів, передати функцію створення алгоритмів – комп'ютера, а за людиною-експертом залишити лише синтез і постановку задачі.

Проте створення багатомірного комутаційного елемента автоматично очікувало на розробку адекватної зручної моделі зазначеного вище елемента для візуального відображення стану зв'язків в утворюючих його площинах і структури зв'язків самих елементів у полі [4].

Для вирішення кола завдань з проектування масштабованих однорідних і 3D програмованих ПКС, потрібен був потужний, але гнучкий інструментарій. Як структурної типізації - Образи - УДО графічної моделі N-мірного комутаційного елемента Березовського було запропоновано використовувати криву другого порядку – еліпс (рис. 8).

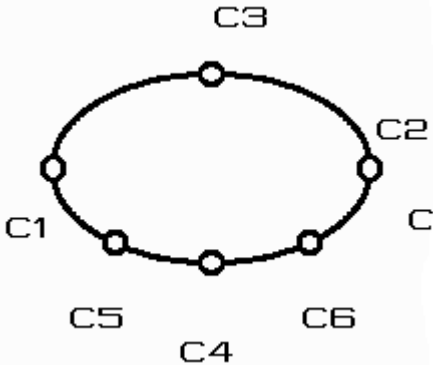
$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (1)$$


Рис. 8 – Нова графічна модель УГО площини комутаційного елемента Березовського

Використання нового УГО як моделі площини комутаційного елемента Березовського дозволило представити його у вигляді простого (рис. 9) або узагальненого (рис. 10) графічних образів.

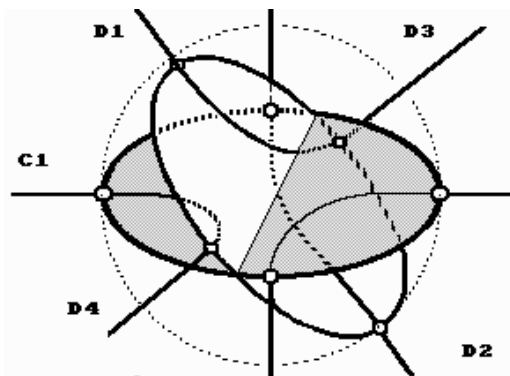


Рис. 9 – Графічна модель проста комутаційного елемента Березовського

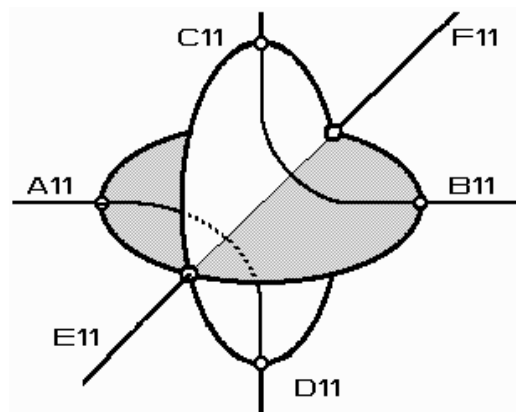


Рис. 10 – Графічна модель узагальнена комутаційного елемента Березовського

Образне уявлення 2-мірних в ізометрії регулярних структур з використанням наведених вище УГО представлені на рис. 11, 12.

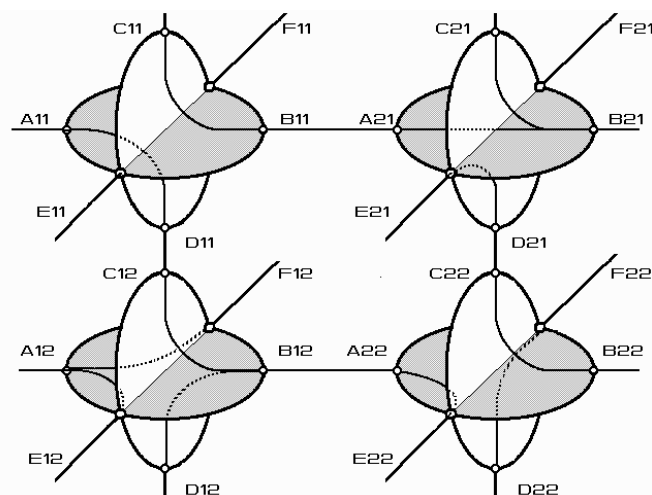


Рис. 11 – Регулярна структура на 2-мірних простих УГО

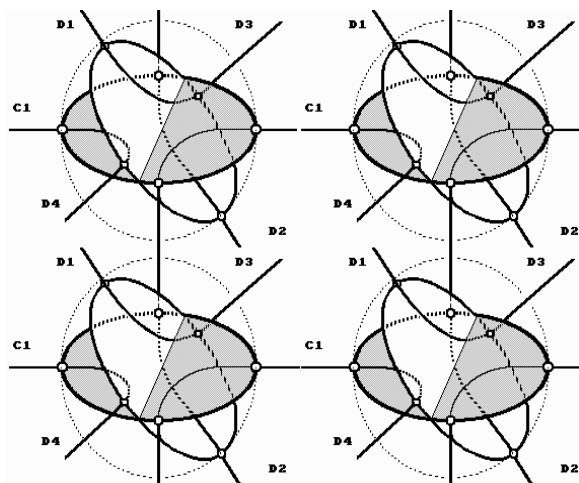


Рис. 12 – Регулярна структура на 2-мірних узагальнена УГО

3-мірна нова модель комутаційного елемента Березовського. Технологію 3D планується застосовувати у виробництві нової техніки зв'язку, автоматизованих системах управління,

обчислювальних комплексах, робототехніці і шифруванні, наприклад, в динамічних криптографічних пристроях. Завдяки унікальній конструкції і поліпшеним характеристикам модулі можуть використовуватися в різних видах радіоелектронної апаратури, в відмовостійких бортових системах і переносній апаратури.

Для зручності проектування, контролю прийнятих рішень іноді елементи графічного образу зручно розфарбовувати. Приклад УГО 3-мірного розфарбованого комутаційного елемента Березовського наведено на рис. 13.

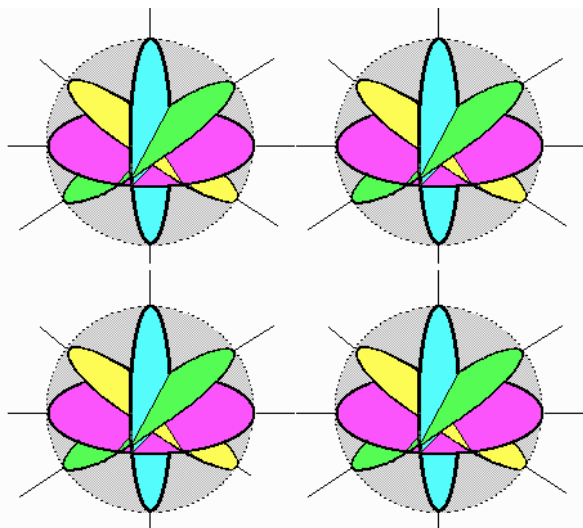


Рис. 13 – Розфарбована 3-мірна УГО комутаційного елемента Березовського

Консолідація напрямки розробки архітектури "зверху-вниз" або "знизу-вгору". 3D РКС на елементах Березовського дозволяють розширювати, консолідувати і формувати інформаційні напрямки розробки архітектури "зверху-вниз" або "знизу-вгору" утворювати складну ієрархію паралельно-послідовних віртуальних проблемно-орієнтованих сукупностей обчислювальних структур - кластерів для дослідження процесів мінливих в часі.

Необхідно підкреслити, що не існує обмеження на кількість відображуваних зв'язків на схемі. подібні схеми відображають лише взаємодія між процесами, а не їх черговість.

Структури що поєднують моделі УГО комутаційних елементів Березовського "зверху-вниз" або "знизу-вгору" наведено на рис. 14, 15

Розфарбовані схеми відображають кожен рівень управління окремо: в разі якщо виділена вищестояща категорія, то будуть відображені взаємодії підкатегорій процесів, що входять в виділену категорію, а якщо виділена категорія, що включає в себе процеси, то буде

відображена схема взаємодії процесів даної категорії між собою.

При цьому буде досягнута реально висока продуктивність обчислювальної системи на широкому класі задач.

На допомогу розробнику окремі кластери 3D РКС на елементах Березовського можуть бути розфарбовані із зазначенням їх внутрішнього стану (рис. 15)

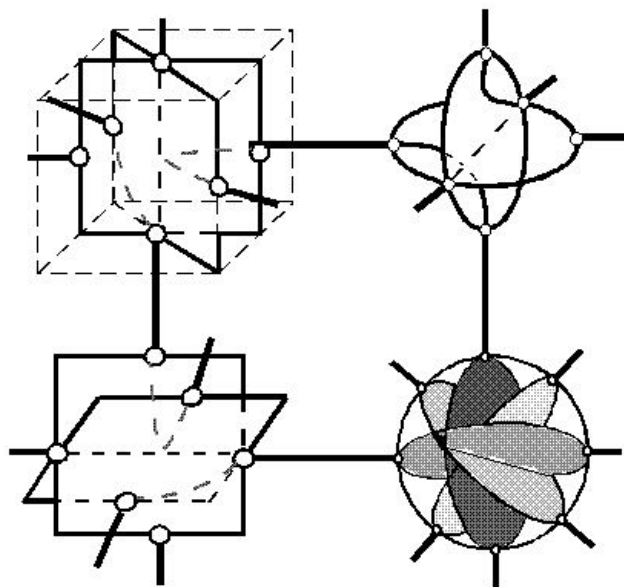


Рис. 14. – Комутаційна структура на елементах Березовського різних поколінь

РКС є узгоджену, відкриту і стандартизовану структуру, як інструмент моніторингу використання і пересування даних, який забезпечує гнучкий, безпечний, скоординований управління, поділ обчислювальних ресурсів і ресурсів зберігання даних, безпечний доступ до даних і до самої інфраструктури.

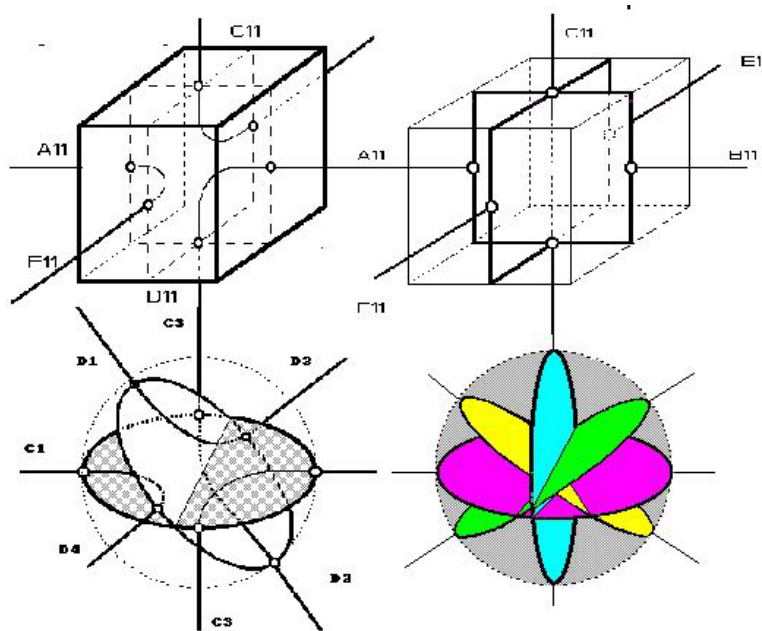


Рис. 15. – Розфарбована комутаційна структура на елементах Березовського різних поколінь

Суть концепції 3D РКС полягає в тому, щоб архітектура інфраструктури мала можливість адаптуватися під структуру розв'язуваної задачі, тобто щоб граф G^* обчислювального процесу якомога ближче збігався з графом G розв'язуваної задачі.

Як надано у матеріалах [2] базові стани площини задаються відповідно до типова рівнянь у виді діз'юнкцій, що дозволяє звернути одну з складових кон'юнкцій, тобто реконфігурувати стан площини програмно. Така можливість елемента Березовського дозволяє використати їх для побудова РКС.

З огляду на, що чим вище спеціалізація застосовуваного набору інструментів, тим вище якість роботи з проектування топології РКС. Була розроблена динамічна асоціативна бібліотека (ДАБ) станів для комутаційного елемента Березовського [4].

Висновки. Використання ДАБ забезпечує можливість реалізовувати алгоритми проектування топології КС в узагальненій формі, спираючись на вихідні графічні дані реалізованої топології РКС (рис.).

Побудова інфраструктур на базі технології 3D РКС вигідно відрізняється від структур з "жорсткою" архітектурою, які мають органічний недолік найбільшу продуктивність (пікову) тільки для вузького класу задач.

Використання кеб при побудові програмно-реконфігурованих КС дозволяє масштабувати сегменти локальних мереж поверх мереж з хмар об'єднаних програмно-керованими інформаційними тунелями. Важливим є те, що механізм віртуалізації мереж побудований на базі вільного програмного забезпечення, що дозволяє мережевим адміністраторам швидше і ефективніше управляти великими потоками даних з однієї консолі.

Не можна сказати, що це революційно нова ідея. При цьому завдання автоматизації управління ПКС в режимі жорсткого реального часу змушують розробників робити вибір між спеціалізованими ОС реального часу високої надійності і продуктивності або деякими відкритими ОС загального призначення.

Нова технологія виведе на принципово новий рівень процес розробки і збірки радіоелектронної апаратури.

Нові підходи в проектуванні, розробка і застосування образів - моделей елементів, і на їх основі автоматизованих технологій виробництва дозволить вирішувати завдання "Індустрія 4.0" більш економно, гнучко, ефективно, і головне, одночасно підтримувати високий життєвий цикл проектованих ПКС.

Список літератури:

1. Пат. № 2020739 RU. N-мерный коммутационный элемент С. А. Березовского [Текст] / Березовский С. А. – 1994. – Бюл. № 18.
2. Березовский, С. А. Недекартова многослойная коммутационная структура [Текст] / С. А. Березовский // Международная конференция «100-летие начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождения радиотехники»: 50-я Научная сессия, посвященная Дню радио. – М., 1995. – С. 30.
3. Berезovsky, S. A. Cognitive graphics elements of homogeneous switching structures [Text] / S. A. Berезovsky // Новые и нетрадиционные технологии в ресурс- и энергосбережении. – К.: АТМ України, 2004. – С. 7–11.
4. Березовський, С. О. Модель 3D-комутаційного елемента мережевої структури зв'язку [Текст] / С. О. Березовський // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2008. – № 2. – С. 86–92.
5. Berезovsky, S. A. Homogeneous switching structure for computing systems purposes [Text] / S. A. Berезovsky // Новые и нетрадиционные технологии в ресурс- и энергосбережении. – Киев: АТМ України, 2009. – С. 10–14.
6. Березовський, С. А. 3D инфографика конвергентных коммутационных структур на элементах Березовского [Текст] / С. А. Березовский // Інформаційна освіта та професійно-комунікативні технології XXI століття. – 2016. – С. 398–403.
7. Березовський, С. А. 3D реконфигурируемая коммутационная структура на элементах Березовского [Текст] / С. А. Березовский // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій. – 2016. – С. 89–91.
8. Berезovsky, S. Reconfigurable commutation structures using the elements by Berезovsky [Text] / S. Berезovsky // 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET). – 2016. doi: [10.1109/tcset.2016.7452106](https://doi.org/10.1109/tcset.2016.7452106).
9. Березовський, С. А. 3D реконфигурируемая коммутационная структура на элементах Березовского [Текст]: тези доповідей VIII Міжнар. наук.-практ. конференції / С. А. Березовський // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. – С. 89–91.
10. Berезovsky, S. (2016). Reconfigurable commutation structures using the elements by Berезovsky. 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET). doi: [10.1109/tcset.2016.7452106](https://doi.org/10.1109/tcset.2016.7452106)

Bibliography (transliterated):

1. Berезovskiy, S. A. (1994). Pat. No. 2020739 RU. N-mernyy kommutatsionnyy element S. A. Berезovskogo. Bul. No. 18.
2. Berезovskiy, S. A. (1995). Nedekartovaya mnogosloynaya kommutatsionnaya struktura. Mezhdunarodnaya konferenciya «100-letie nachala ispol'zovaniya elektromagnitnykh voln dlya peredachi soobshcheniy i zarozhdeniya radiotekhniki»: 50-ya Nauchnaya sessiya, posvyashchennaya Dnyu radio. Moscow, 30.
3. Berезovsky, S. A. (2004). Cognitive graphics elements of homogeneous switching structures. Novye i netradicionnye tekhnologii v resurso- i energosberezhenii. Kyiv: ATM Ukrainy, 7–11.
4. Berезovskiy, S. O. (2008). Model 3D-komutatsiynoho elementa merezhevoi struktury v'v'язku. Naukovi pratsi ONAZ im. O. S. Popova, 2, 86–92.
5. Berезovsky, S. A. (2009). Homogeneous switching structure for computing systems purposes. Novye i netradicionnye tekhnologii v resurso- i energosberezhenii. Kyiv: ATM Ukrainy, 10–14.
6. Berезovskiy, S. A. (2016). 3D infografika konvergentnykh kommutatsionnykh struktur na elementakh Berезovskogo. Informatsiina osvita ta profesiino-komunikativni tekhnologii XXI stolittia, 398–403.
7. Berезovskiy, S. A. (2016). 3D rekonfiguriruemaya kommutatsionnaya struktura na elementakh Berезovskogo. Suchasni problemy i dosiahnennia v haluzi radiotekhniki, telekomunikatsii ta informatsiinykh tekhnologii, 89–91.
8. Berезovsky, S. (2016). Reconfigurable commutation structures using the elements by Berезovsky. 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET). doi: [10.1109/tcset.2016.7452106](https://doi.org/10.1109/tcset.2016.7452106).
9. Berезovskiy, S. A. (2016). 3D rekonfihuryruemaia kommutatsiynnaia struktura na elementakh Berезovskogo. Suchasni problemy i dosiahnennia v haluzi radiotekhniki, telekomunikatsii ta informatsiinykh tekhnologii, Zaporizhzhia: ZNTU, 89–91.
10. Berезovsky, S. (2016). Reconfigurable commutation structures using the elements by Berезovsky. 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET). doi: [10.1109/tcset.2016.7452106](https://doi.org/10.1109/tcset.2016.7452106)

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

3D програмно-конфігуровані комутаційні структури на елементах Березовського/ Березовський С. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.65–72. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

3D программно-конфигурируемые коммутационные структуры на элементах березовского/ Березовский С. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.65–72. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

3D Program-configurable commutative structures using the elements by Berezovsky/ Berezovsky S. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 20 (1242). – P.65–72. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-545

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Березовський Станіслав Олександрович – доцент, Одеський національний політехнічний університет, Кафедра Радіотехнічних пристроїв, пр. Т. Г. Шевченко, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: bsa-1@i.ua.

Березовский Станислав Александрович – доцент, Одесский национальный политехнический университет, Кафедра радиотехнических устройств, пр. Т. Г. Шевченко, 1, м. Одеса, Украина, 65044; e-mail: bsa-1@i.ua.

Berezovsky Stanislav – Associate Professor, Odessa National Polytechnic University, Department of Radioengineering Devices, Taras Shevchenko ave., 1, Odesa, Ukraine, 65044; e-mail: bsa-1@i.ua.

УДК 004.056.53

А. Д. СОРОКУН

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ З МОЖЛИВІСТЮ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛОК В ОБЛАСТІ СТЕГANOГРАФІЇ

Розглядається такий спосіб організації захищеного спілкування двох суб'єктів від атак та ненавмисних змін, як стеганографія. Пропонується використовувати коди з можливістю виправлення помилок, описано механіку й принципи роботи з ними. В експериментальній частині тестується стеганографічна ємність кодів Ріда-Соломона і можливість включення додаткових біт інформації до стеганоповідомлення. Результатом дослідження є обґрунтування перспективи подальших досліджень застосування коригуючих кодів в області стеганографії.

Ключові слова: стеганографія, коригуючі коди, коди Ріда-Соломона, шифрування, мережі зв'язку.

Рассматривается такой способ организации защищенного общения двух субъектов от атак и непреднамеренных изменений, как стеганография. Предлагается использовать коды с возможностью исправления ошибок, описана механика и принципы работы с ними. В экспериментальной части тестируется стеганографическая емкость кодов Рид-Соломона и возможность включения дополнительных бит информации в стеганосообщение. Результатом исследования является обоснование перспективы дальнейших исследований применения корректирующих кодов в области стеганографии.

Ключевые слова: стеганография, корректирующие коды, коды Рид-Соломона шифрования, сети связи.

The present disclosure is directed to several problems relating to the goal of steganography: to hide messages in such a way that no one other than the sender and the intended recipient knows about the existence of this message. It is proposed to use codes with the possibility of correction of errors, also described the mechanics and principles of working with them. In the experimental part, the steganographic capacity of the Reed-Solomon codes is tested. Research field include the possibility of adding additional bits of information to the secret message. The result of the study is to justify the prospect of further research on the use of corrective codes in the area of steganography.

Keywords: steganography, corrective codes, Reed-Solomon codes, Encryption, communication network.

Вступ. У 21 столітті майже всі компанії, державні установи та окремі користувачі спілкуються за допомогою комп'ютерних систем та передових технологій, таких як Інтернет. Сьогодні традиційні паперові носії замінюють своїми цифровими версіями, що дозволяє суттєво зменшити потреби у великих сховищах, а також робить інформацію легкодоступною для більшої кількості користувачів. Майже всі комерційні та приватні організації переходять до "безпаперового" офісу, коли для створення цифрового вмісту все частіше використовуються спільні офісні пристрої, такі як цифрові копіювальні апарати,

факсимільні апарати, сканери, цифрові камери та відеокамери. Переваги використання цифрової форми полягає в тому, що її можна легко створювати та зберігати.

Постановка проблеми. Розширення глобальної мережі зв'язку, таких як Інтернет, та посилення залежності від оцифрованої інформації в суспільстві робить інформацію більш вразливою до негативного впливу, і викликає серйозні проблеми щодо безпеки даних та приховування інформації. Забезпечення безпечного спілкування двох суб'єктів, захищене від

© А. Д. Сорокун. 2017

атак та ненавмисних змін, є завданням підвищеного рівня складності. Коли спілкування відбувається між двома суб'єктами, які знаходяться в одній і тій самій мережі, проблема одночасної передачі та отримання секретного зображення, без ризику для конфіденційності секретної інформації, є дуже важливою.

Безпека прихованих даних (секретне повідомлення) під час спілкування може реалізуватися двома способами:

використанням техніки секретної комунікації посиленням стратегії маршрутизації мережі, що використовується під час спілкування

Наука про секретне спілкування у сучасній цифровій епосі вимагає техніки для надійного передавання даних з одного місця в інше. Приклади таких методів включають стеганографію, криптологію, шифрування, цифрові водяні знаки та відбитки пальців. Дана стаття буде стосуватись проблем стеганографії.

Стеганографія – це наука про прихований зв'язок. Мета стеганографії полягає в тому, щоб приховати повідомлення таким чином, щоб ніхто, крім відправника та передбачуваного одержувача, не знав про існування цього повідомлення. Прихована інформація не привертає уваги і не піддається атакам. Цей підхід відрізняється від криптографії, метою якої є зробити інформацію такою, яку неможливо прочитати.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є можливість використання в області стеганографії типу каналу передачі з можливістю корекції помилок.

Задачею дослідження я ставлю виділення методу, який можна використовувати для подальших досліджень як основу.

Шифрування даних. Теорія шифрування – це «вивчення методів ефективної і точної передачі інформації з одного місця в інше». З математичної точки зору, шифрування – це ін'єкція, яка присвоює кожному символу з набору A символ з набору Y . Таким чином, створюється кодове слово C_i . Код являє собою набір всіх кодів слів. Кодові слова C_i представлені у вигляді кратної послідовності, де кожному з об'єктів m відповідає стан Z . Довжина коду L – це кількість кодів слів C_i . Ця довжина для бінарних кодів визначається співвідношенням $1 \leq L \leq 2^m$.

Основною ідеєю шифрування є те, що всі кодові слова повинні бути такими, що диференціюються один з одним. З цією метою в теорію шифрування було введено поняття відстані між кодовими словами. Доти доки два кодових слова збігаються один з одним, вони повинні мати однакову відстань.

Типи коригуючих кодів. Існує кілька аспектів, за якими коди можуть бути розділені.

І. Шлях додавання розмірностей:

1. Систематичні коди: з інформаційних бітів k одержуються надлишкові біти ($r = n - km$, де n – довжина кодового слова). Кодове слово складається з інформаційних бітів, за якими

слідують надлишкові біти. Інформаційні біти повідомлення відділяються від надлишкових бітів під час передачі. Систематичні коди позначені як коди (n, k) .

2. Не систематичні коди: інформаційні біти замінюються послідовностями бітів з більш високою надлишковістю. В процесі передачі не представляється можливим відмежовувати надлишкові біти від інформаційних бітів.

II. Шлях виправлення помилок:

1. Коди виявлення: помилки тільки ідентифікуються і не виправляються відразу. Корекція може бути виконана шляхом запиту на повтор передачі помилкового сегмента.

2. Коригувальні коди: помилки ідентифікуються і виправляються відразу ж, без необхідності зворотного запиту. Обчислювальна складність, а також можливості корекції визначається кодом виправлення помилок і його технічними характеристиками.

Існує дві групи кодів:

1. Кодування джерела (кодування ентропії): це процес стиснення вихідних даних для того, щоб отримати більш високу ефективність передачі.

2. Кодування каналу (пряме виправлення помилок): це процес додавання надлишкових бітів до повідомлення, щоб забезпечити стійкість до шуму зв'язку.

Алгебраїчна теорія коду розрізняє два класи кодів корекції помилок:

1. Коди лінійних блоків

2. Конволюційні коди

Коди лінійних блоків обробляють повідомлення блок за блоком. Кожен блок не залежить від інших блоків, тобто коди блоків не мають пам'яті. Властивість лінійності означає, що сума, а також скалярний добуток будь-яких двох кодових слів дає ще одне кодове слово

Конволюційні коди, на відміну від кодів лінійних блоків, залежать не тільки від поточної вхідної інформації, але і від попередніх входів і виходів блоку за блоком або біту за бітом. Для цього конволюційний кодер має пам'ять і, таким чином, являє собою завершений механізм. Статус датчика визначається вмістом його пам'яті. Процес дешифрування виконується за допомогою алгоритму Viterbi.

Основна мета шифрування полягає в запобіганні виникненню помилок в переданому повідомленні. Канал передачі забезпечує передачу повідомлення між відправником і одержувачем. На рис. 2 показано місце, де помилки можуть виникати через перекручування і шуми.

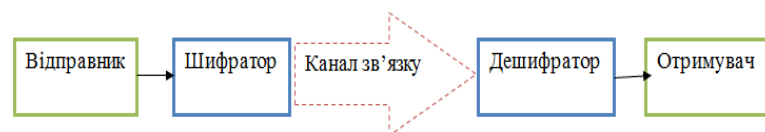


Рис.1 – Виникнення помилок

При шифруванні розпізнають такі два класи помилок:

1. Помилки поодиноких бітів (незалежні помилки): вони викликані шумом, який впливає тільки на один елемент сигналу. Різні статичні характеристики визначаються для того, щоб описати їх властивості. У послідовності бітів тільки одна помилка. Якщо відбуваються множинні помилки, це означає, що в послідовності бітів існує більше незалежних помилок.

2. Пакет помилок: це послідовності переданих сигнальних елементів, в яких частота помилкових елементів вища, ніж частота правильно переданих елементів.

Поля Галуа і коди Ріда-Соломона. В теорії шифрування використовується арифметика скінченних полів. Скінченні поля були досліджені французьким математиком Галуа, і тому вони називаються полями Галуа (GF). Скінченні поля є структурою алгебри, в якій існують основні математичні операції, такі як додавання, віднімання, множення і ділення між його елементами. Для всіх елементів GF є вірним те, що результат будь-якої операції є елементом поля. Скінченні поля складаються зі скінченного числа елементів.

Оптимальними для використання в стегаканалі є коди Ріда-Соломона, що являють собою блокові коди виправлення помилок. Введення складається з блоків даних, до якої кодер додає надлишкові (парні) дані. Надлишкові дані використовуються для відновлення пошкоджених даних, викликаних шумом в процесі передачі даних. Кількість і тип помилок, які можуть бути виправлені, залежить від характеристик коду Ріда-Соломона.

Для інформаційних символів кодер додає символи парності, вихідним сигналом якого є кодове слово довжиною n символів. Таким чином, число символів парності дорівнює $(n-k)$, кожний довжиною m біт. Не двійковість означає, що символ складається з більш ніж одного біта. Декодер Ріда-Соломона дозволяє коригувати до t символів в кодовому слові, де $2t = n-k$. Число парних символів прямо пропорційно ефективності і кількості символів, який є код може виправити.

Обчислювальна складність шифрування і дешифрування кодів Ріда-Соломона, прямо пропорційна кількості символів парності в кодовому слові. Чим більше символів парності прикріплено до інформаційних символів, тим більше помилок код може виправити, але це вимагає більше обчислювальної здатності.

Код Ріда-Соломона може бути концептуально вкорочений так, що використовуватимуться не всі інформаційні символи. Надлишкові символи обчислюються з усіх (також нульових) інформаційних символів, проте передається тільки використана частина інформаційних символів. Декодер додає назад нульові інформаційні символи і дешифрує повідомлення.

Результати дослідження. Було виконано експериментальне дослідження, з метою визначення оптимальної організації експерименту. В якості кода Ріда-Соломона, був використаний код RS (31,23) з 5-бітових символів, інформація, що складається з 23

символів, з можливістю корекції до 4-х символів помилок. В кожне кодове слово вбудовано 2 стегаграфічні біти ($t/2$). Характеристика цього коду являє собою компроміс між продуктивністю і стегаграфічною обчислювальною ефективністю. На даний час немає загально-прийнятих тестів або стандартів для оцінки стега-графічних алгоритмів, проте, загальні принципи та основні положення слід враховувати при розробці стегаграфічного методу. Тому, на основі експериментальних досліджень основного положення та інших подібних досліджень, я обрав три наступні показники для вимірювання при перевірці:

1. Однорідність розподілу помилок
2. Співвідношення успішного дешифрування інформації
3. Співвідношення успішного дешифрування стегаграфічної інформації

Співвідношення успішного дешифрування інформації визначає, як стегаграфічна модифікація впливає на можливості корекції помилок кодів Ріда-Соломона. Часті збої в успішному дешифруванні переданої інформації вказують на недостатню характеристику коду, обрану для конкретного застосування. Це буде означати, наявність стегаграфічних даних і, таким чином, виявляється приховане повідомлення.

Співвідношення успішного дешифрування стегаграфічної інформації визначає успішність стегаграфічного дешифрування даних.

Рівномірність картини розподілу помилок залишається подібним шляхом повторення тестів, в різний час, як це показано на рис. 2. Проте стандартне відхилення збільшується за рахунок збільшення числа тестових повторень, що природно, і наведено в табл. 1.

Порівнюючи співвідношення успішного дешифрування інформації контейнеру і стегаграфічної інформації, я виявив, що відмінності незначні. Співвідношення успішного дешифрування інформації склала 100 % для кожного числа повторень і співвідношення успішного дешифрування стегаграфічної інформації була в середньому 98,63 %, як описано в табл. 2.

Таблиця 1 – Пілотне дослідження – стандартне відхилення частоти місця помилки

Кількість тестів	Стандартне відхилення частоти місця помилки	Тривалість тесту (хв.)
1 000	3.81	7
5 000	7.38	36
10 000	11.32	64
20 000	16.16	141

Таблиця 2 – Пілотне дослідження – порівняння успішних дешифрувань

Кількість тестів	Кількість успішних дешифрувань інформації	Кількість успішних дешифрувань стегаграфічної інформації
1 000	1 000 (100 %)	986 (98.60 %)
5 000	5 000 (100 %)	4935 (98.70 %)
10 000	10 000 (100 %)	9868 (98.68 %)
20 000	20 000 (100 %)	19717 (98.59 %)

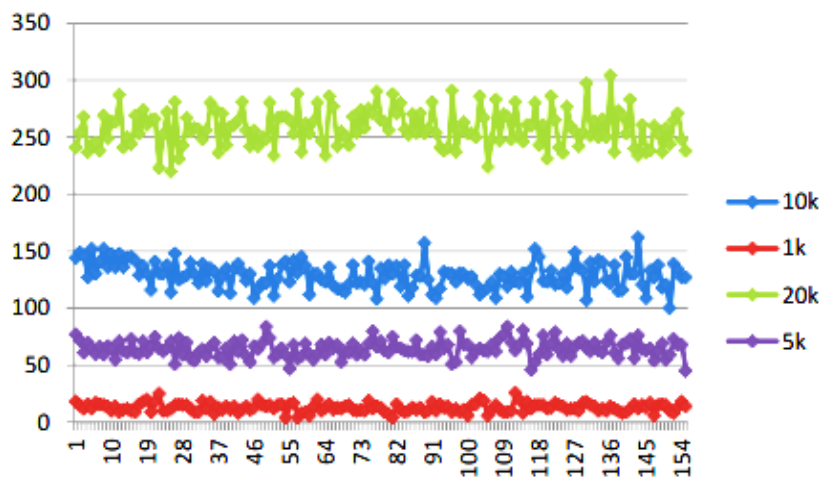


Рис. 2 – Відношення частоти до помилок

Висновки. Обидва експерименти підтвердили гіпотезу, висловлену на початку: стеганографічні дані можуть бути приховані в каналі Ріда-Соломона, який задовольняє первинні атрибути алгоритму

стеганографії. В ході випробувань ємності коду Ріда-Соломона з виправлення помилок жодного разу не була перевищена. Таким чином, виявлення стеганографії значно знижується.

Список літератури:

1. Коханович, Г. Ф. Комп'ютерна стеганографія. Теорія і практика [Текст] / Г. Ф. Коханович, А. Ю. Пузиренко. – Київ: «МК-Пресс», 2006. – 288 с.
2. Ватолин, Д. Методи стиснення даних. Пристрій архіваторів, стиснення зображень і відео [Текст] / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкін. – М.: «ДIALOG-МІФІ», 2003. – 384 с.
3. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике [Текст] / К. Шеннон. – М.: Иностранная литература, 1963. – 832 с.
4. Рудой, В. М. Системы передачи информации [Текст] / В. М. Рудой. – М.: МГОУ, 2004. – 171 с.
5. Бройдо, В. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации [Текст] / В. Бройдо. – СПб.: Питер, 2002. – 688 с.
6. Yevseiev, S. Developing of multi-factor authentication method based on niederreiter-mceliece modified crypto-code system [Text] / S. Yevseiev, K. Hryhorii, Y. Liekariev // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – No. 6/4 (84). – P. 11–23. doi:10.15587/1729-4061.2016.86175
7. Horbenko, Iu. Y. Development of mathematical and software models of the perspective encryption algorithm for implementation verification [Text] / Iu. Y. Horbenko, R. I. Mordvynov, O. O. Kuznetsov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – No. 5/9 (71). – P. 39–45. doi:10.15587/1729-4061.2014.28010
8. Andrushchenko, D. M. The method of the internet authorization for the protection of shareware programs [Text] / D. M. Andrushchenko, H. L. Kozyna // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – No. 4/2 (70). – P. 23–27. doi:10.15587/1729-4061.2014.26302
9. Zheleznyak, A. A. Ensuring the invariance of the pattern recognition system of the marine vessel systems in the process of fishing [Text] / A. A. Zheleznyak, Ju. F. Katorin, N. P. Smetjuh, V. A. Dorovskoj, S. G. Chernyj // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – No. 6/2 (78). 47–54. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55696
10. Zhilenkov, A. Investigation Performance of Marine Equipment with Specialized Information Technology [Text] / A. Zhilenkov, S. Chernyi // Procedia Engineering. – 2015. – No. 100. – P. 1247–1252. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.490

Bibliography (transliterated):

1. Kokhanovych, H. F., Puzyrenko, A. Iu. (2006). Kompiuterna stehanohrafiia. Teoriia i praktyka. Kyiv: «MK-Press», 288.
2. Vatolyn, D., Ratushniak, A., Smyrnov, M., Yukin, V., Vatolyn, D. (2003). Metody stysnennia danykh. Prystrii arkhivatoriv, stysnennia zobrazhen i video, Moscow: «DIALOG-MIFI», 384.
3. Shennon, K. (1963). Raboty po teorii informacii i kibernetike. Moscow: Inostrannaja literatura, 832.
4. Rudoj, V. M. (2004). Sistemy peredachi informacii. Moscow: MGOU, 171.
5. Brojdo, V. (2002). Vychislitel'nye sistemy, seti i telekommunikacii. Saint Petersburg: Piter, 688.
6. Yevseiev, S., Hryhorii, K., & Liekariev, Y. (2016). Developing of multi-factor authentication method based on niederreiter-mceliece modified crypto-code system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(4 (84)), 11–23. doi:10.15587/1729-4061.2016.86175
7. Horbenko, Iu. Y., Mordvynov, R. I., Kuznetsov, O. O. (2014). Development of mathematical and software models of the perspective encryption algorithm for implementation verification. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(9(71)), 39. doi:10.15587/1729-4061.2014.28010
8. Andrushchenko, D. M., Kozyna, H. L. (2014). The method of the internet authorization for the protection of shareware programs. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(2 (70)), 23–27. doi:10.15587/1729-4061.2014.26302
9. Zheleznyak, A. A., Katorin, Ju. F., Smetjuh, N. P., Dorovskoj, V. A., Chernyj, S. G. (2015). Ensuring the invariance of the pattern recognition system of the marine vessel systems in the process of fishing. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(2(78)), 47–54. doi:10.15587/1729-4061.2015.55696
10. Zhilenkov, A., Chernyi, S. (2015). Investigation Performance of Marine Equipment with Specialized Information Technology. Procedia Engineering, 100, 1247–1252. doi:10.1016/j.proeng.2015.01.490

Надійшла (received) 20.07.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження можливості та перспектив використання каналу передачі з можливістю корекції помилок в області стеганографії/ Сорокун А. Д. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.72–76. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Исследование возможности и перспектив использования канала передачи с возможностью коррекции ошибок в области стеганографии/ Сорокун А. Д. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.72–76. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Investigation of the possibility and prospects of using the transmission channel with the possibility of correction of errors in the field of steganography/ Sonokun A. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242).– P.72–76. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-545

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сорокун Антон Дмитрович – аспірант, Київський національний авіаційний університет, Кафедри комп'ютеризованих систем захисту інформації; пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 02000; anton.sorokun@gmail.com.

Сорокун Антон Дмитриевич – аспірант, Киевский национальный авиационный университет, Кафедры компьютеризированных систем защиты информации; пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 02000; anton.sorokun@gmail.com.

Sonokun Anton – post-graduate student, Kiev National Aviation University, Department of computerized information security systems; ave Cosmonaut Komarova, 1, Kiev, Ukraine, 02000; Anton.sorokun@gmail.com.

**ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА**

УДК 621.785.797

Р. Ю. ДЬОМІН**ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ БАНДАЖІВ КОЛІС ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

З застосуванням комплексу матеріалознавчих методів досліджено випадки втомного руйнування бандажів коліс колісних пар тягового рухомого складу залізниць. Проведено аналіз макро- і мікроструктури, фізико-хімічних і механічних властивостей зруйнованих бандажів. Розглянуто два випадки руйнування бандажів коліс – в області виточки під бандажне кільце і на поверхні гребеня. За допомогою фрактографічних досліджень поверхонь руйнування бандажів встановлені місця зародження тріщин, зони розвитку втомних тріщин з явними концентричними лініями, які вказують на швидкість розвитку тріщин, а також стан циклічного навантаження і зона долому. Мікрорельєф в зоні долому визначено річковим візерунком з утворенням сходинок, що характерно для крихкого руйнування.

Ключові слова: бандаж колеса, втомне руйнування, мікротріщини, макро- і мікроструктура, хімічний склад, механічні властивості.

С применением комплекса материаловедческих методов исследованы случаи усталостного разрушения бандажей колес колесных пар тягового подвижного состава железных дорог. Проведен анализ макро- и микроструктуры, физико-химических и механических свойств разрушенных бандажей. Рассмотрены два случая разрушения бандажей колес – в области виточки под бандажное кольцо и на поверхности гребня. С помощью фрактографических исследований поверхностей разрушения бандажей установлены места зарождения трещин, зоны развития усталостных трещин с явными концентрическими линиями, которые указывают на скорость развития трещин, а также состояние циклической нагрузки и зона долома. Микрорельеф в зоне долома определено речным узором с образованием ступенек, что характерно для хрупкого разрушения.

Ключевые слова: бандаж колеса, усталостное разрушение, микротрещины, макро- и микроструктура, химический состав, механические свойства.

With the application of a complex of material-based methods, cases of fatigue failure of the bandages of the wheelset wheels of the traction rolling stock of the railways were investigated. The analysis of macro- and microstructure, physical-chemical and mechanical properties of destroyed bandages has been carried out. Two cases of the destruction of the bandages of the wheels are considered – in the region of the recess under the spring ring and on the surface of the wheel flange. With the help of a fraction and graphic studies of the areas of destruction of the bandages, the origin of the cracks, the zone of development of fatigue cracks with explicit concentric lines, which indicate the rate of development of cracks, as well as the state of the cyclic loading and the zone of the gap are established.

The structure of the main metal of the bandages is steel with perlite grains and the separation of ferrites along the grain boundaries. In the study of the surface layers of the wheel flanges microcracks were found that had a periodic pattern of repetition throughout the surface and elongated shape. Structural changes found in the surface layer of metal bandages may be due to thermomechanical effects, as a result of high heating and cooling of the surface of the flange during operation.

Investigation of the chemical composition of the bandage material showed that in local cracks iron oxides and manganese are present, that defects completely filled with corrosion products that may be indicative of the formation on the metal surface of certain irregularities and inclusions.

One reason for fatigue bandages in the region of the recess under the spring ring could be too high value bandage tension on the center wheelset, and the presence of heterogeneity on the metal surface in the form of oxides and sulphides, probably appeared places of the spread of cracks. The fatigue failure of wheel flanges is due to the appearance of thermal cracks on the surface of the flange, as a result of braking with a large pressing of the brake pads, especially at high speed of the wheelset.

Keywords: wheel bandage, fatigue fracture, microcracks, macro- and microstructure, chemical composition, mechanical properties.

Вступ. Безпека руху поїздів в значній мірі залежить від надійної роботи колісних пар як найбільш навантажених елементів ходових частин рухомого складу. До основних елементів колісних пар тягового рухомого складу відносяться бандажі коліс. Підвищення надійності та збільшення ресурсу бандажів коліс становить одне з найважливіших завдань локомотивного господарства. Однак, трапляються випадки руйнувань бандажів коліс в експлуатації в результаті зародження втомних тріщин. В умовах експлуатації матеріал бандажа знаходиться під впливом трьох важливих факторів: розтягальних напружень, поверхневого наклепу і термомеханічних впливів. Термомеханічні дії можуть бути як експлуатаційні (результат нагрівання і деформування при гальмуванні), так і технологічні (результат нагрівання при поверхневому зміцненні). Внаслідок цього, поверхневий шар матеріалу може практично втратити здатність до опору руйнування, що проявляється у втраті пластичності, окрихченні матеріалу, накопиченні дефектів та появи на поверхні сітки тріщин [1].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Втомні тріщини найчастіше виникають в приповерхневій зоні бандажа, у внутрішній зоні ураженого корозією металу, по знаку маркування, в області виточки під бандажне кільце та також на поверхні гребеня [1–4]. Концентраторами напружень також виступають гострі кромки упорних буртів, в зоні яких зароджуються і далі розвиваються втомні тріщини [5].

Аналіз виявлених випадків руйнувань бандажів коліс колісних пар тягового рухомого складу та літературних джерел з цієї проблеми свідчить про відсутність практичних даних щодо детально досліджених випадків розвитку втомних тріщин в місцях виточки під бандажне кільце [3, 6]. Крім того, можна стверджувати, що досі не розроблено ефективного методу виявлення таких тріщин на стадії зародження, оскільки тріщини зазвичай виявляють після зняття бандажів з колісних центрів.

Руйнування важко навантажених деталей (перш за все коліс рухомого складу), викликані комплексним впливом зазначених факторів, можна віднести до

© Р. Ю. Дьомін. 2017

непередбачуваних. Тому дослідження причин утворення тріщин в поверхневих шарах металу бандажів і встановлення методів підвищення експлуатаційної стійкості і надійності бандажів залишається актуальною проблемою.

Ціль та задачі дослідження. Мета даної роботи полягає у дослідженні з використанням комплексу матеріалознавчих методів і засобів причин руйнування бандажів тягового рухомого складу залізниць в області крайки виточки під бандажне кільце, а також на поверхні гребеня.

Прикладні задачі дослідження пов'язані з аналізом причин руйнування бандажів електровозів ВЛ8-340, ДС3-13 та тепловозів 2М62У-0327, ЧМЭЗ-2004, ЧМЭЗ-2949.

Методи та засоби дослідження. Для вирішення поставленого завдання проведені детальні дослідження макро- і мікроструктури, фізико-хімічних і механічних властивостей зруйнованих бандажів. Дослідження проводилися на зруйнованих бандажах коліс локомотивів, що експлуатуються на залізницях України.

Фрактографія поверхні руйнування досліджувалась на аналітичному скануючому електронному мікроскопі Vega 3 LMN (фірма Tescan) для отримання інформації про характер руйнування та наявності крихкого чи в'язкого руйнування. Структура зразків в різних зонах матеріалу бандажа вивчалась за допомогою оптичної металографії (мікроскоп Axiovert 25 CA) та растрової електронної мікроскопії (PEM) (мікроскопи: NeoScope JCM-5000 (фірма JEOL), РЭМ 106И (фірма SELMI), Vega 3 LMN (фірма Tescan). Визначення хімічного складу (по лінії та площі) проводилось на растровому електронному мікроскопі CamScan 4D з енергодисперсійним аналізатором INCA Energy фірми Oxford Instruments. Механічні властивості матеріалу оцінювались методом вимірювання мікротвердості за Вікерсом на приладі ПМТ-3.

Дослідження показали, що зародження тріщин, які призводять до руйнування, відбувалося в області крайки виточки під бандажне кільце [7]. Схематично зони зародження тріщин (I - II) та основного металу (ОМ) бандажа зображено на рис. 1.

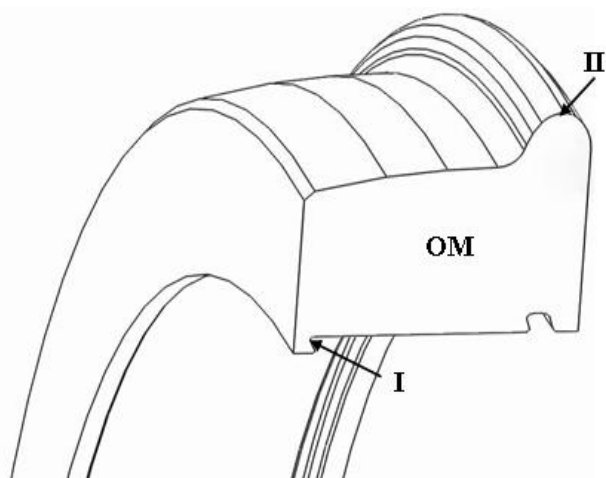


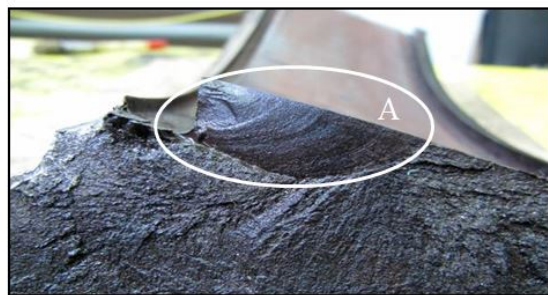
Рис. 1 – Схема розташування зон зародження тріщин (I-II) і основного металу (ОМ) бандажа: I – зона крайки виточки під бандажне кільце; II – поверхня гребеня

На поверхні втомних зломів бандажів спостерігається мікрорельєф з річковим візерунком з утворенням сходинок, який характерний для крихкого руйнування [8, 9]. Структура основного металу бандажів – сталь з перлітним зерном і виділенням фериту по межах зерен.

При детальному огляді місця злому досліджуваних бандажів було визначено осередок руйнування крайки виточки під бандажне кільце виявлено зону зародження втомної тріщини і зону долому (рис. 2). Особливостями мікрорельєфу втомних зломів бандажів є виявлені лінії втоми, які розташовані концентрично відносно осередку руйнування та свідчать про стабільне поширення втомної тріщини. Розташування ліній втоми і величина проміжків між ними характеризують швидкість розвитку тріщини і стан циклічного навантаження. В нашому випадку виявлено тонкі концентричні лінії (рис. 2, б, область А), які розташовані з однаковим інтервалом, що свідчить про відносно низьку швидкість росту тріщини при мінімальних відхиленнях від умов циклічного навантаження.



а



б

Рис. 2 – Втомні макрозломи бандажів з початком руйнування в області виточки під бандажне кільце: а – зона тріщини утворення; б – зона долому

Дослідження й аналіз особливостей використання неруйнівних методів контролю показали, що серед сучасних поширених методів (ультразвуковий, вихрострумний, капілярний, акустичний) найбільш ефективним при виявленні втомних тріщин у бандажах, саме в зоні крайки виточки під бандажне кільце, є акустичний метод.

При дослідженні особливостей застосування акустичного методу при аналізі стану колісних пар було визначено, що обробку сигналу необхідно проводити з мінімальною кількістю його неінформативних складових для забезпечення ефективності аналізу, тому основне завдання – максимально уникнути присутності в сигналі складових звучань об'єктів, що не

підлягають діагностиці. Разом з тим, ймовірно, буде практично неможливо виключити вплив елементів з'єднання рами з буксовими вузлами і наявність ре-

йок. Принципова блок-схема приладу для виявлення втомних тріщин у бандажах колісних пар представлена на рис. 3.

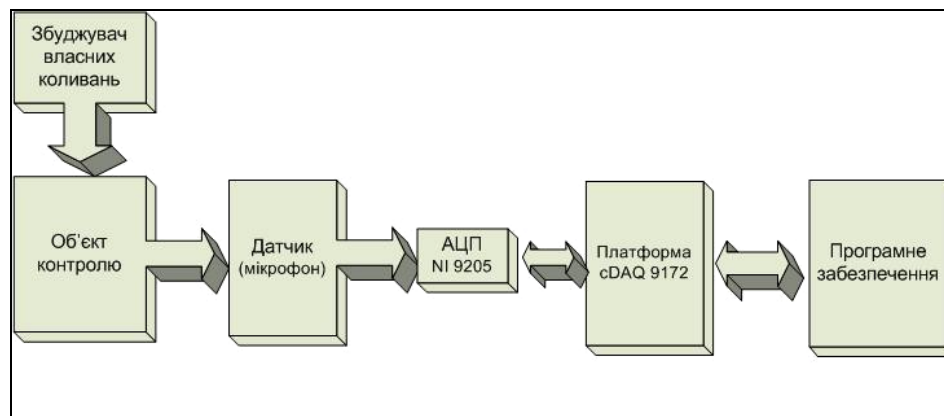


Рис. 3 – Блок-схема системи діагностики колісної пари низькочастотним віброакустичним методом

Звукові хвилі, що збуджуються при контакті, надходять через мікрофон до аналого-цифрового перетворювача, де відбувається оцифровування сигналів, а далі засобами високошвидкісного інтерфейсу дані передаються до ПК, де відбуваються подальша обробка й аналіз сигналу з використанням спеціального прикладного програмного забезпечення. В результаті роботи системи формується масив миттєвих значень прийнятих сигналів, який може бути оброблений з використанням математичних операторів і функцій вбудованих в стандартному наборі середовища LabVIEW [10].

З огляду на вищезазначене, можна стверджувати, що акустичний метод є найбільш перспективним для дослідження колісних бандажів, який, на відміну від інших методів неруйнівного контролю, може бути використаний для виявлення втомних тріщин в області виточки бандажів під час експлуатації ТРС, проте він потребує більш детального вивчення та удосконалення.

Міцнісні розрахунки. З використанням 3D-моделі бандажа побудована кінцево-елементна модель, розроблена схема навантаження бандажа і виконані розрахунки на міцність. Розрахунки проводилися для нового і зношеного бандажів коліс колісних пар. Розрахункові випадки включали рух прямими і в кривих. Значення сил, що діють на бандаж, приймалися рівними: 100 кН – вертикальна сила і 50 кН – горизонтальна сила.

За розрахунками у випадку руху прямими в області крайки виточки під бандажне кільце нового колеса напруження становить 154 МПа, а зношеного – 172 МПа. У випадку руху по кривим напруження зростають до 231 МПа і 267 МПа відповідно для нового і зношеного коліс.

Також були проведені розрахунки для визначення втомної довговічності бандажів колісних пар за умови, що всі цикли мають однакові знакозмінні і середні напруги. За цикл навантаження приймається 1 оборот колеса. При відсутності статистичної інформації про кількість прямих і кривих, які проходить екіпаж протягом усього терміну служби, як правило,

приймають 70 % прямих і 30 % кривих. Після підрахунку межі витривалості і на підставі розрахунків на міцність можна зробити висновок, що при схемі навантажень нового бандажа при русі на прямолінійних ділянках колії втомні пошкодження не накопичуються. Епюра втомної довговічності бандажа показана на рис. 4.

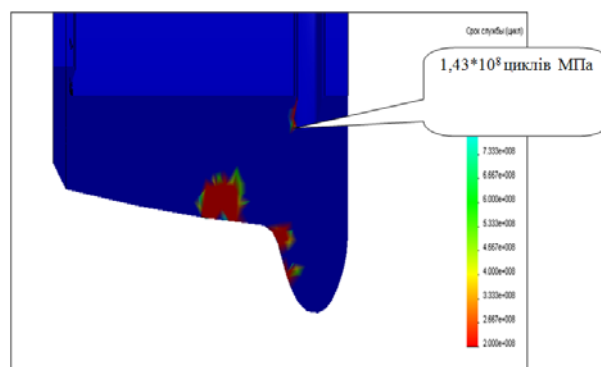
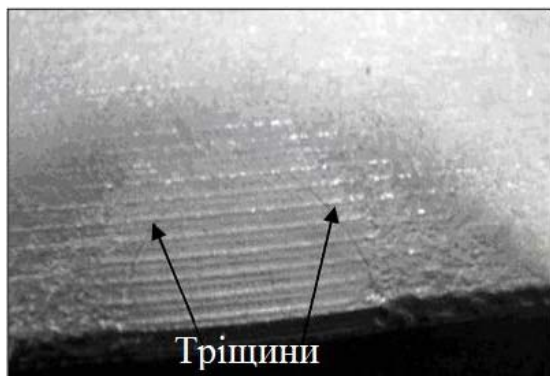


Рис. 4 – Епюра втомної довговічності бандажа

Термін служби бандажа розраховувався за допомогою пакета COSMOSWorks. Ресурс бандажа визначався за формулою: $L = n * 2\pi R$, де n – кількість циклів, R – радіус колеса. Отримано, що ресурс бандажа становить: $L = 561\,275$ км. Термін служби бандажа визначається як $T = L / l * 365$, де l – добовий пробіг. Відповідно, термін служби бандажа колісної пари складає: $T = 5,4$ року.

Аналіз причин руйнування бандажів в області крайки виточки під бандажне кільце. Характерною особливістю, виявленою при дослідженні зруйнованих бандажів коліс локомотивів, є втомне руйнування. В одному з випадків при детальному огляді крайки виточки під бандажне кільце візуально виявлено тріщини довжиною ~ 25–40 мм (рис. 5, а), які в подальшій експлуатації могли призвести до руйнування бандажа. Причиною виникнення тріщин в даному випадку, ймовірно, стало занадто високе значення натягу бандажа на центрі колісної пари, проте перевірити

дане припущення не вдалося, оскільки виміряти внутрішній радіус бандажа після його руйнування неможливо. Встановлено, що зародження тріщин в області кромки виточки під бандажне кільце відбувалося за циферблатним механізмом (рис. 5, б).



а



б

Рис. 5 – Тріщини в області крайки виточки під бандажне кільце

За аналізом мікроструктури металу бандажа в місці крайки виточки під бандажне кільце було виявлено неметалеві включення у вигляді сульфідів, силікатів недеформованих та оксидів. За допомогою растрової електронної мікроскопії у поверхневих шарах області крайки виточки було виявлено також продукти корозії. Дослідження хімічного складу показали, що вміст кисню в даному місці змінюється від 28,3 до 31,9 мас.%. Ймовірно, в процесі експлуатації утворилися оксиди заліза, що є небажаним явищем. Значення мікротвердості в області крайки виточки під бандажне кільце становило 3,13 ГПа, а основного металу – 2 ГПа.

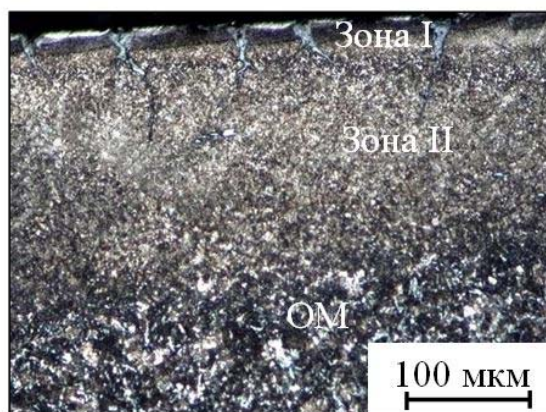
Виходячи з результатів проведених досліджень, можна припустити, при експлуатації бандажів у найбільш навантажених місцях, а особливо в області крайки виточки під бандажне кільце виникають втомні тріщини, які є наслідком умов експлуатації, неоднорідності металу на поверхні та наявності зміцненого поверхневого шару.

Аналіз причин руйнування гребеня бандажа .

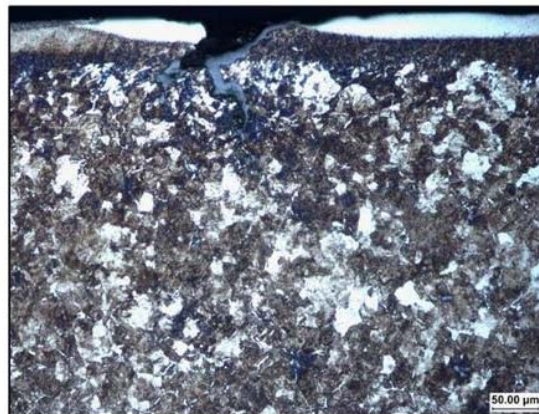
При глибокому дослідженні за допомогою растрової електронної мікроскопії поверхневих шарів гребеня зруйнованих бандажів були виявлені мікротріщини, які мали періодичний характер повторення по всій поверхні. Глибина залягання цих дефектів складає ~ 120 мкм. Виявлено дрібні мікротріщини, що утворилися при втомному руйнуванні, які мають розгалужений і

звивистий характер. Ці мікротріщини зародилися в при поверхневому шарі і згодом поширилися вглиб металу.

Мікроструктурними дослідженнями виявлено поверхневий шар товщиною 70–300 мкм, який складається з двох зон (рис. 6 а, зона І і зона ІІ). Зона І товщиною 10–15 мкм є більш дрібнодисперсною з розміром зерен 0,8–2,4 мкм, порівняно з зоною ІІ. Сформовані зони мають чітку границю між собою та основним металом бандажа. Виявлено дрібнодисперсні «білий» і «чорний» шари (зона І) товщиною до 20–50 мкм з розміром зерен ~ 0,8–2,4 мкм, а також перехідна зона перед основним металом (зона ІІ) (рис. 6 б). Структурні зміни, які спостерігаються в поверхневому шарі, можливо, спричинені термомеханічним впливом, як результат високого нагрівання та охолодження поверхні гребеня в процесі експлуатації, або за рахунок наклепування металу.



а



б

Рис. 6 – Мікроструктура матеріалу бандажа: а – основний метал; б – поверхневий шар з мікротріщинами

Мілкодисперсна структура поверхневого шару характерна для загартованих структур (сорбіт, тростит), які мають високу твердість і крихкість (рис. 6, б). Ймовірно, що великі залишкові напружки наклепаного поверхневого шару металу бандажа, а також структурні зміни як результат термомеханічного впливу (цикл «високий нагрів – високе охолодження») в процесі експлуатації і викликають появу мікротріщин.

При вимірюванні твердості металу бандажа по Брінеллю встановлено підвищення твердості в зоні гребеня (329 НВ), тоді як в зоні основного металу вона становить (281-286 НВ). При порівнянні результатів середнього значення мікротвердості поверхневого шару в зоні гребеня і основного металу бандажа встановлено, що на робочій поверхні гребеня утворився зміцнений шар товщиною до 60 мкм, твердість якого підвищується від 2,97 ГПа (основний матеріал) до 8,81 ГПа на поверхні гребеня. Мікротвердість поблизу мікротріщин збільшується в 2,5 рази, в зоні дрібнодисперсного поверхневого шару – в 2 рази в порівнянні зі значенням мікротвердості основного металу. Таким чином, швидше за все підвищення мікротвердості поверхневого шару гребеня бандажа обумовлено процесами наклепу матеріалу в експлуатації.

Для визначення хімічного складу матеріалу бандажа був застосований метод локального мікроаналізу, проведений за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Електронно-мікроскопічні дослідження структури матеріалу бандажа з визначенням хімічного складу (рис. 7) показали, що в місці мікротріщин вміст кисню становить до 30,5 мас.%, тобто, дані дефекти повністю заповнені продуктами корозії, які можливо пов'язані з утворенням на поверхні металу певної неоднорідності чи включень, що викликає виникнення локальних корозійно активних ділянок.

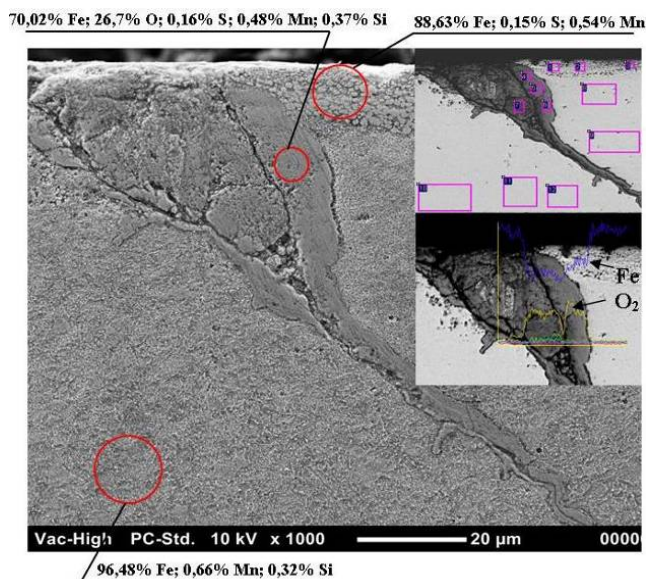


Рис. 7 – Хімічний аналіз матеріалу бандажа

Мікроаналіз хімічного складу в матеріалі бандажа виявив підвищення вмісту S в приповерхневому шарі (зона І) та в місці мікротріщин до 0,15-0,16 мас.%, що перевищує норми, встановлені ГОСТ 398-96 та дані у технічному паспорті на сталь марки 2, з якої виготовлено бандаж. Важливо відмітити також, що виявлено незначне знеуглецювання приповерхневих шарів, де концентрація вуглецю стає менша, ніж в об'ємі матеріалу. Це також являється фактором нестабільності структури металу бандажа.

Проведений хімічний аналіз в місці мікротріщин показав, підвищений вміст кисню, кремнію та фосфо-

ру, порівняно з основним металом та даними в технічному паспорті. Відповідно, це свідчить про неоднорідність матеріалу, що може зумовлювати зміну структури та властивостей металу бандажа.

Слід зазначити, що виявлені мікротріщини в поверхневому шарі є небезпечними концентраторами напружень, які можуть викликати розвиток магістральної тріщини і руйнування матеріалу. Можна припустити, що в зоні мікрodefектів відбувається нерівномірний розподіл концентрації напружень, створюючи при цьому максимальні критичні напруження, які інтенсивно розвиваються. Подібні дефекти мають закономірний характер появи на робочій поверхні гребеня бандажа.

В роботах [1, 11] описані випадки появи термічних тріщин, які виникають на гребнях бандажів локомотивів в результаті різкого гальмування з великим натиском гальмівних колодок, особливо при високій швидкості обертання колісної пари, що призводить до руйнування бандажа. В результаті локального нагріву поверхні гребеня бандажа вище температури 400-500°C і швидкого охолодження матеріал втрачає свої пружні властивості. Внаслідок цього можуть відбуватися структурні і фізико-хімічні зміни приповерхневих шарів бандажа з утворенням загартованих структур, втратою пластичності, окрихчуванням, накопиченням дефектів і появою мікротріщин.

Через так звану термічну втому відбувається процес руйнування матеріалу, який поступово розвивається під дією багаторазово повторюваних температурних напружень. Характерною ознакою термічних тріщин, які виникають при значному нагріві коліс гальмівними колодками, є наявність кольорів мінливості на поверхні кочення і фасці та білястий колір обода колеса.

Таким чином, структурно-фазові зміни, що спостерігаються в поверхневому шарі матеріалу бандажа, викликані, можливо, наклепом металу і термомеханічним впливом внаслідок високого нагріву і охолодження поверхні гребеня в процесі експлуатації при різкому гальмуванні [4]. Також ймовірно, що механізм утворення дефектів на поверхні гребеня пов'язаний з процесами тертя в парі «бандаж – гальмівна колодка», супроводжуючись градієнтом температур в результаті різкого гальмування зі значним натисканням гальмівних колодок, особливо при високій швидкості обертання колісної пари.

Висновки. В результаті проведених досліджень з застосуванням комплексу матеріалознавчих методів встановлено:

1. Руйнування бандажів коліс локомотивів відбувається в результаті зародження та розвитку втомних тріщини в найбільш навантажених місцях, зокрема в області кромки виточки під бандажне кільце і на поверхні гребеня, де діють великі розтягальні напруження від посадки на колісний центр. В експлуатації до цих навантажень додаються циклічні змінні навантаження, які супроводжують рух колісної пари рейковою колією з нерівностями, включаючи стрілочні переводи і криволінійні ділянки колії.

2. При дослідженні мікроструктури на поверхні гребеня бандажів коліс виявлено зміцнений поверхневий шар з мікротріщинами, які періодично повторюються по всій поверхні. Механізм утворення таких мікротріщин по всій видимості пов'язаний з процесами тертя в парі «бандаж - гальмівна колодка» і виникненням градієнта температур в результаті різкого гальмування з великим натисканням гальмівних коло-

док, особливо при високій швидкості обертання колісної пари. У більшості випадків ці мікротріщини не є основною причиною руйнування бандажів, оскільки носять закономірний характер утворення, проте є небезпечними концентраторами напружень, які можуть викликати крихкість матеріалу і великі внутрішні напруження, що в результаті може привести до руйнування деталі.

Список літератури:

1. Петров, С. В. Об одной причине неожиданного разрушения колес [Текст] / С. В. Петров // Локомотив. – 2005. – № 3. – С. 35–36.
2. Лысак, Д. В. Анализ дефектов на поверхности бандажей колесных пар, выявленных при визуальном контроле [Текст] / Д. В. Лысак // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2009. – № 4. – С. 45–47.
3. Перков, О. Н. Структурные изменения в металле железнодорожных колес при формировании термических трещин [Текст] / О. Н. Перков, И. А. Вакуленко, Г. В. Рейдемейстер // Залізничний транспорт України. – 2006. – № 1. – С. 44–45.
4. Маркашова, Л. И. Оценка трещиностойкости металла железнодорожных колес после длительной эксплуатации [Текст] / Л. И. Маркашова, В. Д. Позняков, А. А. Гайворонський, Е. Н. Бердникова, Т. А. Алексеев // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2011. – № 6. – С. 73–79.
5. Лысак, Д. В. Несуцільності металу і конструктивні особливості – як початок втомного руйнування бандажів колісної пари [Електронний ресурс] / Д. В. Лысак // Режим доступу: www.nbu.gov.ua/portal/natural/Res_tech/2010/lysak.pdf
6. Вакуленко, І. О. Чинники, які впливають на розвиток втомленості металу в процесі експлуатації залізничних коліс [Текст] / І. О. Вакуленко, О. М. Перков, М. А. Грищенко // Залізничний транспорт України. – 2007. – № 5. – С. 70–71.
7. Дьомін, Р. Ю. Застосування комплексу матеріалознавчих методів для дослідження втомного руйнування бандажів [Текст] / Р. Ю. Дьомін, В. С. Константіді, А. І. Трезуб, Л. Ф. Яценко // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 3/4. – С. 11–13.
8. Бялік, О. М. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія [Текст] / О. М. Бялік, С. Є. Кондратюк, М. В. Кіндрачук, В. С. Черненко. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2006. – С. 60–100.
9. Феллоуза, Дж. Фрактографія і атлас фрактограмм [Текст] / Дж. Феллоуза. – М.: Металлургия, 1982. – 488 с.
10. Domin, R. Improving the means of experimental determination of dynamic loading of the rolling stock [Text] / R. Domin, A. Mostovych, A. Kolomiets // An International Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 14, Issue 1. – P. 37–49.
11. Брюнчуков, Г. И. Методы повышения эксплуатационной стойкости бандажей локомотивных колес [Текст] / Г. И. Брюнчуков // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформирования. – 2006. – С. 214–220.

Bibliography (transliterated):

1. Petrov, S. V. (2005). Ob odnoy prichine neozhidannogo razrusheniya koles. Lokomotiv, 3, 35–36.
2. Lysak, D. V. (2009). Analiz defektov na poverhnosti bandazhey kolesnykh par, vyyavlenykh pri vizual'nom kontrole. Visnyk Shkhdnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia, 4, 45–47.
3. Perkov, O. N., Vakulenko, I. A., Reydeymeyer, G. V. (2006). Strukturnye izmeneniya v metalle zheleznodorozhnykh koles pri formirovani termicheskikh treshchin. Zaliznychnyi transport Ukrainy, 1, 44–45.
4. Markashova, L. I., Poznyakov, V. D., Gayvorons'kiy, A. A., Berdnikova, E. N., Alekseenko, T. A. (2011). Ocenka treshchinostoykosti metala zheleznodorozhnykh koles posle dlitel'noy ekspluatatsii. Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv, 6, 73–79.
5. Lysak, D. V. Nesutsilnosti metalu i konstruktivni osoblyvosti – yak pochatok vtomnoho ruynuvannya bandazhiv kolisnoi pary. Available at: www.nbu.gov.ua/portal/natural/Res_tech/2010/lysak.pdf
6. Vakulenko, I. O., Perkov, O. M., Hryshchenko, M. A. (2007). Chynnyky, yaki vplyvaiut na rozvytok vtomlenosti metalu v protsesi ekspluatatsii zaliznychnykh kolis. Zaliznychnyi transport Ukrainy, 5, 70–71.
7. Domin, R. Yu., Konstantidi, V. S., Trehub, A. I., Yatsenko, L. F. (2012). Zastosuvannya kompleksu materialoznavchykh metodiv dlia doslidzhennia vtomnoho ruynuvannya bandazhiv. Zaliznychnyi transport Ukrainy, 3/4, 11–13.
8. Bialik, O. M., Kondratiuk, S. Ye., Kindrachuk, M. V., Chernenko, V. S. (2006). Strukturnyi analiz metaliv. Metalohrafiia. Fraktohrafiia. Kyiv: VPI VPK «Politekhnik», 60–100.
9. Fellouza, Dzh. Fraktoografiya i atlas fraktogramm. Moscow: Metallurgiya, 488.
10. Domin, R., Mostovych, A., Kolomiets, A. (2014). Improving the means of experimental determination of dynamic loading of the rolling stock. An International Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering, 14 (1), 37–49.
12. Bryunchukov, G. I. (2006). Metody povysheniya ekspluatatsionnoy stoykosti bandazhey lokomotivnykh koles. Razvitie zheleznodorozhnogo transporta v usloviyah reformirovaniya, 214–220.

Надійшла (received) 06.07.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження втомного руйнування бандажів коліс тягового рухомого складу/ Дьомін Р. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.77–83. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Исследование усталостного разрушения бандажей колёс тягового подвижного состава/ Дёмин Р. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.77–83. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Investigation of fatigue failure of wheel bandages of traction rolling stock/ Domin R. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.77–83. – Bibliogr.:12. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дьомін Ростислав Юрійович – кандидат технічних наук, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, докторант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин; проспект Центральний, 59-а, м. Сєвєродонецьк, Україна, 93400; e-mail: r.domin@1520mm.com

Дёмин Ростислав Юрьевич – кандидат технических наук, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, докторант кафедры железнодорожного, автомобильного транспорта и подъёмно-транспортных машин; проспект Центральнуй, 59-а, г. Северодонецк, Украина, 93400;

Domin Rostyslav – PhD, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Doctoral student of the Department of Railway, Road Transport and Hoisting-and-Transport Machines; Central ave. 59a, Sewerodonetsk, Ukraine, 93400; e-mail: r.domin@1520mm.com

УДК 634.8:663.21-021.4

Э. Ж. ИУКУРИДЗЕ, О. Б. ТКАЧЕНКО, С. В. КИСЕЛЁВ**ЛАБОРАТОРИЯ СЕНСОРНОГО АНАЛИЗА КАК СОВРЕМЕННЫЙ ИНСТРУМЕНТ В ТЕХНОЛОГИИ ВИНА**

Методы сенсорного анализа в винодельческой отрасли – эффективные инструменты, позволяющие определять органолептические показатели продукции, оценивать их значимость и прогнозировать реакцию потребителей, а также выявлять характерные особенности вин из категории наименований, контролируемых по происхождению. Для обеспечения проведения исследований методами сенсорного анализа на современном уровне целесообразна концентрация исследовательских методик и технологий анализа данных в отраслевой лаборатории сенсорного анализа, ориентированной на определение сенсорных характеристик продукта, технологический и маркетинговый консалтинг.

Ключевые слова: сенсорный анализ, виноделие, вино, виноград, органолептические характеристики, сенсорный профиль, экспертная панель

Методи сенсорного аналізу в виноробній галузі є ефективними інструментами, які дозволяють визначати органолептичні показники продукції, оцінювати їхню значимість та прогнозувати реакцію споживачів, а також визначати характерні особливості вин з категорії найменувань, контрольованих за походженням. Для забезпечення проведення дослідження методами сенсорного аналізу на сучасному рівні доцільна концентрація дослідницьких методик і технологій аналізу даних у галузевій лабораторії сенсорного аналізу, яка орієнтована на визначення сенсорних характеристик продукції, технологічний та маркетинговий консалтинг.

Ключові слова: сенсорний аналіз, виноробство, вино, виноград, органолептичні характеристики, сенсорний профіль, експертна панель

Methods of sensory analysis in winemaking can be used as effective instruments of sensory characteristics' determination, evaluation of their significance and prediction of consumers' response. Sensory analysis of grape berries allows predicting the sensory profile of wine and eliminating the risk of processing of grape with defects. Fermentation with yeast strains able to produce specific flavor components in combination with studies of wine sensory profile allows creation of products with improved consumer attractiveness. Sensory analysis is useful for determination of distinctive features of wines with protected designation of origin. Modern approach to studies of wines and related products requires the laboratory of sensory analysis with specialization in wine-making. This laboratory can offer the determination of sensory characteristics with discriminative and descriptive methods as well as technological and marketing consulting. Sensory analysis enables wine producers to create wines with distinguished characteristics, understand consumer preferences, improve the control of technology processes and predict the changes of sensory profile during wine shelf-life.

Keywords: sensory analysis, wine-making, wine, grape, sensory characteristics, sensory profile, expert panel

Введение. Человек воспринимает мир с помощью органов чувств. Еще до истоков цивилизации он пользовался ими для сбора информации о пище, воде, среде обитания и принимал жизненно важные решения на основании сенсорных впечатлений. По мере развития цивилизации область применения ощущений для взаимодействия с окружающей средой расширялась, а способ описания сенсорных впечатлений усложнялся вместе с развитием речи и письменности. Органы чувств человека стали незаменимым инструментом практически во всех сферах его материальной деятельности, помогая создавать изделия ремесел, архитектурные творения, произведения искусства, и, конечно же, пищевые продукты. Творческий поиск человека привел его к созданию разнообразных кулинарных шедевров из доступных даров природы и продуктов сельского хозяйства, а расширение границ цивилизации создало условия для интенсивной торговли между регионами с существенными различиями в

культуре производства и потребления продуктов питания и напитков. Ценность таких продуктов стала определяться не только их питательной ценностью и качеством, но и привлекательностью в глазах потребителей, готовых платить за добавленную стоимость в виде особо приятных впечатлений при потреблении продукта. Необходимость оценки приемлемости качества продуктов при их обмене в ходе торговых операций, а также предсказания их ценности в глазах потенциальных потребителей привела к возникновению профессии дегустатора – специалиста по оценке пищевых продуктов и напитков с помощью органов чувств, способного трансформировать сенсорные впечатления в описание свойств продукта и принять решения относительно его приемлемости, качества, особенностей потребления, технологической или кулинарной обработки. Вполне естественно, что первые упоминания о дегустаторах связаны с виноделием – одной из уникальных сфер пищевого производства,

© Э. Ж. Иукурдзе, О. Б. Ткаченко, С. В. Киселёв. 2017

где сенсорные впечатления от продукта имеют решающее значения при его выборе, превосходя по значимости физико-химические показатели. Уже в 4 веке до н.э. древнегреческие источники упоминают о *oinoguestike* – человеку, владеющем искусством дегустации вина. Египетские папирусы 3 в. н.э. содержат сведения не только о дегустаторах, но и о принимаемых ими решениях о приемлемости или неприемлемости вин к закупке и потреблению. А древний византийский автор Флорентий (Florentinus) уже в начале 3 века н.э. создает руководство по дегустации вин с рекомендациями по технике дегустации и сочетанию вин и еды [1]. В дальнейшем оценка органолептических впечатлений от продукта, которую принято называть дегустацией, стала основным методом оценки качества и потребительской стоимости пищевых продуктов и напитков. Были выработаны разнообразные схемы оценки органолептических показателей вина, сыра, масла, мяса, рыбы, чая, кофе и других товаров, ставшие своеобразными «ритуалами». При этом наиболее сложные схемы оценки, оперирующие разнообразными приемами и богатой терминологией сложились именно в виноградарстве и виноделии, для чего были объективные причины.

Сенсорный анализ в винодельческой отрасли.

Генетическое разнообразие винограда культурного *Vitis vinifera* в сочетании с агротехническими приемами, учитывающими особенности почвенно-климатических условий или терруара породило многочисленные вариации физико-химических показателей и органолептических характеристик ягод различных сортов, их форм и клонов [2]. Технологическая обработка такого сырья с использованием разнообразных технологических приемов позволяет получить готовый продукт с уникальным разнообразием органолептических характеристик при относительно узком диапазоне изменений физико-химических характеристик. Это многообразие связано с богатством химического состава вина, в котором присутствуют многочисленные представители классов соединений, обладающих выраженным специфическим ароматом (альдегиды, ацетали, высшие спирты, высшие жирные кислоты, сложные эфиры и др.) и вкусом (танины, многоатомные спирты, терпены, органические кислоты). Значительный вклад в состав химических компонентов вина вносит процесс брожения, в котором могут использоваться весьма разнообразные вариации дрожжей *Saccharomyces vini* и *S. cerevisiae*, отличающиеся особенностями механизма спиртового брожения и побочных реакций, приводящих к образованию соединений со специфическим ароматом и вкусом. Очевидно, что исследование химического состава вина с целью идентификации его сортовых особенностей, типичности и ее связи с происхождением является чрезвычайно сложной, а зачастую – и невыполнимой задачей, требующей применения дорогостоящих методов инструментального анализа (газо-жидкостная хроматография с хромато-масс-спектрометрическим детектором (GCMS), высокоэффективная жидкостная хроматография, капиллярный электрофорез и др.). С другой стороны, описание органолептических показателей вина с помощью мето-

дов сенсорного анализа, основанных на чувствительности и специфичности органов чувств человека, не только не уступает, а зачастую и превосходит химические методы по возможностям обнаружения определенных компонентов. При этом по итогам анализа может быть сделан обоснованный вывод о его привлекательности для потребителей, чего не позволяют химические и инструментальные методы [3].

Возможности сенсорного анализа по оценке качества винодельческой продукции привели к повсеместному распространению и развитию методов ее дегустации. Исторически ее осуществляли специалисты-дегустаторы, подготовленные к определению органолептических характеристик вина. Со временем их стали называть «экспертами», подчёркивая высокий уровень профессионализма, достигнутого после многолетней практики. Оценка вин такими экспертами позволяла выявить и описать незначительные нюансы в аромате и вкусы, что дало возможность виноделам говорить об отличиях одних вин от других и позиционировать это как рыночное преимущество. В практике каждое производство располагает собственными или привлеченными экспертами, число которых, как правило, невелико. Применение достаточно простой методики балльной оценки отдельных органолептических характеристик, дополненной вербальной оценкой особенностей аромата и вкуса, описанной специфическими терминами долгое время была достаточной для решения задач производства и маркетинга вин. Однако по мере развития отрасли и усиления конкуренции проявились и проблемы «экспертного подхода». В первую очередь они связаны с высокими рисками производственных и маркетинговых решений, основанных на мнении отдельных специалистов или их узкой группы. Эти мнения могут не отражать истинных характеристик вина и быть далёкими от впечатлений массового потребителя. Существенное влияние на результаты экспертной дегустации оказывают внешние факторы, такие, как условия проведения исследования и физическое состояние экспертов. Проявляющиеся ограничения методик экспертной дегустации сделали очевидной необходимость поиска инструментов сенсорного анализа, отвечающих современным потребностям винодельческой отрасли, функционирующей в условиях повышенных запросов потребителей и усиления конкуренции. Необходимость объективного определения специфических особенностей вина, связанных с его происхождением и оценка рыночных перспектив продукции в зависимости от ее органолептических характеристик стали главными из этих потребностей. Для ее решения необходимо применение системного подхода с использованием различных инструментов сенсорного анализа, интегрированных в систему управления бизнесом от разработки продуктовой стратегии до менеджмента жизненного цикла отдельных продуктовых позиций. Сенсорный анализ становится неотъемлемой частью управления разработкой новых продуктов, их запуска в производство и коммерциализации, а также обеспечивает принятие адекватных управленческих решений на всех стадиях производства от сбора винограда до оценки стабильности продукции при

хранении. Обеспечение достоверности результатов на этом уровне требует применения актуальных методов статистической обработки данных и анализа результатов [4].

Современная система управления пищевым производством основана на управлении жизненным циклом отдельных продуктов или продуктовых линеек, рассматриваемых в качестве составляющих единой продуктовой стратегии. Разработка продуктовой стратегии включает этапы, приведенные в табл. 1 [5].

Таблица 1 – Стадии разработки продуктовой стратегии

Выявление возможностей
Потребительский анализ возможностей
Определение предмета рассмотрения
Определение сегментов потребителей
<i>Идеи продуктов и целевые потребители</i>
Изучение потребителей
Поведение
Восприятие
Предпочтение
Выбор продуктов
<i>Предварительный отбор идей новых продуктов</i>
Оценка идей новых продуктов
Создание описаний продуктов
Выбор сегментов потребителей
Выявление потребительских потребностей, желаний, выгод, рисков
Требования потребителя/оптовика
Отношение цена/качество
Рыночный потенциал
<i>Дальнейший отбор идей новых продуктов</i>
Разработка концепций продуктовых идей
Факторы признания продуктов
Предпочтения
Выявление свойств продуктов, преимуществ, рисков
<i>Оценка продуктовых концепций</i>
Разработка окончательной концепции продукта
Сегменты целевого рынка
Свойства продуктов
Преимущества продукта
Риски продукта
Свойства упаковки
Преимущества упаковки
Краткое описание дизайна продукта
<i>Окончательная оценка концепции продукта</i>
Техническое задание на разработку
Количественные показатели продукта
Количественные показатели упаковки
Технология производства
Сырье
Себестоимость/цена
Прогноз продаж
Доля рынка
Оценка вероятности признания и успешности продукта
<i>Окончательное принятие продукта в разработку</i>

В производстве вин эти этапы имеют не меньшее значение, чем в любой другой пищевой отрасли. Спе-

цифика виноделия проявляется в подходах к описанию продукта и к ограниченности инструментария, обеспечивающего изменение характеристик готовой продукции. Тем не менее, точное описание органолептических характеристик вин в терминах сенсорного профиля позволяет оценить предпочтения потребителей и поставить задачу разработки конечного продукта, удовлетворяющего их критериям выбора в данном сегменте рынка. Оценка продуктовой концепции невозможна без проверки ключевых гипотез методами сенсорного анализа с привлечением потребительской аудитории.

Техническое задание на разработку должно включать заданные органолептические характеристики продукта, которые будут оценены в ходе опытного производства и коммерческого производства с помощью тех же методов, что и при разработке концепции. Разработка нового вина проводится по алгоритму, который не отличается от алгоритма разработки любых других пищевых продуктов [6].

Специфика применения данного алгоритма в виноделии обусловлена ограниченностью инструментов, доступных технологу с целью влияния на органолептические характеристики. При этом результаты применения этих приемов проявляются спустя длительное время после воздействия и не всегда могут быть однозначно связаны с действиями технолога, повлекшими их. Особенностью виноделия по сравнению с другими пищевыми отраслями является его сезонность, выражающаяся в существенных различиях сенсорного профиля вин с идентичным происхождением и технологией производства, произведенных из винограда разных лет урожая (винтажа). Эта особенность требует повторения одного и того же цикла исследований органолептических характеристик из года в год с целью получения объективной информации о сенсорном профиле вина. В этой связи особое значение приобретает системный подход к управлению информацией, предполагающий документирование всех воздействий на вино с проведением регулярных контрольных исследований методом сенсорного анализа и обработкой данных с использованием современных математических методов.

В числе инструментов, доступных виноделу для управления сенсорным профилем продукции, следует выделить сенсорный анализ винограда и применение штаммов дрожжей, формирующих необходимый сенсорный профиль вина. Сенсорный анализ винограда (Berry sensory analysis, BSA) был разработан более 10 лет назад [7] и в последние годы стал широко применяться по всему миру. Этот метод основан на анализе составных частей виноградной ягоды (кожицы, мякоти и косточек) с помощью визуального наблюдения, оценки аромата, текстуры и вкуса. Данный метод дополняет традиционные методы химического анализа показателей зрелости и является объективным только в условиях системного подхода к отбору проб и оценке результатов, требующей применения специализированной лаборатории и панели из подготовленных дегустаторов. Наличие специалистов высокой квалификации и соответствующего метода исследования с математической обработкой данных позволяет пред-

сказывать органолептические характеристики будущего вина и исключать переработку винограда, пораженного болезнями и вредителями [8].

Еще одним современным инструментом управления сенсорным профилем вина является применение штаммов дрожжей с заданными свойствами. На рынке доступны штаммы дрожжей, способные к биосинтезу различных компонентов, обуславливающих специфические оттенки аромата (цитрусовый, аромат тропических фруктов, пряностей и др.). Некоторые из этих оттенков чрезвычайно привлекательны для потребителей, однако применение дрожжей по стандартной методике не гарантирует их развитие в готовом вине [9]. Решаясь на модификацию сенсорного профиля с помощью специфического штамма дрожжей, винодел должен понимать все возможные последствия изменения привычного профиля вина для его имиджа в глазах потребителя. Поэтому любые эксперименты с дрожжами требуют тщательного исследования рынка вин методами сенсорного анализа с целью выбора дескрипторов для проведения потребительских исследований, после которого проводится представительное потребительское исследование с целью выявления предпочтений среди предложенных дескрипторов. После этого формулируется техническое задание поставщику дрожжей с организацией производственных испытаний в сезон виноделия, сопровождающихся исследованием с помощью идентичных методик сенсорного анализа. Выявление у опытных образцов вин заданных органолептических характеристик является основанием для их вывода на рынок в соответствии с первоначальной концепцией.

Широкий спектр задач ставит перед сенсорным анализом подход к характеристике вин по контролю происхождения. В последние годы простая декларация принадлежности вин к определенному, пусть даже престижному, терруару, не является достаточным основанием для покупки в глазах потребителей. Приобретая вина наименований, контролируемых по происхождению, современный потребитель хочет получить узнаваемый сенсорный профиль, состоящих из привлекательных характеристик, причем узнаваемость должна сохраняться вне зависимости от года урожая. Установлено, что при покупке вина определённого терруара потребитель считает, что данное вино должно существенно отличаться от вин других терруаров по органолептическим характеристикам [10]. Соответственно, перед производителем стоит задача понимания ожиданий потребителя от его продукции и создания ожидаемого сенсорного профиля в готовом вине. Ее решение требует системного подхода к анализу данных, полученных методом сенсорного анализа и их математической обработки. Различия между образцами выявляются с помощью алгоритма ANOVA, тогда как включение/невключение вин в группы с идентичным профилем осуществляется на основании результатов метода кластерного анализа. Итогом подобных исследований является формулирование перечня характеристик вин, определяющий

специфичность вин данного терруара, субрегиона или региона, позволяющее предложить потребителю продукт с желательными для него свойствами, отличающимися узнаваемостью и воспроизводимостью [2, 10].

Очевидно, что решение задач, стоящих перед сенсорным анализом на новом этапе развития глобальной винодельческой отрасли, требует принципиально нового подхода. Обеспечение материальной и технологической базы для проведения исследований на новом уровне требует значительных ресурсов, сосредоточение которых на отдельно взятом предприятии представляется затруднительным. В этой связи целесообразно создание независимой экспертной лаборатории сенсорного анализа, в которой применение существующих инструментов и методов сенсорного анализа должно быть дополнено современными методами описания органолептического профиля продуктов и математической обработки результатов. Аналитическое сопровождение результатов должно обеспечивать глубокое понимание поведения потребителей и взаимосвязь потребительских предпочтений и органолептического профиля вин, достигаемое с применением современных аналитических алгоритмов, включая методы искусственного интеллекта. Для объективного анализа результатов в лаборатории предусмотрен инструментарий для поиска закономерностей в больших массивах данных на основе методов статистики и искусственного интеллекта, позволяющий решить конфликт между естественным экспертным описанием органолептических показателей и математическим представлением. Этот инструментарий включает подходы BIG DATA и DEEP LEARNING, а также современные методы принятия решения, основанные на подходе т.н. «мягких вычислений» (SOFT COMPUTING). Планируемое программное обеспечение лаборатории будет включать пакет стандартизованных статистических решений для широкого спектра продуктов в соответствии со стандартами ISO, онлайн-платформу для удаленной работы панелей, базу данных продуктов и дескрипторов, базу данных экспертов с возможностью оптимизации отбора при формировании панели, аналитические пакеты, канал на Youtube и видеоблоги. Лаборатория ориентирована на выполнение следующего спектра исследований:

- исследования продукции виноделия дискриминационными методами;
- исследования продукции виноделия дескриптивными методами;
- комплексные исследования потребительских предпочтений;
- комплексные исследования поведения потребителей.

Оказываемые лабораторией услуги предусматривают получение ответов на ряд принципиально важных вопросов, возникающих при разработке, производстве и продвижении продуктов (табл. 2).

Таблица 2 – Основные вопросы исследований с помощью методов сенсорного анализа

Вопрос	Группа методов	Результат
Отличается ли исследуемый продукт от конкурентов?	Дискриминационные тесты	Определение различий между продуктами методами сенсорного анализа
Как исследуемый продукт отличается от конкурентов?	Гибридный дескриптивный анализ	Идентификация значимых характеристик продукта в данной продуктовой категории
Является ли продукт предпочтительным?	Карта предпочтений и категорийная оценка	Бенчмаркинг продукта в категории с идентификацией свободного пространства на рынке
Какие характеристики продукта являются основными в данной продуктовой категории?	Экспресс-профилирование	Обеспечение экспрессного сенсорного картирования продукта с позиций стоимости и эффективности затрат
С каким продуктом мы продолжаем развиваться?	Тестирование с обсуждением за круглым столом и продуктовый скрининг	Сужение круга продуктов, намеченных к запуск в ходе рабочей встречи команды маркетологов и разработчиков
Как долго может храниться продукт без потери свойств?	Исследования продуктов, выдержанных в течение заданного срока	Получение информации об изменении сенсорных характеристик продукта в течение срока хранения, включая хранение в экстремальных условиях
Как сенсорные характеристики продукта развиваются с течением времени?	Исследования изменения интенсивности сенсорных характеристик в течение заданного срока	Понимание направления и степени изменения сенсорных характеристик продуктов в зависимости от времени хранения (выдержки)

Услуги лаборатории сенсорного анализа предоставляются по следующим направлениям:

Подготовка панелей для исследований методом сенсорного анализа

- Обучение руководителей панелей
- Обучение участников панелей

Проведение исследований методом сенсорного анализа

- Разработка технического задания на исследования с применением методов сенсорного анализа
- Разработка плана исследования с применением методов сенсорного анализа
- Проведение исследования на базе экспертной панели, включая обработку результатов и подготовку отчета (дискриминационные методы, дескриптивные методы)
- Проведение исследования на базе потребительской панели, включая обработку результатов и подготовку отчета (дескриптивные методы, дискриминационные методы)

Консультационные услуги

- Исследование поведения потребителей
- Исследование потребительских предпочтений
- Разработка инновационной стратегии
- Разработка продуктовой стратегии,
- Разработка концепции продуктовой линейки/нового продукта
- Разработка технического задания по разработке/модификации продукта
- Разработка программы исследований по разработке нового продукта
- Разработка программы исследований влияния технологических режимов, сырья, вспомогательных материалов на сенсорные характеристики продукта

- Оценка сенсорных характеристик опытных образцов продуктов в ходе разработки
- Оценка соответствия опытных образцов продукта техническому заданию на разработку
- Оценка соответствия производственных образцов продукта техническому заданию на разработку
- Исследование поведения продукции в течение срока хранения

Лаборатория является партнером аналогичных организаций в зарубежных странах-лидерах глобальной винодельческой отрасли. Проведение межлабораторных испытаний обеспечивает получение достоверных данных. Независимость лаборатории гарантирует объективность результатов для всех участников рынка винодельческой продукции, позволяя вывести национальную винодельческую отрасль на новый уровень качества, знаний о продукте и понимания рынка, включая глобальный рынок.

Выводы. Сенсорный анализ предоставляет в распоряжение специалистов по маркетингу, разработкам и технологии производства винодельческой продукции мощные инструменты исследования потребительских предпочтений, поведения потребителей, сенсорных характеристик продукта и путей их достижения в реальном производстве. Современные алгоритмы анализа данных позволяют прогнозировать реакцию потребителей на продукты с заданными свойствами и оценивать значимость отдельных показателей с позиций потребительских предпочтений. Одной из основных сфер применения новых подходов к сенсорному анализу винодельческой продукции является исследование сенсорных профилей вин,

относящихся к категории наименований, контролируемых по происхождению. Обработка данных позволяет группировать вина по группам характеристик, типичных для данного региона, субрегиона или терруара, что позволяет выявлять характерные особенности конкретной группы вин и транслировать эту информацию потребителям. Для обеспечения проведения исследований методами сенсорного анализа на современном уровне целесообразна концентрация исследовательских методик и

технологий обработки/анализа данных в лаборатории сенсорного анализа, располагающей квалифицированными экспертами и соответствующим оборудованием. Спектр услуг, оказываемых такой лабораторией предприятиям винодельческой отрасли, позволит им выйти на новый уровень понимания потребителей и качества производимой продукции, повышая ее конкурентоспособность в условиях ожесточающейся конкуренции на локальном и глобальном рынке.

Список литературы:

1. Robinson, J. The Oxford Companion To Wine [Text] / J. Robinson. – Oxford University Press, 2006. doi: [10.1093/acref/9780198609902.001.0001](https://doi.org/10.1093/acref/9780198609902.001.0001)
2. Ткаченко, О. Б. Особенности ароматов белых вин из автохтонных сортов винограда Западной Европы и Украины [Текст] / О. Б. Ткаченко, О. В. Тринкаль // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 10 (74). – С. 40–45. doi: [10.15587/1729-4061.2015.40069](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40069)
3. Zoecklein, B. W. Wine Analysis and Production [Text] / B. W. Zoecklein, K. C. Fugelsang, B. H. Gump, F. S. Nury. – Springer US, 1995. – 621 p. doi: [10.1007/978-1-4757-6978-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6978-4)
4. Ткаченко, Т. І. Розробка моделі сенсорного контролю якості на харчових підприємствах [Текст] / Т. І. Ткаченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – Т. 5, № 6 (59). – С. 53–56. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/4591/4253>
5. Эрл, М. Разработка пищевых продуктов [Текст] / М. Эрл, П. Эрл, А. Андерсон. – СПб.: Профессия, 2004. – 384 с.
6. Чугунова, О. В. Использование методов дегустационного анализа при моделировании рецептур пищевых продуктов с заданными потребительскими свойствами [Текст] / О. В. Чугунова, Н. В. Заворохина. – Екатеринбург, 2010. – 151 с.
7. Winter, E. Winegrape sensory assessment in Australia [Text] / E. Winter, J. Whiting, J. Rousseau. – Winetitles, Adelaide, South Australia, 2004.
8. Tkachenko, O. Influence of viticultural practices on the sensory characteristics of wine grape varieties [Text] / O. Tkachenko, A. Pashkovskiy, A. Shtirbu // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, Issue 10 (86). – P. 49–56. doi: [10.15587/1729-4061.2017.98423](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.98423)
9. Saberi, S. Impact of mixed *S. cerevisiae* strains on the production of volatiles and estimated sensory profiles of Chardonnay wines [Text] / S. Saberi, M. A. Cliff, H. J. J. van Vuuren // Food Research International. – 2012. – Vol. 48, Issue 2. – P. 725–735. doi: [10.1016/j.foodres.2012.06.012](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.06.012)
10. Gomes, L. S. Sensory profile characterization and typicality assessment of PDO “Bairrada” and PGI “Beira Atlântico” red wines [Text] / L. S. Gomes, A. José-Coutinho, A. G. da Silva, J. M. Ricardo-da-Silva // Ciência e Técnica Vitivinícola. – 2016. – Vol. 31, Issue 2. – P. 73–87. doi: [10.1051/ctv/20163102073](https://doi.org/10.1051/ctv/20163102073)

Bibliography (transliterated):

1. Robinson, J. (2006). The Oxford Companion To Wine. Oxford University Press. doi: [10.1093/acref/9780198609902.001.0001](https://doi.org/10.1093/acref/9780198609902.001.0001)
2. Tkachenko, O. B., Trinkal', O. V. (2015). The aroma peculiarities of some white wines from autochthonous grapes varieties from Western Europe and Ukraine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (10 (74)), 40–45. doi: [10.15587/1729-4061.2015.40069](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40069)
3. Zoecklein, B. W., Fugelsang, K. C., Gump, B. H., Nury, F. S. (1995). Wine Analysis and Production. Springer US, 621. doi: [10.1007/978-1-4757-6978-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6978-4)
4. Tkachenko, T. I. (2012). Development of the model of sensory control of quality at food enterprises. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (6 (59)), 53–56. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/4591/4253>
5. Ehrh, M., Ehrh, R., Anderson, A. (2004). Razrabotka pishchevyh produktov. Sankt-Peterburg: Professiya, 384.
6. Chugunova, O. V., Zavorohina, N. V. (2010). Ispol'zovanie metodov degustacionnogo analiza pri modelirovani receptur pishchevyh produktov s zadannymi potrebitel'skimi svoystvami. Ekaterinburg, 151.
7. Winter, E., Whiting, J., Rousseau, J. (2004). Winegrape sensory assessment in Australia. Winetitles, Adelaide, South Australia.
8. Tkachenko, O., Pashkovskiy, A., Shtirbu, A. (2017). Influence of viticultural practices on the sensory characteristics of wine grape varieties. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (10 (86)), 49–56. doi: [10.15587/1729-4061.2017.98423](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.98423)
9. Saberi, S., Cliff, M. A., van Vuuren, H. J. J. (2012). Impact of mixed *S. cerevisiae* strains on the production of volatiles and estimated sensory profiles of Chardonnay wines. Food Research International, 48 (2), 725–735. doi: [10.1016/j.foodres.2012.06.012](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.06.012)
10. Gomes, L. S., José-Coutinho, A., da Silva, A. G., Ricardo-da-Silva, J. M. (2016). Sensory profile characterization and typicality assessment of PDO “Bairrada” and PGI “Beira Atlântico” red wines. Ciência e Técnica Vitivinícola, 31 (2), 73–87. doi: [10.1051/ctv/20163102073](https://doi.org/10.1051/ctv/20163102073)

Поступила (received) 16.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Лабораторія сенсорного аналізу як сучасний інструмент в технології вина/ Іукурідзе Е. Ж., Ткаченко О. Б., Кисельов С. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.83–89. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Лаборатория сенсорного анализа как современный инструмент в технологии вина/ Иукуридзе Э. Ж., Ткаченко О. Б., Киселёв С. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.83–89. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Laboratory of sensory analysis as modern instrument in wine-making technology/ Iukuridze E., Tkachenko O., Kiselev S. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – No 20 (1242). – P.83–89. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Іукурідзе Елдар Жораєвич – кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології вина та енології, Одеська національна академія пищевих технологій, ул. Канатна, 112, г. Одеса, Україна, 65039; e-mail:

Іукурідзе Елдар Жораєвич – кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології вина та енології, Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039; e-mail: office@shabo.ua.

Iukuridze Eldar – PhD in technical science, Department of Technology wine and Oenology, Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatnaya str., Odessa, 65039, Ukraine; e-mail: office@shabo.ua.

Ткаченко Оксана Борисівна – доктор технічних наук, доцент, кафедра безпеки, експертизи і товарознавства, Одеська національна академія пищевих производств, ул. Канатна, 112, г. Одеса, Україна, 65039; e-mail: obtkachenko@gmail.com.

Ткаченко Оксана Борисівна – доктор технічних наук, доцент, кафедра безпеки, експертизи і товарознавства, Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039; e-mail: obtkachenko@gmail.com.

Tkachenko Oksana – Doctor of Technical Science, Assistant Professor, Department of Security, Examination and Commodity, Odessa National Academy of Food Technologies Kanatna str., 112, Odessa, Ukraine, 65039

Кисельов Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології ресторанного і оздоровчого харчування, Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039; e-mail: sergei.kiselev@gmail.com.

Кисельов Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, старший преподаватель кафедри технології ресторанного і оздоровчого харчування, Одеська національна академія пищевих технологій, ул. Канатна, 112, г. Одеса, Україна, 65039; e-mail: sergei.kiselev@gmail.com.

Kyselov Sergii – PhD in technical sciences, senior lecturer of Department of Technology of Restaurant and Healthy Nutrition, Odessa National Academy of Food Technologies, Kanatnaya str. 112, Odessa, Ukraine, 65039

УДК 532.546

С. Ю. ГАСЫМОВ, Р. С. МАМЕДОВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА И ВОДЫ НА ОСНОВЕ РАЗНОСТНО-ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА В ПОДВИЖНЫХ СЕТКАХ

Как известно, одномерные и двумерные задачи вытеснения газа водой или воды газом с учетом капиллярных сил и относительных фазовых проницаемостей, ранее исследовались во многих работах [1–4]. Но в этих работах не учитывались некоторые важные свойства газа, а именно- сверхсжимаемость газа, эффект проскальзывания и зависимости вязкости газа от давления. В связи с этим численное исследование таких задач имеет важный теоретический и практический интерес.

Ключевые слова: капиллярные силы, многофазная фильтрация, подвижная сетка, эффект проскальзывания, закон Дарси, метод прогонки, метод Ньютона, газо-водяная смесь.

Як відомо, одномірні і двовимірні завдання витіснення газу водою або води газом з урахуванням капілярних сил і відносних фазових проницаемостей, раніше досліджувалися у багатьох роботах [1–4]. Але в цих роботах не враховувалися деякі важливі властивості газу, а саме-сверхсжимаемость газу, ефект прослизання і залежності в'язкості газу від тиску. У зв'язку з цим чисельне дослідження таких задач має важливе теоретичне і практичне інтерес.

Ключові слова: капілярні сили, багатофазна фільтрація, рухлива сітка, ефект прослизання, закон Дарсі, метод прогін, метод Ньютона, газо-водний суміш.

As is known, one- dimensional and two – dimensional problems of gas displacement by water or water displacement by gas taking into account capillary forces and relative phase permeabilities previously studied in many works [1–4]. But in these works were not taken into account some important properties of the gas namely super compressibility of gas, slipping effect and dependence of gas viscosity on pressure.

In this connection, numerical investigation of such problems has an important theoretical and practical interest. In this work, the numerical simulation of the process of gas and water filtration on the basis of the difference –iterative method in moving grids taking into account capillary forces, super compressibility of gas, slipping effect and dependence of gas viscosity on pressure is investigated. The numerical algorithm for investigation of influence of the factors mentioned above on the filtration process was developed.

Keywords: capillary forces, multiphase filtration, moving mesh (grid), slipping effect, Darcy's law, tridiagonal matrix algorithm, Newton's method, gas- water mixer.

Введение. Как известно, при течение газов через пористые материалы возникает явление проскальзывания газа вдоль стенок пор, в результате которого проницаемость зависит от давления [2]

$$K = K_0 \left(1 + \frac{B}{P_1}\right) \quad (1)$$

где K_0 – проницаемость породы по отношению к слабосжимаемой жидкости, P_1 – давление в газовой фазе,

B – некоторая константа, выражающаяся характеристиками газа и пористой среды.

Кроме того, задачи многофазной фильтрации обладают рядом специфических особенностей (например, учет капиллярных сил и относительных фазовых проницаемостей, сверхсжимаемости газа, зависимости вязкости газа от давления и т.д.), что зачастую не позволяют при численном решении использовать традиционные конечно – разностные методы.

Поэтому появляются необходимость в разработке разностных схем в адаптивных сетках [1], позволяющих учитывать особенность решения.

Постановка задачи. Пусть в круговом пласте с радиусом L с непроницаемой кровлей и подошвой происходит фильтрация газа-водяной смеси. Предположим, что пласт вскрыт одной центральной эксплуатируемой скважиной с радиусом r_c , вода и газ взаимно не растворимы, вязкость воды постоянна, плотность является линейной функцией давления и для каждой из фаз справедлив обобщенный закон Дарси. Тогда распределения давлений воды и газа,

а также капиллярного давления описывается системой уравнений

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_1 \frac{\partial P_1}{\partial r} \right) = mr \left[C_{11}(P_1, S) \frac{\partial P_1}{\partial t} + C_{12}(P_1, S') \frac{\partial P_k}{\partial t} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_2 \frac{\partial P_2}{\partial r} \right) = rm \left[C_{12}(S, \rho_2') \frac{\partial P_2}{\partial t} + C_{22}(S', \rho_2) \frac{\partial P_k}{\partial t} \right] \quad (3)$$

$$P_1 - P_2 = P_k(S), \quad S \equiv S_2, S_1 + S_2 = 1, \\ (r, t) \in \Omega_t = \{(r, t) : r_c < r < L, 0 < t \leq T\}.$$

Здесь

$$\lambda_1 = \lambda_1(P_1, S, B) = K(r) \frac{f_1(S)(P_1 + B)}{\mu_1(P_1)Z(P_1)},$$

$$\lambda_2 = \lambda_2(P_2, S) = K(r) \frac{f_2(S)\rho_2(P_2)}{\mu_2},$$

$$C_{11}(P_1, S) = \frac{1-S}{Z^2(P_1)} (Z(P_1) - P_1 Z'(P_1)),$$

$$C_{12}(P_1, S') = -\frac{P_1}{Z(P_1)} S', \quad C_{21} = S \rho_2', \quad C_{22} = S' \rho_2,$$

$$S' = \frac{dS}{dP_k}, \quad \rho_2 = a p_2 + b,$$

P_2 – давление в водяной фазе, S – водонасыщенность, $P_k(S)$ – капиллярное давление, $Z(P_1)$ – коэффициент сверхсжимаемости газа, m – пористость, μ_1 и μ_2 – динамические вязкости газа и воды, $f_1(S)$ и $f_2(S)$ – относительные фазовые проницаемости, ρ_2 – плотность воды.

Начальные условия: считается, что до начала вытеснения фазы находятся в состоянии капиллярного равновесия:

$$P_1(r, 0) = P_1^0(r), \quad P_2(r, 0) = P_2^0(r), \quad r_c \leq r \leq L \quad (4)$$

Граничные условия: при $r = L$ предполагаем, что в пласт поступает только вода и поток газа отсутствует:

$$\begin{cases} \lambda_1 \frac{\partial P_1}{\partial r} = 0, \\ P_2 = \phi(t), \quad r = L, \quad 0 < t \leq T \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $q(t) = \frac{Q(t)}{S \cdot H}$ ($Q(t)$ – суммарная скорость

отбора), S – площадь поперечного сечения пласта при $r = r_c$, H – мощность пласта.

На эксплуатационной скважине предполагаем, что отбирается газ-водяная смесь, причем газ и вода отбираются в отношении пропорциональном их подвижности

$$\begin{cases} (\lambda_1 + \lambda_2) \frac{\partial P}{\partial r} = q(t), \\ \frac{\partial P_k}{\partial r} = 0, \quad r = r_c, \quad 0 < t \leq T. \end{cases} \quad (6)$$

В качестве искомых функций выберем $P(r, t) \equiv P_2(r, t)$ и $P_k(r, t)$. После введение безразмерных величин задачу (2) – (6) можно записать так:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda_1 \left(\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial P_k}{\partial r} \right) \right] = rm \left[C_{11} \frac{\partial P}{\partial t} + (C_{11} + C_{12}) \frac{\partial P_k}{\partial t} \right], \\ \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda_2 \frac{\partial P}{\partial r} \right] = rm \left[C_{21} \frac{\partial P}{\partial t} + C_{22} \frac{\partial P_k}{\partial t} \right]. \end{cases} \quad (7)$$

$$(r, t) \in \Omega_t = \{(r, t) : r_c < r < L, 0 < t \leq T\} \quad (8)$$

$$P(r, 0) = P_r^0, \quad P_k(r, 0) = P_k^0(r), \quad t = 0, \quad r_c \leq r \leq L$$

$$\begin{cases} (\lambda_1 + \lambda_2) \frac{\partial P}{\partial r} = q(t), \\ \frac{\partial P_k}{\partial r} = 0, \quad r = r_c, \quad 0 < t \leq T. \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial P_k}{\partial r} \right) = 0, \\ P = \phi(t), \quad r = L, \quad 0 < t \leq T. \end{cases} \quad (10)$$

Предполагая существование и единственности решения задачи (7) – (10), для её численного решения применяем разностно – итерационный метод в подвижных сетках [1]. С этой целью в области Ω_t введем подвижную пространственно-временную сетку

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_{i,n} &= \{(r_{i,n}, t_n) : r_{i,n} = r_{i-1,n} + h_{i,n}, \quad i = \overline{1, m-1}, \\ r_{0,n} &= r_c, \quad r_{m,n} = L; \\ t_n &= t_{n-1} + \tau_n, \quad t_0 = 0, \quad t_N = T, \quad n = \overline{1, N}\} \end{aligned}$$

На сетке $\hat{\omega}_{i,n}$ с помощью неявной консервативной схемой задачу (7)–(10) аппроксимируем следующей разностной задачей:

$$\begin{cases} \left[\left(r \hat{\lambda}_1^{(-)} P_r \right)_r + \left(r \hat{\lambda}_1^{(-)} \hat{P}_{k,r} \right)_r \right]_r = \hat{r} m \left[C_{11} \hat{P}_t + (C_{11} + C_{12}) \hat{P}_{k,t} \right]_r, \\ \left[r \hat{\lambda}_1^{(-)} \hat{P}_r \right]_r = \hat{r} m \left[C_{21} \hat{P}_t + C_{22} \hat{P}_{k,t} \right]_r, \\ 1 \leq i \leq m-1, \quad 1 \leq n \leq N-1 \end{cases} \quad (11)$$

$$P(r_i, 0) = P_i^0, \quad P_k(r_i, 0) = P_{k,i}^0, \quad 0 \leq i \leq m, \quad n = 0 \quad (12)$$

$$\begin{cases} [(\lambda_1 + \lambda_2) \hat{P}_r]_0 = \hat{q} \\ (\hat{P}_{k,r})_0 = 0, \quad i = 0, \quad 0 < n \leq N-1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 (\hat{P}_r + \hat{P}_{k,r})_m = 0 \\ \hat{P}_m = \hat{\phi}, \quad i = m, \quad 0 < n \leq N-1 \end{cases} \quad (14)$$

Здесь введены обозначения:

$$(r\lambda_\alpha)_i^{(-)} = r_{i-\frac{1}{2}} \lambda_{\alpha, i-\frac{1}{2}}, \quad \hat{P}_i = P_i^{n+1}, \quad P_i = P_i^n,$$

$$((r\lambda_\alpha)^{(-)} P_r)_{\hat{r},i} = h_i \left[(r\lambda_\alpha)_{i+\frac{1}{2}} P_{r,i} - (r\lambda_\alpha)_{i-\frac{1}{2}} P_{\bar{r},i} \right]$$

$$P_{\bar{r},i} = h_i^{-1} (P_i - P_{i-1}), \quad h_i = \frac{1}{2} (h_i + h_{i+1}),$$

$$\hat{P}_{\bar{r},i} = \frac{\hat{P}_i - P_i}{\tau_{n+1}}, \quad \alpha = 1, 2.$$

Для линеаризации нелинейных коэффициентов применяется метод Ньютона, полученная система линейных уравнений решается методом матричной прогонки [5, 7]. Итерации продолжаются до выполнения условий

$$\begin{cases} \max_i \left| P_{i,n+1}^{(l+1)} - P_{i,n+1}^{(l)} \right| < \varepsilon_1, \\ \max_i \left| P_{k,i,n+1}^{(l+1)} - P_{k,i,n+1}^{(l)} \right| < \varepsilon_2, \quad 0 \leq i \leq m. \end{cases}$$

где ε_1 и ε_2 – заданные достаточно малые положительные числа.

Результаты численных расчетов. В приводимых ниже результатах использованы следующие исходные данные:

$$m = 0.2, \quad H = 10 \text{ м}, \quad L = 100 \text{ м}, \quad r_c = 0.1 \text{ м}, \quad T_0 = 10^8 \text{ сек},$$

$$B = 6.8 \text{ атм}, \quad \rho_1 = 0.063 \text{ г/см}^3, \quad \mu_2 = 0.01 \text{ пуаз},$$

$$\phi(t) = 100 \text{ атм}, \quad P_0 = 100 \text{ атм}, \quad a = 0.0103, \quad B = 0.9999,$$

$$q = 10000, 150000 \text{ нм}^3 / \text{сут}, \quad \rho_2^0 = 1 \text{ г/см}^3, \quad \mu_0 = 1 \text{ пуаз}.$$

Для оценки влияния коэффициента сверхсжимаемости газа на процесс фильтрации использовалось зависимость

$$Z(p) = \frac{1}{1 + \alpha p},$$

где коэффициент α зависит от состава и температуры газа и $\alpha \approx (185 - 0.5 T) \cdot 10^{-4} \text{ атм}^{-1}$, T – абсолютная температура.

Для исследования влияния проскальзывания на процесс фильтрации в табл. 1 представлены распределения давления газа по пласту для значений проницаемости 25 MD и 5 MD. Здесь вариант 1 – соответствует случаю $Z=1, \mu_1 = \text{const}, B=0$, а вариант 2 – соответствует случаю $B \neq 0, Z=1, \mu_1 = \text{const}$.

Таблица 1 – Распределение давление газа по пласту

К	25 MD		5 MD	
	1	2	1	2
г	варианты			
0.001	0.9782	0.9815	0.7669	0.7936
0.002	0.9806	0.9836	0.7972	0.8196
0.003	0.9820	0.9849	0.8148	0.8348
0.004	0.9830	0.985	0.8272	0.8455
0.005	0.9838	0.9865	0.8366	0.8538
0.006	0.9844	0.9871	0.8443	0.8605
0.008	0.9854	0.9880	0.8562	0.8709
0.012	0.9868	0.9892	0.8726	0.8853
0.020	0.9886	0.9908	0.8926	0.9030
0.036	0.9906	0.9926	0.9149	0.9227
0.068	0.9927	0.9946	0.9382	0.9485
0.100	0.9940	0.9958	0.9521	0.9560
0.150	0.9954	0.9970	0.9662	0.9687
0.200	0.9963	0.9979	0.9758	0.9774
0.250	0.9971	0.9985	0.9827	0.9838
0.300	0.9976	0.9981	0.9881	0.9886
0.350	0.9981	0.9995	0.9922	0.9925
0.400	0.9989	0.9999	0.9954	0.9955
...	...	...	...	...
1.000	1.0003	1.0014	1.0062	1.0064

Из табл. 1 видно, что с уменьшением проницаемости влияние эффекта проскальзывания на падение давления растет. Это явление объясняется тем, что в малопроницаемых пластах нестационарный процесс

распространяется медленно, что приводит к быстрому истощению газа в окрестности скважины, т.е. уменьшению давления газа в этой окрестности, и, следовательно, увеличению эффекта проскальзывания в ней.

В табл. 2 приведены результаты расчетов для пластов с $k=500$ MD при $q=10000$ м³/сут. Здесь вариант 3 соответствует случаю $\mu_1 = \text{const}$, $Z = 1$, $B = 0$; а

вариант 4 – $\mu_1 = \mu_1(P)$, $Z = Z(P_1)$, $B \neq 0$. Сравнение результатов показывает, что в этом случае рассмотренные факторы на процесс вытеснения существенно не влияют.

Таблица 2 – Распределение водонасыщенности по пласту

t	0.12		0.24		0.48	
г \ варианты	3	4	3	4	3	4
1.000	0.9321	0.9320	0.9887	0.9875	0.9900	0.9900
0.980	0.9119	0.9118	0.9809	0.9795	0.9900	0.9900
0.964	0.8924	0.8924	0.9747	0.9732	0.9900	0.9900
0.932	0.8424	0.8423	0.9615	0.9597	0.9900	0.9900
0.900	0.7679	0.7672	0.9453	0.9424	0.9900	0.9900
0.850	0.2487	0.2486	0.8985	0.8939	0.9900	0.9900
0.800	0.2306	0.2306	0.8003	0.7996	0.9900	0.9900
0.750	0.2300	0.2300	0.2739	0.2681	0.9900	0.9900
0.700	0.2300	0.2300	0.2313	0.2311	0.9900	0.9881
0.650	0.2300	0.2300	0.2300	0.2300	0.9779	0.9753
0.600	0.2300	0.2300	0.2300	0.2300	0.9542	0.9530
0.550	0.2300	0.2300	0.2300	0.2300	0.8739	0.8721
0.500	0.2300	0.2300	0.2300	0.2300	0.3586	0.3147
0.450	0.2300	0.2300	0.2300	0.2300	0.2319	0.2316
0.400	0.2300	0.2300	0.2300	0.2300	0.2301	0.2300
...	...	...	...	...	...	...
0.001	0.2300	0.2300	0.2300	0.2300	0.2300	0.2300

Как показали численные расчеты, эти факторы наиболее сильно влияют на падение давления только вблизи скважины. На рис. 1 показано распределение давления газа вблизи эксплуатационной скважины в пласте с $k = 1$ мд в момент времени $t = 0.004$.

результат (кривые 1, 5), так как на стенке скважины полученные значения давления различаются почти на 18 атм. Легко можно видеть, что учет коэффициента $Z(p)$ уменьшает падение давления на стенке скважины на 6 атм (кривые 1, 2), зависимость $\mu_1(p)$ – на 8 атм (кривые 1, 3), а учет обоих факторов – на 12 атм (кривые 1, 4).

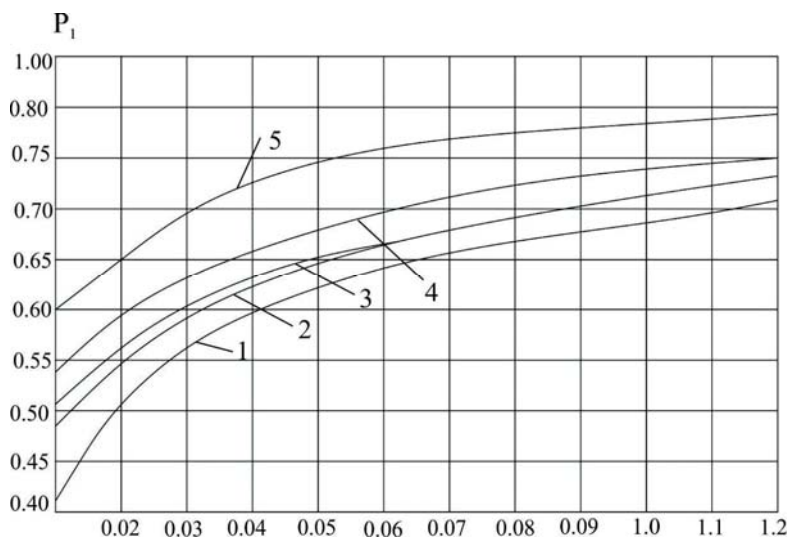


Рис. 1 – Кривые распределение давления газа для разных случаев

Из рис. 1 видно, что при прочих равных условиях учет этих факторов сильно влияет на полученный

подземных газохранилищ.

Выводы. Целью настоящих исследований является разработка эффективных численных методов решения класса одномерных задач многофазной фильтрации на основе разностно - итерационного метода в подвижных сетках, позволяющих учитывать особенности решения и основные реальные свойства газа. Разработан вычислительный алгоритм для решения поставленной задачи. Как показали проведенные численные расчеты, эти факторы наиболее сильно влияют на падение давления только вблизи скважины. Полученные численные результаты могут быть использованы при создании и эксплуатации

Список литературы:

1. Пирмамедов, В. Г. Об одном разностно – итерационном методе в подвижных сетках решения некоторых нелинейных задач теории фильтрации и теплопроводности [Текст] / В. Г. Пирмамедов. – Деп. в ВИНТИ, 1975. – № 2027-75.
2. Dranchuk, P. M. Non-Darcy Transient Radial Gas Flow Through Porous Media [Text] / P. M. Dranchuk, J. Flores // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1975. – Vol. 15, Issue 02. – P. 129–139. doi: [10.2118/4595-pa](https://doi.org/10.2118/4595-pa)

3. Бабаев, Т. А. Численное моделирование процессов нестационарной фильтрации газа и воды в пористой среде [Текст] / Т. А. Бабаев, Г. М. Мусаев, В. Г. Пирмамедов // Численное решение задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. – Новосибирск, 1977.
4. Мусаев, Г. М. Численное моделирование процессов двухфазной и трехфазной фильтрации на основе разностно-итерационного метода в подвижных сетках [Текст] / Г. М. Мусаев, В. Г. Пирмамедов, К. Ф. Ширинов // Динамика многофазных сред. – Новосибирск, 1983. – С. 223–227.
5. Самарский, А. А. Введение в теорию разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983.
6. Коротаев, Ю. П. Комплексная разведка и разработка газовых месторождений [Текст] / Ю. П. Коротаев, С. Н. Закиров. – М.: Недра, 1968. – 429 с.
7. Азиз, Х. Математическое моделирование пластовых систем [Текст] / Х. Азиз, Э. Сеттари. – М.: Недра, 1982. – 407 с.
8. Басниев, К. С. Подземная гидравлика [Текст] / К. С. Басниев, А. М. Власов, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. – М.: Недра, 1986. – 303 с.
9. Коротаев, Ю. П. Теория и проектирование разработки газовых и газоконденсатных месторождений [Текст] / Ю. П. Коротаев, С. Н. Закиров. – М.: Недра, 1981. – 296 с.
10. Баренблатт, Г. И. Движение жидкостей и газов в природных пластах [Текст] / Г. И. Баренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик. – М.: Недра, 1984. – 211 с.

Bibliography (transliterated):

1. Pirmamedov, V. G. (1975). Ob odnom raznostno – iteratsionnom metode v podvizhnykh setkah resheniya nekotorykh nelineynykh zadach teorii fil'tracii i teploprovodnosti. Dep. v VINITI, No. 2027-75.
2. Dranchuk, P. M., Flores, J. (1975). Non-Darcy Transient Radial Gas Flow Through Porous Media. Society of Petroleum Engineers Journal, 15 (02), 129–139. doi: [10.2118/4595-pa](https://doi.org/10.2118/4595-pa)
3. Babaev, T. A., Musaev, G. M., Pirmamedov, V. G. (1977). Chislennoe modelirovanie processov nestacionarnoi fil'tracii gaza i vody v poristoi srede. Chislennoe reshenie zadach fil'tracii mnogofaznoi neszhimaemoi zhidkosti. Novosibirsk.
4. Musaev, G. M., Pirmamedov, V. G., Shirinov, K. F. (1983). Chislennoe modelirovanie processov dvuhfaznoi i trekhfaznoi fil'tracii na osnove raznostno-iteratsionnogo metoda v podvizhnykh setkah. Dinamika mnogofaznykh sred. Novosibirsk, 223–227.
5. Samarskiy, A. A. (1983). Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem. Moscow: Nauka.
6. Korotaev, Yu. P., Zakirov, S. N. (1968). Kompleksnaya razvedka i razrabotka gazovykh mestorozhdeniy. Moscow: Nedra, 429.
7. Aziz, H., Settari, E. (1982). Matematicheskoe modelirovanie plastovykh sistem. Moscow: Nedra, 407.
8. Basniev, K. S., Vlasov, A. M., Kochina, I. N., Maksimov, V. M. (1986). Podzemnaya gidravlika. Moscow: Nedra, 303.
9. Korotaev, Yu. P., Zakirov, S. N. (1981). Teoriya i proektirovanie razrabotki gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy. Moscow: Nedra, 296.
10. Barenblatt, G. I., Entov, V. M., Ryzhik, V. M. (1984). Dvizhenie zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh. Moscow: Nedra, 211.

Поступила (received) 06.07.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельне моделювання процесу фільтрації газу і води на основі разностно-ітераційного методу в рухомих сітках/ Гасимов С. Ю., Мамедов Р. С. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.89–93. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Численное моделирование процесса фильтрации газа и воды на основе разностно-итерационного метода в подвижных сетках/ Гасимов С. Ю., Мамедов Р. С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.89–93. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Numerical simulation of the process of gas and water filtration on the basis of the difference - iterative method in moving grids/ Qasimov S. Y., Mammadov R. S. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.89–93. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Qasimov Sardar Yusub – PhD in Physics and Mathematics. Sci., Associate Professor of the Department "General and Applied Mathematics", Azerbaijan State University of Oil and Industry, Prospect. Azadlig, 20, Baku, Azerbaijan, AZ1010, E-mail: sardarkasumov1955@mail.ru

Гасимов Сардар Юсуб – кандидат фізико-математических наук, доцент кафедри “Общая и прикладная математика”, Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, пр-т. Азадлыг, 20, г. Баку, Азербайджан, AZ1010, e-mail: sardarkasumov1955@mail.ru

Гасимов Сардар Юсубов – кандидат фізико-математических наук, доцент кафедри "Загальна та прикладна математика", Азербайджанський державний університет Нафти і Промисловості, пр-т. Азадлыг, 20, м Баку, Азербайджан, AZ1010, e-mail: sardarkasumov1955@mail.ru

Mammadov Rashad Siradj – candidate of physical and mathematical sciences. Sci., Associate Professor of the Department "General and Applied Mathematics", Azerbaijan State University of Oil and Industry, Prospect. Azadlig, 20, Baku, Azerbaijan, AZ1010, E-mail: Rasadmammadov@mail.ru

Мамедов Рашид Сирадж – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры “Общая и прикладная математика”, Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, пр-т. Азадлыг, 20, г. Баку, Азербайджан, AZ1010, e-mail: rasadmammadov@mail.ru

Мамедов Рашид Сирадж – кандидат фізико-математических наук, доцент кафедри "Загальна та прикладна математика", Азербайджанський державний університет Нафти і Промисловості, пр-т. Азадлыг, 20, м Баку, Азербайджан, AZ1010, тел. : 050- 332 -98-18; e-mail: rasadmammadov@mail.ru

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

УДК 616-057-028.67]:616-084

Н. І. ГОДУН, О. М. МИЗДРЕНКО, М. А. БУЦ, Н. А. ХАРЧЕНКО**КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОФЕСІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ ТА ЇХ ПРОФІЛАКТИКА**

У статті висвітлено основні законодавчі і нормативні документи у сфері охорони здоров'я працюючих. Розкрито важливість профілактичного напрямку у вирішенні цього питання. Представлено гігієнічну характеристику професійних захворювань, їх класифікацію з урахуванням шкідливих факторів виробничого середовища та трудового процесу. Описано основні профілактичні заходи для запобігання негативному впливу виробничих шкідливостей на організм людини. Зокрема, приділено увагу засобам індивідуального захисту та організації медичних оглядів працюючих.

Ключові слова: умови праці, виробничі шкідливості, професійні захворювання, профілактика, засоби індивідуального захисту.

В статье отражены основные законодательные и нормативные документы в области охраны здоровья работающих. Раскрыто важность профилактического направления в решении этого вопроса. Представлена гигиеническая характеристика профессиональных заболеваний, их классификация с учетом вредных факторов производственной среды и трудового процесса. Описаны основные профилактические меры для предотвращения негативного влияния производственных вредностей на организм человека. В частности, уделено внимание средствам индивидуальной защиты и организации медицинских осмотров работающих.

Ключевые слова: условия труда, производственные вредности, профессиональные заболевания, профилактика, средства индивидуальной защиты.

The article reflects the main legislative and regulatory documents in the field of workers' health protection. The importance of preventive direction in the solution of this issue is revealed. The hygienic characteristics of occupational diseases, their classification taking into account the harmful factors of the production environment and the labor process are presented. In particular, five groups of occupational diseases have been identified that are associated with exposure to chemical, physical and biological factors caused by dust and caused by physical overloads and overvoltages. In addition, outside this aetiological systematics describes the professional allergic and oncological diseases, form the sixth and seventh groups. The basic preventive measures for prevention of negative influence of industrial hazards on the human body are described. Such as: hygienic rationing, technological, sanitary and technical, architectural and planning, organizational and therapeutic and preventive measures. In particular, attention was paid to the means of individual protection and the organization of medical examinations of workers.

Keywords: working conditions, industrial hazards, occupational diseases, prevention, personal protective equipment.

Вступ. У сучасному техногенному суспільстві піклування про людину, зміцнення її здоров'я та збереження високого рівня працездатності є одним з найважливіших державних завдань. За останнє десятиліття в Україні сформована правова основа спрямована на запобігання професійним захворюванням шляхом ідентифікації і контролю, зниження або ліквідації факторів ризику їх розвитку, та своєчасне виявлення і лікування ранніх проявів захворювання.

Ці питання окреслені в таких стратегічних документах держави, як Конституція України (1996) та «Основи Законодавства України про охорону здоров'я» (1992). Положення щодо реалізації конституційного права громадян на охорону їхнього життя і здоров'я у процесі трудової діяльності визначаються Законом України «Про охорону праці» (1992), Кодексом законів про працю (1972, 2001), законами «Про підприємство в Україні» (1991) тощо [1].

У 2001 р. видано Указ Президента України «Про невідкладні заходи щодо запобігання виробничому травматизму і професійним захворюванням», в якому відзначається, що створення безпечних і нешкідливих умов праці, збереження життя і здоров'я працюючих – важливий напрям реалізації соціальної політики. Значна увага приділена розв'язанню цих проблем у Концепції розвитку охорони здоров'я населення України (2001) в розділі «Державна політика у сфері охорони здоров'я».

Найважливішою особливістю охорони здоров'я працюючого населення є її профілактичний напрям. Гігієна праці є одним з розділів профілактичної медицини, що вивчає вплив на організм людини робочого

процесу і факторів виробничого середовища з метою наукового обґрунтування нормативів і засобів профілактики професійних захворювань та інших небажаних наслідків впливу умов праці на працюючих. Умови праці та ступінь її безпеки є одним із провідних чинників формування здоров'я як окремого працівника, так і великих трудових колективів. Несприятливі для здоров'я умови праці можуть бути причиною виникнення професійних захворювань та інвалідизації працівника.

На здоров'я працівників промислових підприємств (на відміну від інших контингентів населення), крім біологічних, сімейно-побутових, медико-профілактичних та екологічних факторів, істотно впливають виробничо-професійні умови. Встановлення зв'язку, що об'єктивно відображає залежність захворюваності працівників від санітарно-гігієнічних умов праці, – важлива передумова розроблення і впровадження профілактичних заходів, спрямованих на поліпшення стану здоров'я і підвищення продуктивності праці.

Аналіз літературних даних. Підвищення рівня безпеки праці можливо досягти шляхом проведення профілактичних заходів, розроблення та впровадження у діюче виробництво інноваційних технологій, нових видів засобів індивідуального та колективного захисту, відновлення та модернізації медичних служб на виробництві, підвищення рівня культури охорони праці шляхом пропагування безпеки праці та способів запобігання виникненню ризиків виробничого травматизму та професійних захворювань, формування відповідального ставлення працівників до особистої безпеки.

© Н. І. Годун, О. М. Миздренко, М. А. Буц, Н. А. Харченко. 2017

Ці питання знайшли відображення в ряді публікацій у галузі охорони праці, гігієни праці та виробничої санітарії за авторством ряду дослідників [4–10].

Незважаючи на значний науковий та практичний внесок вітчизняних науковців у вивчення різних аспектів професійної захворюваності і розроблення профілактичних заходів на державному рівні й на рівні підприємств, проблема мінімізації професійних захворювань в Україні залишається актуальною та потребує нових підходів до її вирішення.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення впливу виробничої діяльності стан здоров'я працюючих. Задачею дослідження є обґрунтування важливості профілактичного напрямку у попередженні професійних захворювань.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. висвітлити класифікацію професійних захворювань з урахуванням шкідливих виробничих факторів;

2. описати основні профілактичні заходи та засоби індивідуального захисту працюючих при недопустимих параметрах виробничого середовища.

Класифікація професійних захворювань та характеристика профілактичних заходів. Сучасний виробничий процес будь-якої технологічної складності в самих різних видах діяльності пов'язаний з ризиками для життя і здоров'я працівників, які у певних умовах призводять не тільки до травм, але й до захворювань. Працівники різних професій ризикують отримати те чи інше захворювання через умови праці на своєму робочому місці. Все залежить від виду трудової діяльності, особливостей того чи іншого виробництва, а також від рівня підготовленості і захищеності робочих місць відповідно до вимог охорони праці.

За даними Міжнародної організації праці, щороку реєструється 160 млн. нових випадків захворювань, пов'язаних з виробничою діяльністю. Щороку в світі у зв'язку з виробничою діяльністю помирає 1100000 осіб, з них 25 % – від впливу шкідливих і небезпечних речовин. Ця цифра перевищує кількість жертв дорожньо-транспортних пригод (999 тис.), воєн (502 тис.), насильства (563 тис.) та хворих на ВІЛ/СНІД (312 тис.) [2].

Професійні хвороби виникають в результаті специфічного впливу на організм несприятливих факторів виробничого середовища. Проте їх клінічні прояви часто не мають специфічних симптомів, і лише відомості про умови праці захворілого дозволяють встановити приналежність виявленої патології до категорії професійних хвороб. Лише деякі з них характеризуються особливим симптомокомплексом (тобто сукупністю симптомів, об'єднаних єдиним механізмом розвитку захворювання), обумовленим своєрідними рентгенологічними, функціональними, гематологічними і біохімічними змінами.

Згідно з наказом Міністерства охорони здоров'я України, Академії медичних наук України, Міністерства праці та соціальної політики України від 29 грудня 2000 р. №374/68/338 «Про затвердження інструкції про застосування переліку професійних захворювань» професійні захворювання – це захворювання,

що виникли внаслідок професійної діяльності та зумовлені виключно або переважно впливом шкідливих речовин і певних видів робіт та інших факторів, пов'язаних з роботою [3].

З гігієнічних позицій терміном «шкідливий виробничий фактор» позначають фактор виробничого середовища, дія якого на організм працюючого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження його працездатності.

Приблизно чверть всіх зайнятих в тій чи іншій мірі відчуває вплив так званих виробничих шкідливостей – шуму, вібрації, високої або низької температури, вдихає виробничі пари, гази, пил, має справу з небезпечними хімічними речовинами або виробами. Більше половини працівників вважають, що їхня праця негативно впливає на здоров'я, при цьому багато хто позбавлений можливості контролювати фактори, що визначають їх самопочуття на робочому місці [4].

Загальноприйнятою класифікацією професійних хвороб не існує. Характер професійних хвороб визначається особливостями механізму дії шкідливих виробничих факторів та їх поєднань на організм людини, а також силою і тривалістю дії. Класифікація професійних хвороб побудована за етіологічним принципом з урахуванням шкідливого виробничого фактора, який спричинив розвиток хвороби [5].

– Перша група викликана впливом хімічних факторів. Це гострі і хронічні інтоксикації, а також їх наслідки, що протікають з ізольованим або поєднаним ураженням різних органів і систем (наприклад, токсична анемія, гепатит, остеопороз та ін.);

– Друга група викликана впливом пилу (промислових аерозолів) і об'єднує такі захворювання, як пневмоконіози (наприклад, силікоз, силікатози, металлоконіози, пневмоконіози електрозварників і газорізальників, шліфувальників);

– Третя група викликана впливом фізичних факторів, таких як вібрація (наприклад, вібраційна хвороба), контактний ультразвук (вегетативний поліневрит), інтенсивний шум (зниження слуху за типом кохлеарного невриту, шумова хвороба), електромагнітне і розсіяне лазерне випромінювання (опіки шкіри, ураження сітківки), інтенсивне іонізуюче випромінювання (променева хвороба), значна і відносно швидка зміна атмосферного тиску (декомпресійна хвороба, гостра гіпоксія (нестача кисню)), несприятливі метеорологічні (мікрокліматичні) умови (перегрів, судомна хвороба, вегетативно-сенситивний поліневрит);

– Четверта група викликана фізичними перевантаженнями і перенапруженнями. Сюди відносяться захворювання периферичних нервів і м'язів – різноманітні неврити; захворювання опорно-рухового апарату – бурсити, деформуючий артроз; координаторні неврози – писальний спазм, інші форми функціональних дискінезій; захворювання голосового апарату – фонастенія та органу зору – астенія і міопія;

– П'ята група викликана дією біологічних факторів. Це інфекційні та паразитарні захворювання, такі як туберкульоз, бруцельоз, сип, сибірська виразка, дисбактеріоз, кандидамікоз шкіри і слизових оболонок, вісцеральний кандидоз та ін.

Поза цією етіологічною систематикою знаходяться професійні алергічні захворювання (кон'юнктивіт, захворювання верхніх дихальних шляхів, бронхіальна астма, дерматит, екзема), що утворюють шосту групу, і онкологічні захворювання (пухлини шкіри, сечового міхура, печінки, рак верхніх дихальних шляхів), що утворюють сьому групу [6].

Запобігання негативному впливу виробничих шкідливостей на організм людини передбачає проведення таких профілактичних заходів: гігієнічне нормування, технологічні, санітарно-технічні, архітектурно-планувальні, організаційні та лікувально-профілактичні заходи [7].

Гігієнічне нормування є розробкою і науковим обґрунтуванням певних гігієнічних стандартів, санітарних норм і правил щодо різних чинників виробничого середовища, які забезпечують нешкідливу, продуктивну та безпечну трудову діяльність.

Технологічні заходи спрямовані на зменшення впливу та повне виключення з трудового процесу шкідливих чинників за рахунок зміни технології виробництва запровадження безвідходних технологій, технологій замкнутого циклу, автоматизацію і механізацію виробничих процесів, дистанційне управління.

Санітарно-технічні заходи забезпечують зниження рівня впливу шкідливого чинника за рахунок використання спеціальних технічних пристроїв: герметизація обладнання, використання пило- та шумонепроникних кожухів, налагодження потужної місцевої вентиляції, використання захисних екранів.

Архітектурно-планувальні заходи знижують ступінь впливу шкідливих чинників за рахунок дотримання принципів функціонального зонування та локалізації об'єктів, що генерують шум та вібрацію, використання вібро-, шумоізолюючих та поглинаючих матеріалів, улаштування «плавучих фундаментів», озеленення території.

Організаційні заходи передбачають організацію раціонального режиму праці та відпочинку, обмеження часу контакту працівника зі шкідливими речовинами, проведення професійного добору, недопущення до роботи в шкідливих умовах дітей та жінок [8].

Лікувально-профілактичні заходи передбачають проведення:

- попередніх медичних оглядів під час прийому на роботу для встановлення фізичної та психологічної придатності до роботи за конкретно обраною спеціальністю;
- періодичних медичних оглядів осіб, які зайняті на роботах зі шкідливими або небезпечними умовами праці для динамічного спостереження за станом здоров'я працівників та виявлення ранніх ознак негативного впливу виробничих умов і шкідливостей на здоров'я;
- санітарно-курортного лікування працівників;
- активного виявлення контингентів, що підлягають: диспансерному спостереженню та взяттю їх на облік; повному комплексному обстеженню; активному лікуванню; динамічному спостереженню за станом здоров'я; наданню рекомендацій щодо працевлаштування; вжиттю заходів з профілактики захворювань та запобігання ускладненням. Контингенти диспансериз-

зованих поділяють на дві групи: перша – здорові та особи з факторами ризику, друга – хворі. Відбір осіб для диспансерного спостереження проводять за медичними показаннями (особи, що мають фактори ризику, хворі на окремі хронічні захворювання, що часто та тривало хворіють) та за соціальними (декретовані робітники, особи, що працюють у шкідливих і небезпечних умовах праці, особи з факторами ризику соціального характеру);

- профілактичних заходів оздоровчого спрямування; виробничої гімнастики, ультрафіолетового опромінення, вітамінотерапії, психологічного розвантаження, тренажерного пристосування;

- лікувально-профілактичного харчування працівників, до головних завдань якого слід віднести: запобігання надходження шкідливих речовин із травного каналу в організм, прискорення виведення шкідливих речовин із організму, захист окремих органів та систем від шкідливого впливу токсичних речовин, прискорення або сповільнення метаболізму токсичних речовин [9].

Використання засобів індивідуального захисту забезпечує захист окремих органів та систем від впливу шкідливих речовин. Засоби індивідуального захисту поділяють на: спецодяг та спецвзуття; засоби захисту рук, зокрема засоби механічного захисту – рукавиці, захисно-профілактичні засоби – пасти та мазі, очисники шкіри – мило та синтетичні мийні засоби; засоби індивідуального захисту органів дихання – фільтрувальні та ізолювальні респиратори та протигази; ізолювальні шлангові та автономні дихальні апарати, помислові протигази; засоби захисту голови – каски загального призначення, каски для роботи під землею, каски спеціального призначення, шоломи, повстані шоломи, косинки; засоби захисту очей і обличчя – захисні окуляри відкритого та закритого типів, герметичні окуляри, захисні маски; засоби захисту органа слуху – шоломи, антифони, вкладники [10].

Висновки. Розрізняють професійні хвороби від шкідливої дії: фізичних факторів (професійна туговухість, вібраційна хвороба, променева хвороба, кесонна хвороба, висотна хвороба тощо) хімічних речовин (гострі й хронічні отруєння), виробничого пилу (пневмоконіоз, бронхіт тощо), фізичного перенапруження і травматизації (неврити, бурсити, тощо), біологічних факторів (інфекційні та паразитарні хвороби).

Серед професійних хвороб відомі хвороби, у патогенезі яких провідну роль відіграє алергічний механізм. У виникненні професійних хвороб велику роль відіграє також зниження опірності організму.

Для правильної діагностики професійного захворювання недостатньо одних скарг потерпілого і симптомів його захворювання: необхідно ретельне вивчення санітарно-гігієнічних умов праці, анамнезу трудової діяльності хворого, його «професійного маршруту», що включає всі види робіт, що виконувалися їм з початку трудової діяльності. Тому на практиці достовірність діагнозу забезпечується ретельною диференціацією спостережуваної хвороби з аналогічними по клінічній симптоматиці захворюваннями непрофесійної етіології. Певною підмогою в підтвердженні діаг-

нозу служить виявлення в біологічних середовищах хімічної речовини, що викликає захворювання. У ряді випадків лише динамічне спостереження за хворим протягом тривалого терміну дає можливість остаточно вирішити питання про зв'язок захворювання з професією і зробити висновки про доцільність проведення тих чи інших профілактичних заходів.

Профілактика професійних хвороб полягає в систематичному поліпшенні умов праці та ліквідації шкідливо діючих факторів, зменшення їх дії до безпечного для здоров'я людини рівня тощо. З цією метою удосконалюють технологічні процеси, широко використовують санітарно-технічне обладнання, раціоналізують режим праці й відпочинку тощо.

Список літератури

1. Законодавство України про охорону праці. Т. 3 [Текст]. – К., 1995. – 572 с.
2. Солдак, І. І. Гігієна праці [Текст]: навч. пос. / І. І. Солдак, О. П. Яворовський, С. Т. Брюханова, Л. В. Павлович, О. І. Стовбун. – К.: Медицина, 2004. – 144 с.
3. Керб, Л. П. Основи охорони праці [Текст]: навч. пос. / Л. П. Керб. – К.: КНЕУ, 2003. – 215 с.
4. Жидецький, В. Ц. Основи охорони праці [Текст]: навч. пос. / В. Ц. Жидецький. – К.: Основа, 2003. – 151 с.
5. Дейнега, В. Г. Професійні хвороби [Текст] / В. Г. Дейнега. – К.: Вища школа, 1993. – 232 с.
6. Артамонова, В. Т. Профессиональные болезни [Текст]: учеб. / В. Т. Артамонова, Н. Н. Шаталов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 1988. – 416 с.
7. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст]: підр. / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський. – К.: Каравела, 2006. – 392 с.
8. Костюк, І. Ф. Професійні хвороби [Текст] / І. Ф. Костюк, В. А. Капустник. – К.: «Здоров'я», 2003. – 636 с.
9. Измеров, Н. Ф. Профессиональные заболевания. Т. 1, Т. 2 [Текст] / Н. Ф. Измеров, А. М. Монаenkova, Л. А. Тарасова. – М.: Медицина, 1996. – 336 с., 480 с.
10. Ткачук, К. Н. Основи охорони праці [Текст]: підр. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний. – К.: Основа, 2006. – 444 с.

Bibliography (transliterated):

1. Zakonodavstvo Ukrainy pro okhoronu pratsi. Vol. 3 (1995). Kyiv, 572.
2. Soldak, I. I., Yavorovskyi, O. P., Briukhanova, S. T., Pavlovych, L. V., Stovbun, O. I. (2004). Hihiyena pratsi. Kyiv: Medytsyna, 144.
3. Kerb, L. P. (2003). Osnovy okhorony pratsi. Kyiv: KNEU, 215.
4. Zhydetskyi, V. Ts. (2003). Osnovy okhorony pratsi. Kyiv: Osnova, 151.
5. Deineha, V. H. (1993). Profesiyni khvorboby. Kyiv: Vyshcha shkola, 232.
6. Artamonova, V. T., Shatalov, N. N. (1988). Professional'nye bolezni. Moscow: Medicina, 416.
7. Handziuk, M. P., Zhelibo, Ye. P., Khalimovskyi, M. O. (2006). Osnovy okhorony pratsi. Kyiv: Karavela, 392.
8. Kostyuk, I. F., Kapustnyk, V. A. (2003). Profesiyni khvorboby. Kyiv: «Zdorovia», 636.
9. Izmerov, N. F., Monaenkova, A. M., Tarasova, L. A. (1996). Professional'nye zabollevaniya. Vol. 1, Vol. 2. Moscow: Medicina, 336, 480.
10. Tkachuk, K. N., Khalimovskyi, M. O., Zatsarnyi, V. V. (2006). Osnovy okhorony pratsi. Kyiv: Osnova, 444.

Надійшла (received) 06.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Класифікація професійних захворювань та їх профілактика/ Н. І. Годун, О. М. Миздренко, М. А. Буц, Н. А. Харченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.94–98. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Классификация профессиональных заболеваний и их профилактика/ Н. И. Годун, О. М. Мыздренко, М. А. Буц, Н. А. Харченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.94–98. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Classification of professional diseases and their prevention/ N. Godun, O. Mizdrenko, M. Buzz, N. Kharchenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.94–98. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Годун Наталія Іванівна – кандидат історичних наук, доцент кафедри медико-біологічних дисциплін і валеології, ДВНЗ «Переяслав-Хмельницький державний педагогічний університет імені Григорія Сковороди», вул. Сухомлинського, 30, м. Переяслав-Хмельницький, Київської обл., Україна, 08401; valeologiya406@ukr.net.

Миздренко Оксана Миколаївна – кандидат історичних наук, доцент кафедри медико-біологічних дисциплін і валеології, ДВНЗ «Переяслав-Хмельницький державний педагогічний університет імені Григорія Сковороди», вул. Сухомлинського, 30, м. Переяслав-Хмельницький, Київської обл., Україна, 08401.

Буц Марина Анатоліївна – викладач кафедри медико-біологічних дисциплін і валеології, ДВНЗ «Переяслав-Хмельницький державний педагогічний університет імені Григорія Сковороди», вул. Сухомлинського, 30, м. Переяслав-Хмельницький, Київської обл., Україна, 08401.

Харченко Наталія Анатоліївна – викладач кафедри медико-біологічних дисциплін і валеології, ДВНЗ «Переяслав-Хмельницький державний педагогічний університет імені Григорія Сковороди», вул. Сухомлинського, 30, м. Переяслав-Хмельницький, Київської обл., Україна, 08401.

Годун Наталия Ивановна – кандидат исторических наук, доцент кафедры медико-биологических дисциплин и валеологии, ДВНЗ «Переяслав-Хмельницкий государственный педагогический университет имени Григория Сковороды», ул. Сухомлинского, 30, г. Переяслав-Хмельницкий Киевской обл., Украина, 08401

Миздренко Оксана Николаевна – кандидат исторических наук, доцент кафедры медико-биологических дисциплин и валеологии, ДВНЗ «Переяслав-Хмельницкий государственный педагогический университет имени Григория Сковороды», ул. Сухомлинского, 30, г. Переяслав-Хмельницкий Киевской обл., Украина, 08401.

Буц Марина Анатольевна – преподаватель кафедры медико-биологических дисциплин и валеологии, ДВНЗ «Переяслав-Хмельницкий государственный педагогический университет имени Григория Сковороды», ул. Сухомлинского, 30, г. Переяслав-Хмельницкий Киевской обл., Украина, 08401.

Харченко Наталья Анатольевна – преподаватель кафедры медико-биологических дисциплин и валеологии, ДВНЗ «Переяслав-Хмельницкий государственный педагогический университет имени Григория Сковороды», ул. Сухомлинского, 30, г. Переяслав-Хмельницкий Киевской обл., Украина, 08401.

Godun Natalia – PhD, associate professor of the department of medical and biological disciplines and valeology, State Pedagogical University «Pereyaslav-Khmelnitsky State Pedagogical University named after Gregory Skovoroda», st. Sukhomlynsky, 30, m. Pereyaslav-Khmelnitsky, Kyiv region, Ukraine, 08401; e-mail: valeologiya406@ukr.net.

Mizdrenko Oksana – PhD, Associate Professor of the Department of Medical and Biological Disciplines and Valeology, State Pedagogical University «Pereyaslav-Khmelnitsky State Pedagogical University named after Gregory Skovoroda», st. Sukhomlynsky, 30, m. Pereyaslav-Khmelnitsky, Kyiv region, Ukraine, 08401.

Buzz Marina – teacher of the department of medical and biological disciplines and valeology, State Pedagogical University «Pereyaslav-Khmelnitsky State Pedagogical University named after Gregory Skovoroda», st. Sukhomlynsky, 30, m. Pereyaslav-Khmelnitsky, Kyiv region, Ukraine, 08401.

Kharchenko Natalia – teacher of the department of medical and biological disciplines and valeology, State Pedagogical University «Pereyaslav-Khmelnitsky State Pedagogical University named after Gregory Skovoroda», st. Sukhomlynsky, 30, m. Pereyaslav-Khmelnitsky, Kyiv region, Ukraine, 08401.

УДК 502.36

Н. І. РИКУСОВА

ВПЛИВ НА НАВКОЛИШНЄ ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ (НПС) БУРОВИХ РОБІТ ТА ВІДХОДІВ БУРІННЯ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

Розглядається вплив відходів буріння та бурових робіт, що проводяться при облаштуванні свердловин, видобутку нафти та експлуатації нафтогазових свердловин. При оцінюванні екологічної безпеки процесу буріння свердловин аналізується властивість бурового шламу. Виявлено, що хімічний склад бурового шламу залежить від його мінерального складу і властивостей бурового розчину. Мінералогічний склад бурового шламу визначається літологічним складом порід, які розбурюються, він може змінюватися по мірі заглиблення свердловини. Результати досліджень складу відходів буріння можуть використовуватися для їх переробки та раціонального використання.

Ключові слова: буровий шлам, розчин, відходи буріння, нафтогазова свердловина, екологічна безпека та негативний вплив.

Рассматривается влияние отходов бурения и буровых работ, которые проводятся при обустройстве скважин, добыче нефти и эксплуатации нефтегазовых скважин. При оценке экологической безопасности процесса бурения скважин анализируются свойства бурового шлама. Выявлено, что химический состав бурового шлама зависит от его минерального состава и свойств бурового раствора. Минералогический состав бурового шлама определяется литологическим составом пород, которые разбуриваются, он может меняться по мере углубления скважины. Результаты исследований состава отходов бурения могут использоваться для их переработки и рационального использования.

Ключевые слова: буровой шлам, раствор, отходы бурения, нефтегазовая скважина, экологическая безопасность и негативное воздействие.

The influence of waste of drilling and drilling operations, which are carried out during construction of wells, oil production and operation of oil and gas wells, is considered.

The result of the study is the proposed options for processing and further use of drill cuttings.

The scientific novelty is to identify the impact of liquid drilling waste upon the components of natural environment.

Practical significance involves systematization of information on the composition of drilling waste, which is necessary in order to develop a scientifically based approach to their utilization.

In assessing the environmental safety of drilling process, properties of drill cuttings are analyzed. It was found out that the chemical composition of drill cuttings depends on its mineral composition and properties of drilling fluid. Mineralogical composition of drill cuttings is determined by lithological composition of rocks, which are drilled, it can change as the well deepens. The results of the studies of drilling waste composition can be used for its processing and rational use.

Keywords: drill cuttings, drill fluid, drilling waste, oil and gas well, environmental safety and negative impact.

Вступ. Нафтова промисловість є одним із значних джерел забруднення навколишнього середовища. Відповідно до цього потрібні невідкладні заходи щодо виправлення існуючої екологічної ситуації на підприємствах галузі. У процесі буріння нафтових свердловин створюються значні техногенні навантаження на об'єкти гідро-, літо- та біосфери.

Забруднюючі властивості бурового шламу обумовлені мінералогічним складом вибуреної породи і залишаються в ній залишками бурового розчину. Аналіз складу і фізико-хімічних властивостей шламу показує, що поверхня частинок шламу адсорбує хімічний реагент з бурових розчинів.

© Н. І. Рикусова. 2017

Нафтошлами та їх накопичувачі є реальним джерелом техногенних емісій і впливу на екосистему, але між тим нафтошлами можуть бути використані для виробництва на їх основі різних будівельних матеріалів [1].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Нафтогазовидобувна промисловість України виявляє негативний вплив на гідро-, атмо-, літо- і біосферу. Буріння свердловин і видобуток вуглеводнів є екологічно небезпечними процесами [2]. Запаси нафти і природного газу в Україні зосереджені у наступних географо-геологічних регіонах: Дніпровсько-Донецька западина (78 вуглеводневих родовищ) [3], Прикарпатський прогин (40 вуглеводневих родовищ), Причорноморсько-Кримський регіон (10 вуглеводневих родовищ).

Глибина нафтогазових свердловин, які буряться в Україні, складає в середньому від 2500 метрів до 6000 метрів. Технологічно процес буріння зводиться до трьох основних операцій:

- Механічне руйнування гірських порід у свердловині
- Видалення гірських порід на поверхню за допомогою бурового розчину (БР), який готується на поверхні і подається насосами в свердловину під тиском.
- Кріплення стінок свердловини обсадними трубами (колонами – технічними, експлуатаційною).

Процес буріння супроводжується виникненням бурових відходів (БВ):

- Буровий шлам (БШ)
- Відпрацьований буровий розчин (ВБР)
- Бурові стічні води (БСВ)

У процесі буріння, під час заглиблення свердловини на її забої (місце знаходження механічного пристрою (долота), яке руйнує гірську породу) утворюється вибурена порода, яка піднімається на поверхню разом з циркулюючим буровим розчином (промивальною рідиною) [4].

Нафта розчинна в органічних розчинниках, в звичайних умовах не розчинна у воді, але може утворювати з нею стійкі емульсії. Для відділення від нафти води і розчиненої в ній солі проводять зневоднення і знесолення.

В складі нафти виділяють легкі фракції (начало кипіння 200°C), де переважають метанові вуглеводні (алкани). Вміст легких фракцій в нафті різних родовищ і навіть різних продуктивних горизонтів одного і того ж родовища сильно змінюються. Істотне значення у складі нафти мають циклоалкани і ароматичні вуглеводні (арени – C_nH_m), які характеризуються мутагенним та канцерогенним впливом на біоту [5].

Бурові відходи на поверхні проходять систему очистки (наприклад, використовується очистка за допомогою вібросита та гідроциклону) далі направляються в шламові амбари, де вони розділяються на буровий шлам (БШ), відпрацьований буровий розчин (ВБР) та бурові стічні води (БСВ). Буріння свердловин здійснюють в основному в осадових відкладеннях, де більш всього присутні глинисті породи. Вибурені частинки глинистих порід, піднімаючись на поверхню, з'єднуються з фільтратом бурового розчину та набрякають.

Мінералогічний склад бурового шламу визначається літологічним складом порід, які розбурюються, він може змінюватись по мірі заглиблення свердловини.

Хімічний склад бурового шламу залежить від його мінерального складу і властивостей бурового розчину [4]. Наприклад, приблизний мінералогічний склад вибуреної породи при бурінні свердловини в районі Донецько – Дніпровської западини на території Харківської області, %: пісок - 11; вапняк - 14; аргіліт - 18; алевроліт - 13; глина - 19; пісковик - 25.

Склад відпрацьованого бурового розчину визначається конкретним типом бурового розчину, який використовується при бурінні свердловини (на водній або вуглеводній основі; глинисті або полімерні).

Таблиця 1 – Приблизний компонентний склад бурового розчину при бурінні свердловини

Тип бурового розчину	Компонентний склад	Токсичність, клас	Витрата, тон/свердловину
БР з використанням глинистого бурового розчину на водній основі	глино-порошок	4	8
	кальцинована сода	3	0,5
	КМЦ	3	0,125
БР з використанням бурового розчину на безглинистій основі	вуглецеволужний реагент ВЛР	4	10,4
	кальцинована сода	3	0,7
	графіт	4	7
	поліоніонна целюлоза	4	2
	хлорид натрію	3	25
	хлорид калію	3	30
	КМЦ	3	2
	гранульований поліакриламід	2	2
	реагент Abramix	4	11
БР на основі полімерів	кальцинована сода	3	1
	Біокар	4	32
	графіт	4	8
	РПС (розріджувач полімерних систем)	4	3
	карбонатний блокатор (карбонат кальцію)	4	66
	вапно	2	2
	органічний блокатор К-200 (целюлоза)	4	8
	мастильна добавка	4	20
	хлорид калію	3	28
	біополімер	безпечний	1,5

Вплив на навколишнє природне середовище (НПС) бурових робіт і відходів буріння. Причини і шляхи надходження ЗР у НПС при бурінні свердловин розподіляються на технологічні й аварійні, а джерела забруднення – на постійні і тимчасові [6].

До постійних джерел відносяться шламові амбари, з яких відбувається фільтрація і витік рідких відходів.

При оцінюванні екологічної небезпеки процесу буріння свердловин необхідно аналізувати властивості бурового шламу, а не властивості вибуреної гірської породи [7].

Шламові амбари – одні з основних джерел забруднення навколишнього природного середовища (НПС). Вони представляють собою споруди, які призначені для збору, знешкодження і захоронення промислових відходів буріння нафтогазових свердловин. При будівництві шламових амбарів вирубуються дерева, чагарники, знищується пригрунтовий покрив, здійснюється відчуження земель.

При бурінні нафтогазових свердловин створюється значне техногенне навантаження на об'єкти атмосфери, літосфери і є результатом впливу утворених відходів буріння, кількість яких для однієї газоконденсатної свердловини складає більш ніж 1 000 м³. З них бурового шламу – 355 м³, відпрацьованого бурового розчину – 371 м³, бурових стічних вод – 728 м³.

Використання хімічних речовин в БР спрямоване на значне полегшення і спрощення технологічного процесу буріння.

Забруднююча здатність БР залежить від кількості і токсикологічної характеристики хімічних речовин, які застосовуються для їх приготування.

Під час підйому суспензії (відпрацьований БР і вибурена гірська порода) зі свердловини на поверхню відбувається диспергування часток породи у середо-

вище БР. Хімічні токсичні речовини забруднюють вимиті гірські породи, що є однією з головних причин, які зумовлюють негативну дію утворення БШ на об'єкти НПС при його зберіганні і захороненні.

БСВ – загроза для літо- і гідросфери внаслідок їх високої рухливості та здатності акумулювати забруднюючі речовини (ЗР).

ВБР здатні завдавати великої шкоди верхнім шарам літосфери, особливо лужним суглинковим та глинистим ґрунтам.

Забруднюючі властивості БШ визначаються мінералогічним складом гірських порід, типом пластових флюїдів (пластова вода, нафта, газ, газовий конденсат) і залишками БР [8].

Склад БШ визначається значним вмістом небезпечних для НПС органічних сполук (поліакріламід, КМЦ, крохмаль, сульфат спиртова барда, тощо) і розчинних мінеральних солей, які токсично впливають на ґрунтово – рослинний покрив [9, 10].

У процесі буріння виникає забруднення НПС (табл. 2), передусім, за рахунок утворення таких основних відходів буріння : БСВ, БШ і ВБР. Найбільшу екологічну загрозу становить БШ.

Джерела забруднення НПС при бурінні бувають постійними і тимчасовими, а причини і шляхи надходження забруднюючих речовин – технологічними і аварійним [11].

Шламові амбари відносяться до постійних джерел забруднення НПС, з них відбувається фільтрація і витік рідких відходів. Вони будуються з розрахунковим сумарним вмістом від 1000 м³ до 3 500 м³ на одну свердловину. Через недосконалість конструкцій амбарів і специфічних ґрунтово-ландшафтних умов не забезпечується надійний захист НПС [12].

Таблиця 2 – Вплив процесу буріння нафтогазових свердловин на компоненти

Компоненти НПС	Негативний вплив процесу буріння
Геологічне середовище	Ризики виникнення аварій в процесі спорудження свердловин та при бурінні. При недотриманні проектних фізико – хімічних параметрів бурового розчину він може закальмувати (закупорити) при забойну зону продуктивного горизонту вуглеводнів, тим самим перешкоджати руху газу та нафти до забою свердловини.
Ґрунт	При забрудненні ґрунтів нафтопродуктами порушується повітряний режим та водні властивості ґрунту. Знижується чисельність макроорганізмів та бактерій, відбувається пригнічення окиснювально – відновлювальних ферментативних процесів, що в результаті знижує біологічну активність і родючість ґрунтів.
Водне середовище	Забруднення підземних і поверхневих вод нафтопродуктами і хімреагентами призводить до пригнічення нормального органічного життя, зміненню складу біоценозів, замору риби, загибелі нерестовища, знижується інтенсивність фотосинтезу і ступінь виживання фітопланктону.
Атмосфера	Викиди шкідливих речовин при роботі дизель – генераторів. Випаровування вуглеводнів шламових амбарів.

Хімічне забруднення екосистем і здатність забруднюючих речовин мігрувати у навколишньому середовищі залежить від їх розчинності у воді.

Вплив бурового шламу на літосферу. Вплив бурового розчину на ґрунт, рослинний світ в основному зводиться до забруднення нафтопродуктами. При забрудненні ґрунтів нафтопродуктами порушується повітряний режим та водні властивості ґрунту. При цьому відмічаються зміни у мікроорганізмах, які живуть у ґрунті: знижується чисельність макроорганізмів та бактерій, що засвоюють

з'єднання нітрогену. Відбувається пригнічення окиснювально – відновлювальних ферментативних процесів, що в результаті знижує біологічну активність і родючість ґрунтів. Як правило, бурові шлами мають лужну реакцію, що сприяє виникненню легкорозчинних гуматів, які легко вимиваються з поверхневого шару ґрунтів, що знижую загальний вміст гумусу [6].

На земельних ділянках забруднених буровими шлами, які вміщують нафтопродукти рослинність гине майже повністю.

Бурові шлами, проникаючи в ґрунт, руйнують ґрунтову структуру, змінюють режим ґрунтів і кореневого живлення рослин, а також його фізико – хімічні властивості. Якщо концентрація цих небезпечних забруднюючих речовин незначна, то ґрунт здатен самоочищатись та відновлюватись [6]. При збільшенні їх вмісту, більш ніж гранично допустимі концентрації, вони загрожують всім живим організмам.

Ґрунт, забруднений небезпечними відходами буріння – джерело небезпеки для людини, так як нафтопродукти, які є в складі бурових відходів, за рахунок міграційної здатності через харчові ланцюги надходять у сільськогосподарські продукти, а це спричиняє виникненню ризику канцерогенезу.

Вплив бурового шламу на атмосферу. При зберіганні, а в подальшому і при утилізації бурових шламів в земляних амбарах виникає випаровування легких фракцій нафтопродуктів (вуглеводнів), що негативно впливає на атмосферу. Кількість легких вуглеводнів, які випаровуються з шламових амбарів і забруднюють атмосферу, може бути в межах 0,5 – 2,5 тон/рік.

Вплив бурового шламу на гідросферу. Вплив на гідросферу здійснюється на всіх етапах спорудження свердловини, враховуючи будівельно-монтажні роботи, буріння, кріплення, випробування свердловини. На господарсько – побутові та питні потреби використовується привозна вода, а на технологічні, як правило, підземна.

Можливими джерелами забруднення підземних горизонтів з прісними водами під час буріння свердловини є:

- буровий розчин, який використовується при розкритті водоносних горизонтів;
- перетоки мінералізованих вод нижчезалегаючих водоносних горизонтів.

Ненормативне (непроектне) облаштування шламового амбару (відсутність земляних обвалувань, водовідвідних траншей, порушення або відсутність гідроізоляції амбару) – основна причина негативного впливу бурового шламу на підземні та поверхневі води. Крім цього, негативний вплив можливий також при контакті бурового шламу, розміщеного на території бурової зовні шламового амбару, з атмосферними осадами, а також при підтопленні території бурової в період інтенсивного танення снігу.

Атмосферні опади та танення снігу сприяють переходу розчинених солей з бурового шламу в водні розчини з міграцією цих речовин в водоносні горизонти.

Забруднення підземних і поверхневих вод нафтопродуктами і хімреагентами призводить до пригнічення нормального органічного життя, змінненню складу біоценозів, замору риби та загибелі нерестовища.

При впливі бурового шламу на водне середовище знижується інтенсивність фотосинтезу і ступінь виживання фітопланктону [13].

Напрямки зменшення негативного впливу відходів буріння на НПС. Перероблення (утилізація) бурового шламу – це здійснення технологічних операцій, пов'язаних із зміною хімічних, фізичних, чи біологічних властивостей відходів з метою їх подальшого екологічно-безпечного використання або зберігання.

Основні методи перероблення (утилізації) відходів буріння наступні:

- термічний (спалювання, сушка);
- хімічний (екстрагування, затвердіння із застосуванням органічних і нетрагічних реагентів);
- фізичний (відстоювання, відмивання, заморожування, фільтрування);
- фізико – хімічний (обробка коагулянтами, флокулянтами);
- біохімічний чи біологічний (біотермічне, мікробіологічне розкладання та рекультивация забруднених земель [5]).

Серед існуючих методів знешкодження рідких відходів буріння, які є полідисперсними та гетерогенними, перспективним є розділення їх на рідку та тверду фази, з подальшою їх утилізацією. Щоб прискорити процес розділення шламу на фази використовують процеси агрегації (укрупнення) тонких фракцій завислих часток [14], наприклад, за рахунок використання флокулянтів або коагулянтів.

Висновки. Складові компоненти бурового шламу становлять екологічну загрозу для навколишнього природного середовища. Це визначається у вигляді порушень рівноваги в неживих і живих системах навколишнього природного середовища (підвищена концентрація хімічних елементів, негативні ефекти у стані системи та інше), зменшення рівня безпеки у середовищі проживання живих організмів і людини.

Отже розміщення та подальша утилізація бурового шламу у шламових амбарах або на території бурової може наносити значний збиток навколишньому середовищу. Тому, очищення та подальша утилізація рідких відходів буріння, що виключає негативний вплив його на навколишнє середовище є актуальним науковим завданням.

Список літератури:

1. Чернова, А. О. Оцінка впливу бурового шламу на навколишнє середовище [Текст] / А. О. Чернова, О. В. Шестопапов // X Міжнародна науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – С. 66–67.
2. Шестопапов, О. В. Охорона навколишнього середовища від забруднення нафтопродуктами [Текст]: навч. пос. / О. В. Шестопапов та ін.; ред. О. В. Шестопапов. – Харків: НТУ "ХПІ", 2015. – 116 с.
3. Екологічний паспорт Сумської області станом на 01.01.2016 [Текст]. – Департамент екології, паливно-енергетичного комплексу та природних ресурсів Сумської обласної державної адміністрації. – Суми, 2016. – 136 с.
4. Рязанцев, Н. Ф. Испытание скважин в процессе бурения [Текст] / Н. Ф. Рязанцев, М. Л. Карнаухов, А. Е. Белов. – М.: Недра, 1982. – 310 с.
5. Шаповров, В. П. Біологічні методи охорони навколишнього середовища від забруднення нафтопродуктами [Текст]: монографія / В. П. Шаповров, О. В. Шестопапов, О. О. Мамедова, Г. Ю. Бахарєва та ін. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – 216 с.
6. Ягафарова, Г. Г. Утилизация экологически опасных буровых отходов [Электронный ресурс] / Г. Г. Ягафарова, В. Б. Барахнина // Нефтегазовое дело. – 2006. – Вып. 1. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Yagafarova/Yagafarova_2.pdf

7. Дзетль, Н. Б. Выбор технологии обезвреживания и утилизации отходов бурения и нефтяных шламов [Текст] / Н. Б. Дзетль // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – № 4. – С. 37–41.
8. Малиновская, Л. В. Экологически безопасный и экономически эффективный способ обезвреживания высокоминерализованных отходов бурения [Текст] / Л. В. Малиновская, С. Н. Перевалов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2014. – № 2. – С. 34–37.
9. Закон України «Про відходи»: (офіц. текст: за станом на 05 березня 1998 р.) [Текст]. – Верховна Рада України. – К.: Парламентське вид-во, 1998. – 45 с.
10. Пат. № 2242493 RU. Способ утилизации отходов бурения. МПК 7 C09K 7/02, C04B 33/00 [Текст] / Денисов А. В., Прасс Л. В.; владелец патента Открытое акционерное общество "Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа Восточной нефтяной компании" ОАО ТомскНИПИнефть ВНК. – № 2003118012/03; заявл. 16.06.2003; опубл. 20.12.2004.
11. Ишбаев, Т. Г. Рассмотрение различных путей утилизации отходов бурения нефтяных скважин [Текст] / Т. Г. Ишбаев // Экологические проблемы нефтедобычи. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2012. – С. 11–13.
12. Пономаренко, Д. В. Отходы или сырье: новое видение старой проблемы [Текст] / Д. В. Пономаренко, С. Н. Перевалов // Нефтегаз. – 2012. – № 9. – С. 35–39.
13. Гаранина, С. Н. Действие отходов бурения на фитопланктон [Текст] / С. Н. Гаранина // Тез. докл. 1 конгресса ихтиологов России. – М.: ВНИРО, 1997. – С. 412.
14. Shkop, A. Exploring the ways to intensify the dewatering process of polydisperse suspensions [Text] / A. Shkop, M. Tseitlin, O. Shestopalov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 6, Issue 10 (84). – P. 35–40. doi: [10.15587/1729-4061.2016.86085](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86085)

Bibliography (transliterated):

1. Chernova, A. O., Shestopalov, O. V. (2016). Ocinka vplyvu burovogo shlamu na navkolyshnie seredovyshe. X Mizhnarodna naukovo-praktychna students'ka konferenciya magistrantiv Nacional'nogo tehničnogo universytetu «Kharkivs'kyi politehnični instytut». Kharkiv: NTU «KhPI», 66–67.
2. Shestopalov, O. V. et. al.; Shestopalov, O. V. (Ed.) (2015). Ohorona navkolyshn'ogo seredovyssha vid zabrudnennja naftoproduktamy. Kharkiv: NTU "KhPI", 116.
3. Ekologichniy pasport Sums'koi' oblasti stanom na 01.01.2016 (2016). Departament ekologii, palyvno-energetychnogo kompleksu ta pryrodnyh resursiv Sums'koi' oblasnoi' derzhavnoi' administracii. Sumy, 136.
4. Ryazancev, N. F., Karnauhov, M. L., Belov, A. E. (1982). Ispytanie skvazhin v processe bureniya. Moscow: Nedra, 310.
5. Shapov, V. P., O. V. Shestopalov, O. O. Mamedova, G. Ju. Baharjeva et. al. (2015). Biologichni metody ohorony navkolyshn'ogo seredovyssha vid zabrudnennja naftoproduktamy. Kharkiv: NTU «KhPI», 216.
6. Yagafarova, G. G., Barahina, V. B. (2006). Utilizaciya ehkologicheski opasnyh burovih othodov. Neftgazovoe delo, 1. Available at: http://www.ogbus.ru/authors/Yagafarova/Yagafarova_2.pdf
7. Dzetl', N. B. (2006). Vybortekhnologiiobezvrezhivaniya iutilizacii othodov bureniya i neftnyanyh shlamov. Stroitel'stvo neftnyanyh i gazovyh skvazhin na suhe i na more, 4, 37–41.
8. Malinovskaya, L. V. (2014). Ehkologicheski bezopasnyi i ehkonomicheski ehffektivnyi sposob obezvrezhivaniya vysokomineralizovannyh othodov bureniya. Zashchita okruzhayushchei sredy v neftgazovom komplekse, 2, 34–37.
9. Zakon Ukraïny «Pro vidhody»: (ofic. tekst: za stanom na 05 bereznja 1998 r.) (1998). Verhovna Rada Ukraïny. Kyiv: Parlaments'ke vyd-vo, 45.
10. Denisov, A. V., Prass, L. V. (2003). Pat. No. 2242493 RU. Sposob utilizacii othodov bureniya. MPK 7 S09K 7/02, S04V 33/00. No. 2003118012/03; declared: 16.06.2003; published: 20.12.2004.
11. Ishbaev, T. G. (2012). Rassmotrenie razlichnyh putey utilizacii othodov bureniya neftnyanyh skvazhin. Ehkologicheskie problemy neftedobychi. Ufa: Izd-vo «Neftgazovoe delo», 11–13.
12. Ponomarenko, D. V., Perevalov, S. N. (2012). Othody ili syr'e: novoe videnie staroj problemy. Neftgaz, 9, 35–39.
13. Garanina, S. N. (1997). Deistvie othodov bureniya na fitoplankton. Tез. dokl. 1 kongressa ihtiolov Rossii. Moscow: VNIRO, 412.
14. Shkop, A., Tseitlin, M., Shestopalov, O. (2016). Exploring the ways to intensify the dewatering process of polydisperse suspensions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (10 (84)), 35–40. doi: [10.15587/1729-4061.2016.86085](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86085)

Надійшла (received) 19.07.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив на навколишнє природне середовище (НПС) бурових робіт та відходів буріння нафтогазових свердловин/ Рыкусова Н. І. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.98–102. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Влияние на окружающую природную среду (ОПС) буровых работ и отходов бурения нефтегазовых скважин/ Рыкусова Н. И. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.98–102. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Impact of drilling operations and waste of drilling of oil and gas wells upon natural environment./ Rykusova N. //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 20 (1242). – P.98–102. – Bibliogr.:14. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рыкусова Надія Іванівна - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірантка кафедри Хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, вул. Кирпичова, 2 e-mail: n_rykusova@ukr.net.

Рыкусова Надежда Ивановна - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирантка кафедры Химической техники и промышленной экологии, г. Харьков, ул. Кирпичова, 2 e-mail: n_rykusova@ukr.net.

Rykusova Nadegda - National Technical University «Kharkiv Polytechnic University», post-graduate student of the department Chemical technology and industrial ecology, Kharkiv, Kirpichova st., 2 e-mail: n_rykusova@ukr.net.

А. В. ПАВЛИЧЕНКО, Ю. В. БУЧАВИЙ, В. В. ФЕДОТОВ, О. В. ДЕМЕНКО, К. В. ТРІПАЧОВА

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ОБЛІКУ, ОЦІНКИ І МОНІТОРИНГУ ТЕХНОГЕННИХ РОДОВИЩ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Проведено аналіз системи державного обліку і моніторингу техногенних родовищ України. Обґрунтовано техніко-економічні та екологічні показники за якими можна оцінити доцільність розробки техногенного родовища, та його екологічну небезпеку для прилеглих територій. Створено структуру геоінформаційної системи «Техногенні родовища» відповідно до вирішення типових задач. На базі програми ESRI ArcGIS розроблена інтерактивна геоінформаційна система «Техногенні родовища Дніпропетровської області», яку реалізовано у мережі Інтернет за допомогою середовища ArcGIS-Online. Дана інформаційна система може слугувати основою ведення геоecологічного моніторингу техногенних родовищ на загальнодержавному і регіональному рівнях.

Ключові слова: промислові відходи, техногенні родовища, екологічний моніторинг, геоінформаційна система, екологічна оцінка.

Проведен анализ системы государственного учета и мониторинга техногенных месторождений Украины. Обосновано технико-экономические и экологические показатели, по которым можно оценить целесообразность разработки техногенного месторождения, и его экологическую опасность для прилегающих территорий. Создана структура геоинформационной системы «Техногенные месторождения» в соответствии с решением типовых задач. На базе программы ESRI ArcGIS разработана интерактивная геоинформационная система «Техногенные месторождения Днепропетровской области», которую реализовано в сети Интернет с помощью среды ArcGIS-Online. Данная информационная система может служить основой ведения геоecологического мониторинга техногенных месторождений на региональном и общегосударственном уровнях.

Ключевые слова: промышленные отходы, техногенные месторождения, экологический мониторинг, геоинформационная система, экологическая оценка.

Intensive mining of mineral resources by traditional methods leads to a rapid exhaustion of their stocks, herewith a substantial part lost in the subsoil, as inevitable losses. Therefore, in the future perspective, it is necessary to forecast sufficient amounts of mineral resources for the development of leading branches of the national economy. Solving the problem is possible by involving man-made formations into the development of resources, which are located in the territories of mining regions, and their rational use in compliance with modern environmental, energy, technological and economic requirements. The development of resources of technogenic formations will reduce the need for extraction of primary mineral resources, and solve the issue of a significant reduction of the technogenic load on the environment as well as improve the socio-economic status of industrial regions of Ukraine.

The system of state accounting and monitoring of man-made deposits in Ukraine is analyzed. The technical and economic and ecological indicators on which it is possible to assess the expediency of the development of the man-caused deposit, and its ecological danger for the surrounding territories is substantiated. The structure of the geoinformation system "Technogenic deposits" was created in accordance with solving typical problems. On the basis of the program ESRI ArcGIS an interactive geographic information system "Technogenic deposits of Dnipropetrovsk region" was developed, which is implemented on the Internet using the ArcGIS-Online environment.

The created information system is the basis of conducting geoeological monitoring of man-made deposits at the national and regional levels. The data accumulated in the information base will provide comprehensive utilization of technologically and environmentally-possible resources of technogenic entities and will encourage investors to develop technogenic entities as sources of valuable mineral resources.

Keywords: industrial waste, man-made deposits, ecological monitoring, geoinformation system, ecological assessment.

Вступ та постановка проблеми. Багаторічне видобування мінеральних ресурсів традиційними методами призводить до значного вичерпання їх запасів, при цьому суттєва частина втрачається в надрах, як неминучі втрати. За десятиріччя інтенсивного видобування, збагачення і переробки мінеральної сировини в Україні накопичилась значна кількість гірничо-промислових відходів, які з одного боку суттєво забруднюють довкілля, а з іншого – мають перспективи до промислового освоєння, тобто розглядаються в якості техногенних родовищ [1–4].

Компонентний склад промислових відходів, масштабістність виходу і наявність технічних рішень з переробки дозволяють розглядати їх як надійну сировинну базу галузей промисловості, а іноді використовуватися і як додаткове джерело енергетичного палива. Правомірність такого твердження пояснюється тим, що існує технічна можливість виробництва будівельних матеріалів, цегли і аглопориту з відходів вугільного виробництва і глинозему – сировини алюмінієвої промисловості з вугільної золи електростанцій. Загальні запаси золошлакової сировини в Україні становлять близько 300 млн. т. Породи вугілля і золи містять: мідь, ртуть, кобальт, титан, цинк, молибден, ванадій і ін., що мають велике промислове значення.

Утилізація відходів – ефективний спосіб зниження техногенного навантаження і вирішення цілої низки економічних, соціальних проблем. Переробка промислових відходів дозволить забезпечити потреби України скандієм, галієм, ітрієм, германієм, ртуттю, ніобієм, танталом – на десятки років, а свинцем, цинком, міддю, ванадієм, цирконієм, золотом і сріблом на 10–25 % від щорічних потреб.

Відома значна кількість способів використання та утилізації промислових відходів, але, незважаючи на це, їх обсяги залишаються незначними, при цьому терикони, відвали і хвостосховища постійно поповнюються. В індустріальних країнах світу рівень використання промислових відходів досягає 70–80%, тоді як в Україні він не перевищує 12–15 % [1].

Накопичені в результаті багаторічної діяльності підприємств паливно-енергетичного та гірничо-металургійного комплексів масштабні відходи виробництва являють собою джерела цінних сировинних ресурсів. Саме тому, виникає потреба в прогнозуванні достатніх обсягів мінеральних ресурсів для розвитку провідних галузей національної економіки. Вирішити проблему можливо шляхом залучення у розробку ресурсів техногенних утворень, що розміщені на територіях гірничо-промислових регіонів, та їх раціональ-

ного використання з дотриманням сучасних екологічних, енергетичних, технологічних та економічних вимог. Освоєння ресурсів техногенних утворень дозволить зменшити потребу у видобутку первинних мінеральних ресурсів, та вирішити питання суттєвого зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище і покращити соціально-економічний стан промислових регіонів України.

Таким чином, відходи промисловості є з одного боку джерелами проблем пов'язаних із забрудненням навколишнього середовища, з іншого боку, ці відходи є техногенними родовищами, розробка яких в умовах дефіциту сировини є реальною можливістю для збільшення обсягів видобутку і забезпечення більш раціонального використання мінеральних ресурсів.

Кодексом України про Надра техногенні родовища визначаються як місця, де накопичилися відходи видобутку, збагачення та переробки мінеральної сировини, запаси яких оцінені і мають промислове значення. Такі родовища можуть виникнути також внаслідок втрат при зберіганні, транспортуванні та використанні продуктів переробки сировини.

В Україні з більш ніж 1500 техногенних утворень, тільки 13 мають статус техногенного родовища. Найбільша кількість офіційних техногенних родовищ – 5 об'єктів, розташовані на території Дніпропетровської області, серед яких переважають розкривні породи видобутку корисних копалин, відходи збагачення, металургійні шлаки і золашлаки. Одним з основних постачальників відходів є підприємства паливно-енергетичного комплексу (ПЕК). Великі обсяги відходів ПЕК призводять до відведення значних площ, зміни рельєфу, порушення інженерно-геологічних, гідрогеологічних та еколого-геологічних умов регіону. Така мала кількість офіційно зареєстрованих техногенних родовищ вказує на значні складності процедури отримання цього статусу і правові неузгодженості у сфері поводження з промисловими відходами.

Стратегічно важливим для формування ресурсної політики держави в умовах виснаження мінерально-сировинних ресурсів є створення дієвих сучасних інформаційних систем забезпечення обліку і моніторингу запасів мінеральної сировини, у тому числі техногенних родовищ [5–9].

Для ефективної розробки техногенних родовищ необхідне сучасне інформаційне забезпечення, яке дозволить проводити їх інвентаризацію, класифікувати і оцінювати їх стан по еколого-економічним та фізико-хімічними показниками, а також складати проектну документацію з розробки конкретного техногенного родовища [8–11]. Відповідна інформаційна система техногенних родовищ може бути реалізована як на регіональному, так і на державному рівнях.

Мета та задачі дослідження. Метою даної роботи є удосконалення інформаційної системи обліку і геоекологічного моніторингу техногенних родовищ (як діючих, так і потенційних), що оптимізує прийняття технічних і управлінських рішень щодо напрямків їх використання.

Прикладною задачею роботи є формування інтерактивної геоінформаційної системи «Техногенні родовища Дніпропетровської області» на основі даних їх пас-

портів та результатів обліку і екологічного моніторингу.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючої системи обліку техногенних родовищ, в т.ч. їх паспортів та форм статистичної звітності, що застосовуються.

2. Обґрунтувати техніко-економічні та екологічні показники за якими можна оцінити доцільність розробки техногенного родовища, та його екологічну небезпеку для прилеглих територій.

3. Розробити структуру геоінформаційної системи «Техногенні родовища».

4. Провести апробацію даної інформаційної системи на території Дніпропетровської області.

Основна частина. Питаннями інформаційного забезпечення моніторингу об'єктів надрокористування займалися ряд вітчизняних науковців – Рудько Г. І., Назаренко М. В., Шестопалов В. М., Яковлев Є. О., Бусигін Б. С., Рудков Д. В., Адаменко Я. О. та ін.

Згідно з нормативно-правовим документом «Положення про проведення моніторингу та наукового супроводження надрокористування» розробка і здійснення системи моніторингу техногенних родовищ виконується спеціалізованими підприємствами і установами, такими як «Державна комісія України по запасам корисних копалин (ДКЗ), та ДВНП «Геоінформ України». В ДКЗ України розроблена інформаційна система моніторингу надрокористування об'єктового рівня [12, 13]. У роботах [13–15] запропоновані структура і опис компонентів геоінформаційної системи моніторингу стану території гірничопромислових регіонів.

Техногенні родовища, маючи рівноцінний з природо-генними родовищами статус, обліковуються у Державному балансі запасів та Державному Кадастрі родовищ та проявів корисних копалин. Гірничодобувні підприємства, що розробляють техногенні родовища звітують за формою обліку 8-ГР (техногенні корисні копалини), що затверджена Наказом Міністерства України від 28 серпня 1998 р. №138. Наказом Міністерства екології та природних ресурсів України № 488 від 24 грудня 2001 р. затверджено «Порядок ведення Державного кадастру родовищ та проявів корисних копалин» згідно з яким паспорти об'єктів кадастрового обліку складаються в автоматизованому режимі за уніфікованими формами у відповідності з певними групами корисних копалин: родовища металічних корисних копалин (форма А), родовища неметалічних корисних копалин (ф. Б), розсіпні родовища (ф. В), прояви металічних корисних копалин (ф.Г1), прояви неметалічних корисних копалин (ф. Г2), прояви вугілля (ф. Г3), родовища нафти та газу (ф. Д), родовища вугілля та горючих сланців (ф. Е), родовища гідромінеральної сировини (ф. Ж), родовища торфу і сапропелю (ф. К), техногенні родовища (ф. Л).

Зазначені форми паспортів різні за змістом, але однакові за структурою. Геолого-економічна інформація в паспортах про те чи інше родовище корисних копалин згрупована в розділах: «Загальні відомості», «Вивченість об'єкта», «Геологічна характеристика об'єкта», «Якісна характеристика корисних копалин», «Обсяг, запаси та ресурси корисних копалин», «Умови

розробки родовища, товарна продукція, споживачі, до-
вкілля», «Інформаційні джерела про об'єкт», а при не-
обхідності надаватиметься схематична геологічна кар-
та, розріз або схема розташування родовища [13–15].

Таким чином, ГІС техногенних родовищ може
бути сформована на основі офіційних даних, якими
можуть бути, наприклад, форма 1 «Відходи», реєстри
місць утворення та видалення відходів, додатковим

джерелом інформації є власні спостереження, які не-
обхідні для вирішення основних завдань з отримання
додаткової інформації про конкретні родовища засо-
бами ГІС. Саме ці облікові і паспортні дані стану тех-
ногенних родовищ мають слугувати первинною інфо-
рмацією для формування і наповнення відповідної ге-
оінформаційної системи, узагальнену структуру якої
наведено на рис. 1.

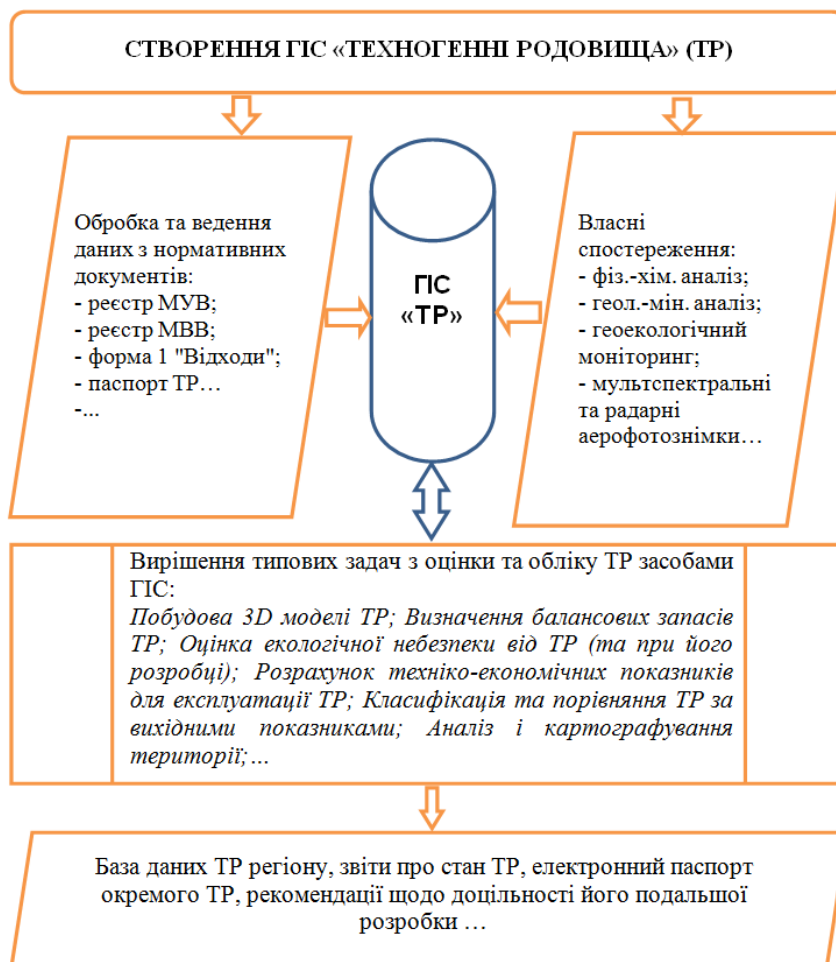


Рис. 1 – Структурна схема ГІС «Техногенні родовища»

Окрім нормативних документів та власних дос-
ліджень до запропонованої ГІС доцільно також вклю-
чити мультиспектральні й радарні аерофотознімки
районів розміщення техногенних родовищ. За допо-
могою цих аерофотознімків можна вирішити ряд при-
кладних задач, зокрема уточнювати контури техно-
генних родовищ й визначати динаміку їх обсягів під-
час розробки, оцінювати ступень обводнення або озе-
ленення шламонакопичувачів й породних відвалів,
проводити моніторинг просідання земної поверхні та
зсувонебезпечних процесів тощо.

Вихідні дані та результати обліку, оцінки і мо-
ніторингу техногенних родовищ доцільно розміщува-
ти для загального користування фахівців у мережі Ін-
тернет за допомогою технології ArcGIS-online.

Формування інформаційної системи ГІС «Техно-
генні родовища» дозволить: дослідити складові ресур-
сів техногенних утворень; розробити технологічні схе-
ми переробки відходів для отримання в'язучих, міне-

ральних порошків, товарних продуктів з відходів про-
катного виробництва і додаткових об'ємів металевих
концентратів; розробити технологічні схеми відпрацю-
вання техногенних родовищ гірничотранспортним об-
ладнанням; розробити технологічні лінії та конструкції
новітнього обладнання для процесів переробки відхо-
дів; довести отримані товарні продукти до нормативів
якості; розробити «дорожню карту» інвестора з розро-
бки та реалізації проекту отримання корисних ресурсів;
встановити еколого-економічні та правові показники
доцільності переробки техногенних відходів.

Переваги обраних показників: показники універ-
сальні, тобто їх можна застосовувати для будь-яких
техногенних масивів; показники стандартизовані та
нормативні, що визначаються за офіційними методи-
ками; усі показники мають питому характеристику;
усі показники піддаються ранжуванню для розрахун-
ку інтегрального критерію екологічного стану тери-
торії розміщення техногенних родовищ.

Типовими задачами з визначення геологічних та екологічних характеристик ТР за допомогою методів ДЗЗ та ГІС є: класифікація територій ТР на основі показників NDVI; оцінювання ступеня озеленення території ТР та їх СЗЗ; виявлення ділянок та розрахунок площ сухих пляжів шламосховищ,

або поверхонь відвалів, що пилять; побудова 3D моделі ТР та визначення за ними у динаміці обсягів вилучення корисних копалин; проведення моніторингу просідання земної поверхні та зсувонебезпечних процесів на території розміщення ТР.

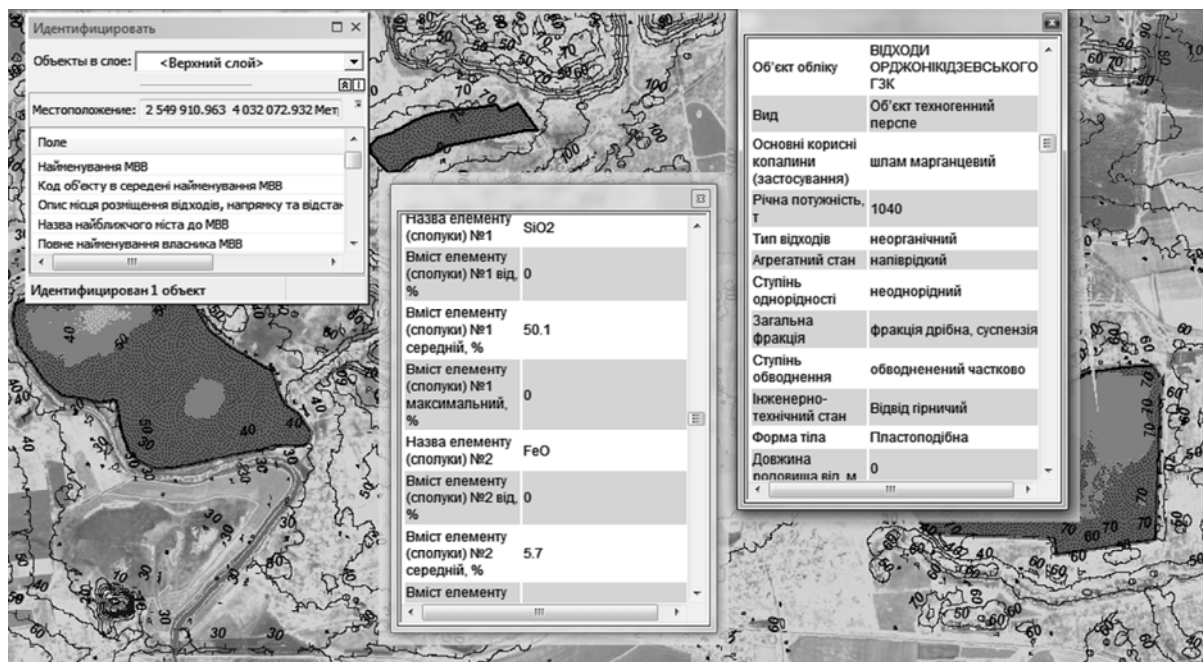


Рис. 2 – Реалізація ГІС «Техногенні родовища» у середовищі ArcGIS-online

Висновки. В результаті виконання досліджень сформовано геоінформаційну систему «Техногенні родовища», що може бути використана в якості основного документу для підготовки проектів з їх освоєння. Використання ГІС техногенних родовищ буде сприяти розробці проектів і рішень, спрямованих на підвищення ефективності та збільшення обсягів утилізації промислових відходів, що в свою чергу дозволить:

- підвищити рівень раціонального використання органічної і мінеральної сировини;
- розширити сировинну і паливну базу промисловості регіону з одночасним зниженням витрат пер-

винної сировини і палива на виробництво вторинної продукції;

- знизити витрати на видобуток вугілля і руди, а отже собівартість виробництва їх концентратів;
- зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище в районах видобутку і збагачення корисних копалин.

Освоєння ресурсів техногенних утворень дозволить зменшити потребу у видобутку первинних мінеральних ресурсів, та вирішити питання суттєвого зменшення антропогенного навантаження на навколишнє середовище і покращити соціально-економічний стан гірничопромислових регіонів України.

Список літератури:

1. Довгий, С. О. Реструктуризація мінерально-сировинної бази України та її інформаційне забезпечення [Текст]: [монографія] / С. О. Довгий, В. М. Шестопалов, М. М. Коржнев, О. М. Трофимчук, С. О. Яковлев, І. Д. Андрієвський, М. М. Курило О. Т. Кізілова, Н. Г. Люта, І. М. Малахов, В. О. Сляднєв, О. С. Аксьом, Н. В. Захарій, С. С. Корінь. – К.: Наукова думка, 2007. – 326 с.
2. Gorova, A. The study of ecological state of waste disposal areas of energy and mining companies [Text] / A. Gorova, A. Pavlychenko, O. Borysovs'ka // Mining of Mineral Deposits. – 2013. – P. 169–171. doi: 10.1201/b16354-30
3. Лисиченко, Г. В. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління [Текст] / Г. В. Лисиченко, Ю. Л. Забулюнов, Г. А. Хміль. – К.: Наукова думка, 2008. – 544 с.
4. Харламова, Е. В. Теоретические основы управления экологической безопасностью техногенно нагруженного региона [Текст] / Е. В. Харламова, М. С. Малеваный, Л. Д. Плячук // Экологическая безопасность. – 2012. – № 1 (13). – С. 9–12.
5. Статюха, Г. О. До питання кількісної оцінки екологічної безпеки при ОВНС [Текст] / Г. О. Статюха, В. А. Соколов, І. Б. Абрамов, Т. В. Бойко, А. О. Абрамова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 6/6 (48). – С. 44–46. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/3347/3147>
6. Козуля, Т. В. Комплексна екологічна оцінка природно-техногенних комплексів на основі MIPS- і ризик-аналізу [Текст] / Т. В. Козуля, Д. І. Ємельянова, М. М. Козуля // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 3/10 (69). – С. 8–13. doi: 10.15587/1729-4061.2014.24624
7. Бугасва, Л. М. Використання методів системної динаміки для дослідження сталого розвитку регіонів України [Текст] / Л. М. Бугасва, М. М. Османов, Г. О. Статюха // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 2/10 (44). – С. 22–25. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2772/2578>
8. Белогуров, В. П. Разработка методологии интегрального оценивания экологического состояния территорий [Текст] / В. П. Белогуров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 5/10 (71). – С. 51–56. doi: 10.15587/1729-4061.2014.28173
9. Вамболь, С. О. Вдосконалення методу оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів, на основі

- критерію екологічного резерву [Текст] / С. О. Вамболь, В. Ю. Колосков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2016. – № 49 (1221). – С. 101–105. – Режим доступу: <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/95286/90989>
10. Колосков, В. Ю. Моделі та методи прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання твердих побутових відходів [Текст] / В. Ю. Колосков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». – 2016. – № 4 (1176). – С. 142–146. – Режим доступу: <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/87813>
 11. Павличенко, А. В. Розробка електронних екологічних паспортів породних відвалів вугільних шахт [Текст] / А. В. Павличенко, В. В. Федотов, Ю. В. Бучавий, А. А. Коваленко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 3. – С. 105–110. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2014_3_18.
 12. Антоненко, А. В. Аналіз стану розробок інформаційно-аналітичних систем моделювання екологічно небезпечних ситуацій [Текст] / А. В. Антоненко, Д. Л. Плячук // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 6/2(26). – С. 8–12. doi:10.15587/2312-8372.2015.56800
 13. Дензгін А. П. Геоінформаційна система моніторингу шахтних виробок та порожнин Кривбасу для прогнозування техногенних явищ [Текст]: Матеріали 3-ї міжн. науково-техніч. конф. / А. П. Дензгін, М. В. Назаренко // Техногенні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання. – 2013. – С. 8–19.
 14. Рудько, Г. І. Інформаційна система моніторингу надкористування об'єктового рівня [Текст]: міжнар. наук.-практ. конф. / Г. І. Рудько, О. В. Нецький, М. В. Назаренко, С. А. Хоменко // Геомоніторинг. – Судак, 2013. – С. 9–13
 15. Рудько, Г. І. Використання ГІС-технологій при оцінці запасів родовищ корисних копалин [Текст] / Г. І. Рудько, М. В. Назаренко, С. А. Хоменко // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – 2009. – № 6. – С. 171–176.

Bibliography (transliterated):

1. Dovhyi, S. O., Shestopalov, V. M., Korzhnev, M. M., Trofymchuk, O. M., Yakovliev, Ie. O., Andrievskiy, I. D., Kurylo, M. M., Kizilova, O. T., Liuta, N. H., Malakhov, I. M., Shladnev, V. O., Aksom, O. S., Zakharii, N. V., Korin, S. S. (2007). Restrukturyzatsiia mineralno-syrovynnoi bazy Ukrainy ta yii informatsiine zabezpechennia. Kyiv: Naukova dumka, 326.
2. Gorova, A., Pavlychenko, A., Borysovs'ka, O. (2013). The study of ecological state of waste disposal areas of energy and mining companies. Mining of Mineral Deposits, 169–171. doi:10.1201/b16354-30
3. Lysychenko, G. V., Zabulonov, Yu. L., Khmil, H. A. (2008). Pryrodnyj, tehnogenyj ta ekologichnyj ryzyky: analiz, ocinka, upravlinnja. Kyiv: Naukova dumka, 543.
4. Kharlamova, E. V., Malevany, M. S., Plyatsuk, L. D. (2012). Theoretical bases managements by ecological safety of the technogenic loaded region. Kremenchug, Ukraine: Ekologichna Bezpeka, 1 (13), 9–12.
5. Statiuha, G. O., Sokolov, V. A., Abramov, I. B., Boiko, T. V., Abramova, A. O. (2010). To issue of ecological safety quantitative evaluation at EIA. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (6 (48)), 44–46. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/3347/3147>
6. Kozulia, T. V., Emel'ianova, D. I., Kozulia, M. M. (2014). Complex ecological estimation of natural and manmade complexes which basis on MIPS- and risk analysis. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(10(69)), 8–13. doi:10.15587/1729-4061.2014.24624
7. Bugaieva, L. M., Osmanov, M. M., Statiuha, G. O. (2010). Using system dynamics methods to study the sustainable development of regions of Ukraine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (10 (44)), 22–25. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2772/2578>
8. Belogurov, V. (2014). Elaboration of a methodology for integral estimation of ecological state of territories. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (10 (71)), 51–56. doi: 10.15587/1729-4061.2014.28173
9. Vambol, S., Koloskov, V. (2016). Improvement of the method of assessment of environmental condition of territory adjoined to wastes storage place based on environmental reserve criterion. Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes, 49 (1221), 101–105. Available at: <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/95286/90989>
10. Koloskov, V. (2016). Models and methods of forecasting of safety level of solid household wastes storage landfill. Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes, 4 (1176), 142–146. Available at: <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/87813>
11. Pavlychenko, A. V., Fedotov, V. V., Buchavy, Yu. V., Kovalenko, A. A. (2014). Development of electronic environmental passport of coal mine waste-rock piles. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 3, 105–110. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2014_3_18.
12. Antonets, A. V., Pliatsuk, D. L. (2015). Analysis of information-analytical systems development of environmentally dangerous situation modeling. Technology Audit and Production Reserves, 6(2(26)), 8–12. doi:10.15587/2312-8372.2015.56800
13. Dienhin, A. P., Nazarenko, M. V. (2013). Heoinformatsiina sistema monitorynhu shakhtnykh vyrobok ta porozhnyn Kryvbasu dlia prohnozuvannia tekhnohennykh yavysch. Tekhnohenni katastrofy: modeli, prohnoz, zapobihannia, 8–19.
14. Rud'ko, G. I., Nec'kij, O. V., Nazarenko, M. V., Homenko, S. A. (2013). Informacijna sistema monitoringu nadkorystuvannja ob'ektovogo rivnja. Geomonitoring-2013, Sudak, 9–13.
15. Rud'ko, G. I., Nazarenko, M. V., Homenko, S. A. (2009). Viktorystannja GIS-tehnologij pri ocinci zapasiv rodovishh korisnih kopalin. Teoretichni ta prikladni aspekti geoinformatiki, 6, 171–176.

Надійшла (received) 16.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Удосконалення системи обліку, оцінки і моніторингу техногенних родовищ з використанням геоінформаційних технологій/ Павличенко А. В., Бучавий Ю. В., Федотов В. В., Деменко О. В., Тріпачова К. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.103–108. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.

Усовершенствование системы учета, оценки и мониторинга техногенных месторождений с использованием геоинформационных технологий/ Павличенко А. В., Бучавый Ю. В., Федотов В. В., Деменко О. В., Тріпачова К. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.103–108. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.

Improvement of the accounting, assessment and monitoring system of technogenic deposits using geoinformation technologies/ Pavlychenko A., Buchavy Yu., Fedotov V., Demenko O., Tripachova K. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – No 20 (1242). – P.103–108. – Bibliogr.:15. – ISSN 2079-545

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Павличенко Артем Володимирович – кандидат біологічних наук, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», завідувач кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, Україна, 49005, e-mail: pavlychenkoa@nmu.org.ua.

Бучавий Юрій Володимирович – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», асистент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, Україна, 49005, e-mail: yurique@3g.ua.

Федотов Вячеслав Вікторович – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», асистент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, Україна, 49005, e-mail: vaclavdnepr@i.ua.

Деменко Ольга Володимирівна – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», асистент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, Україна, 49005, e-mail: olgademenko@ukr.net.

Трипачова Карина Володимирівна – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», аспірант кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, Україна, 49005, e-mail: trepachovatessa@gmail.com.

Павличенко Артем Владимирович – кандидат биологических наук, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», заведующий кафедрой экологии и технологий защиты окружающей среды, Днепр, пр. Д. Яворницкого, 19, Украина, 49005, e-mail: pavlychenkoa@nmu.org.ua.

Бучавый Юрий Владимирович – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», ассистент кафедры экологии и технологий защиты окружающей среды, Днепр, пр. Д. Яворницкого, 19, Украина, 49005, e-mail: yurique@3g.ua.

Федотов Вячеслав Викторович – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», ассистент кафедры экологии и технологий защиты окружающей среды, Днепр, пр. Д. Яворницкого, 19, Украина, 49005, e-mail: vaclavdnepr@i.ua.

Деменко Ольга Владимировна – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», ассистент кафедры экологии и технологий защиты окружающей среды, Днепр, пр. Д. Яворницкого, 19, Украина, 49005, e-mail: olgademenko@ukr.net.

Трипачова Карина Владимировна – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», ассистент кафедры экологии и технологий защиты окружающей среды, Днепр, пр. Д. Яворницкого, 19, Украина, 49005, e-mail: trepachovatessa@gmail.com.

Pavlychenko Artem Volodymyrovych – Candidate of Biological Sciences, State Higher Educational Institution «National Mining University», Head of the Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection, Dnipro, Ukraine, tel.: 056-756-00-16; e-mail: pavlychenkoa@nmu.org.ua.

Buchavyi Yuriy Volodymyrovych – State Higher Educational Institution «National Mining University», assistant lecturer of the Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection, Dmytra Yavornytskoho ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005; e-mail: yurique@3g.ua.

Fedotov Vyacheslav Viktorovich – State Higher Educational Institution «National Mining University», assistant lecturer of the Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection, Dmytra Yavornytskoho ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005; e-mail: vaclavdnepr@i.ua.

Demenko Olga Volodymyrivna – State Higher Educational Institution «National Mining University», assistant lecturer of the Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection, Dmytra Yavornytskoho ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005; e-mail: olgademenko@ukr.net.

Tripachova Karyna Volodymyrivna – State Higher Educational Institution «National Mining University», Post-graduate student of the Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection, Dmytra Yavornytskoho ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005; e-mail: trepachovatessa@gmail.com.

Комп'ютерно-інтегроване проектування та комп'ютерний дизайн

УДК 621.397.48 : 004.932.2

А. В. БЕЛЯЕВ, О. В. ЗУБКОВ, В. М. КАРТАШОВ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНТУРНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ ОБРАБОТКИ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО СТРЕЛКОВОГО ТРЕНАЖЕРА

Рассмотрена задача обнаружения координат пулевых отверстий и отметок от лазерного излучателя на фоне проекционного полотна мишени мультимедийного стрелкового тренажера. Предложен алгоритм обработки изображений и оценки пространственных координат наблюдаемых отметок с использованием контурного анализа изображений. Выведено математическое описание согласованных фильтров для получения контуров исследуемого изображения. Методом моделирования выполнена оценка качественных характеристик алгоритма. Рассмотрены аспекты практического применения предложенного алгоритма в мультимедийных стрелковых тренажерах.

Ключевые слова: моделирование, определение координат пулевых отверстий, мультимедийные стрелковые тренажеры, обработка изображений.

Розглянуто задачу виявлення координат кульових отворів і відміток від лазерного випромінювача на фоні проекційного полотна мішені мультимедійного стрілецького тренажера. Запропоновано алгоритм обробки зображень і оцінки просторових координат спостережуваних відміток з використанням контурного аналізу зображень. Виведено математичний опис узгоджених фільтрів для отримання контурів досліджуваного зображення. Методом моделювання виконано оцінку якісних характеристик алгоритму. Розглянуто аспекти практичного застосування запропонованого алгоритму в мультимедійних стрілецьких тренажерах.

Ключові слова: моделювання, визначення координат кульових отворів, мультимедійні стрілецькі тренажери, обробка зображень.

The problem of finding the coordinates of bullet holes and marks from a laser emitter in the background of the multimedia shooting simulator projection screen is considered. An algorithm for image processing and estimating the spatial coordinates of observable marks using an image contour analysis is proposed. A mathematical description of matched filters is derived for obtaining the test image contours. The simulation method is used to estimate the qualitative characteristics of the algorithm. The aspects of practical application of the proposed algorithm in multimedia shooting simulators is considered, advantages and disadvantages are emphasized in comparison with previously used algorithms. The effectiveness of the algorithm in processing the video stream with a dynamically changing background has been noted, and it has been proposed to use it in gaming applications for this class of multimedia systems.

Keywords: modeling, coordinates determination of bullet holes, multimedia shooting simulators, image processing.

Введение. Статья является продолжением публикации, связанных с разработкой и внедрением универсальных мультимедийных стрелковых тренажеров (МСТ) для подготовки сотрудников силовых структур. В статье проводился анализ основных подходов к определению яркостных перепадов [1], описан используемый в тренажере метод обработки изображений [3] и предложен алгоритм увеличения быстродействия описанных методов с использованием операции стробирования целей [3].

Принцип действия мультимедийного стрелкового тренажера (МСТ) схематически представлен на рис. 1. В МСТ используется система обработки изображений со статичной видеокамерой.

Как и любая другая система компьютерного зрения, мультимедийный стрелковый тренажер имеет в своем составе видеокамеру, осуществляющую мониторинг изменений на проекционном полотне мишени. Получаемый видеопоток обрабатывается на компьютере с использованием одного или нескольких методов обнаружения информационных объектов.

Искомый объектом поиска при обработке изображений в мультимедийных стрелковых тренажерах является пулевая пробоина на экране, в случае работы системы с боевым оружием, или лазерное пятно, если система работает с лазерными имитаторами, закрепленными на оружии.

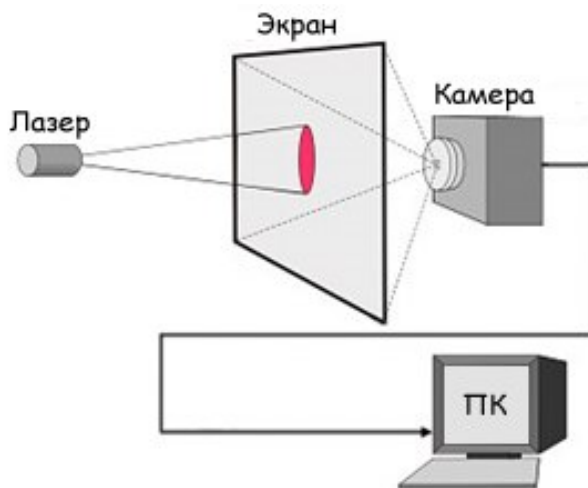


Рис. 1 – Упрощенная структура системы обработки сигналов мультимедийного стрелкового комплекса

Контурный анализ в МСТ. Основная задача используемых в стрелковом комплексе алгоритмов обработки сигналов заключается в обнаружении и измерении координат центра пулевой пробоины или пятна, образуемого лучом лазера на экране.

При этом алгоритмы обработки сигналов, используемые в комплексе, должны обеспечивать высокое быстродействие для достижения минимально возможного промежутка времени между выстрелами,

©А. В. Беляев, О. В. Зубков, В. М. Карташов. 2017

а также высокую точность определения координат пробоины.

В статье рассматривается возможность применения алгоритма выделения контуров на изображении в МСТ, с целью повышения скорости обнаружения информационных объектов и точности определения их координат.

Достоинство метода контурного анализа заключается в возможности решения задач обработки изображений и распознавания зрительных образов с единых теоретических позиций. При этом изменение параметров положения, поворота и масштаба изображения незначительно влияет на объем выполнения вычислений.

Вместе с тем, этот метод применим лишь в том случае, когда в нашем распоряжении имеются сами контуры, по крайней мере, локализована область сцены, в которой сосредоточены граничные точки (края, границы) конкретного изображения. Задача выделения контуров многоградиационного изображения на статистически сложном многоградиационном фоне эквивалентна задаче обнаружения двумерного полезного сигнала на фоне шумов и других сигналов, играющих роль помех [4].

Рассмотрим один из имеющихся подходов к выделению контуров изображений в реальной системе, базирующийся на гипотезе экспоненциальнокосинусной автокорреляционной функции (АКФ) фоновых шумов и слабой информативности низкочастотной части спектра изображения.

Флуктуации амплитуд и фаз сигналов на входе датчиков изображений приводят, в конечном счете, к флуктуациям интенсивностей сигналов, формирующих в памяти цифровое изображение $s(x, y)$. В результате получающиеся силуэтные изображения становятся многосвязными из-за образующихся полостей и разрывов, вследствие чего значительно искажается линия края (контура) (рис. 2).

Разрушение односвязной структуры цифрового изображения $s(x, y)$ из-за указанных факторов, а также воздействие шумов и помех в области изображения приводят к тому, что вместо одного контура, описывающего форму исходного изображения $e(x, y)$, мы получаем набор контуров пятен различной формы в пределах контура исходного изображения. Как видим, контурный анализ этих пятен не дает необходимой информации о классе обрабатываемого изображения. В данном случае целесообразно переходить к пространственным методам обработки, например, к бинарной пространственной согласованной фильтрации или к выделению областей сцены по признаку наличия сгущений, а также использовать другие методы, рассмотренные в [1].

Существенное влияние на возможность применения метода контурного анализа оказывает количество пикселей в составе изображения объекта. С уменьшением числа пикселей вследствие искажения формы объекта шумами дискретизации падает отношение сигнал/шум. Маскирующее влияние шумов дискретизации приводит к потере отдельных, в первую очередь, мелких деталей изображений, т. е. к

потере информативных признаков формы в их контурах.

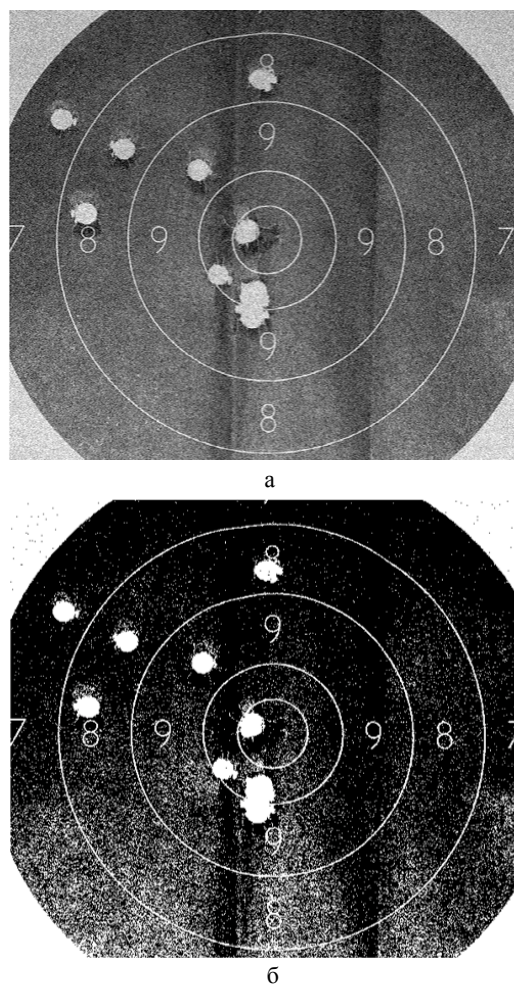


Рис. 2 – Образование многосвязного бинарного цифрового изображения: а – многоградиационное изображение мишени, б – сформированное бинарное изображение

Необходимое количество пикселей связано с шириной спектра контура и должно выбираться исходя из теоремы Котельникова. Однако, в целом ряде случаев оно определяется возможностями обрабатывающей аппаратуры, требуемым быстродействием и применяемыми датчиками изображения, например, шириной диаграммы направленности антенны радиолокационной станции [5] при обработке радиолокационных изображений или разрешением камеры.

Вредное влияние флуктуаций может быть снижено за счет процедур предварительного накопления изображений одного и того же объекта. Снижение одного из наиболее опасных помеховых факторов – шума зернистости в изображениях, получаемых в когерентном свете, достигается путем усреднения нескольких независимых изображений одного и того же участка поверхности. Рост эффективности обработки в зависимости от количества накапливаемых изображений наблюдается при этом до тех пор, пока число накапливаемых кадров не превысит $N \approx 25$, как показано в [6]. Улучшение формы сильно зашумленных контуров, в том числе и шумами квантования, может быть достигнуто в результате их накопления.

Выделение границ, как одна из задач сегментации изображения. В практических приложениях, рассчитанных на использование в реальном времени, распознавание образов часто выполняют в виде следующей последовательности (рис. 3): получение изображения (1); предварительная его обработка и фильтрация (2); сегментация и адаптивная бинаризация (3); серия морфологических операций (4); заполнение пространства признаков объектов (5); принятие решения об обнаружении или необнаружении полезного сигнала (6).



Рис. 3 – Упрощенная схема распознавания образов на изображении

Получение изображения в мультимедийном стрелковом тренажере предварительно было рассмотрено в [3]. Следующий этап заключается в отделении путем сегментации на принятом изображении полезного сигнала от однородного фона.

Сегментация является одним из способов группировки пикселей в сцене. Она проводится с целью разбиения сцены на части со сходными свойствами, например, на области с близкими значениями яркости. В ландшафтных сценах, характерной особенностью которых является сложный статистический характер яркости пикселей, сегментация производится для разбиения сцены на статистически однородные части [9].

Границам изображений в полутонной продискретизированной сцене соответствуют скачки яркости – как положительные, так и отрицательные. Эти скачки вызваны разницей средних уровней яркости фона и объекта (рис. 4).

Границам изображений в полутонной продискретизированной сцене соответствуют скачки яркости – как положительные, так и отрицательные. Эти скачки вызваны разницей средних уровней яркости фона и объекта (рис. 4).

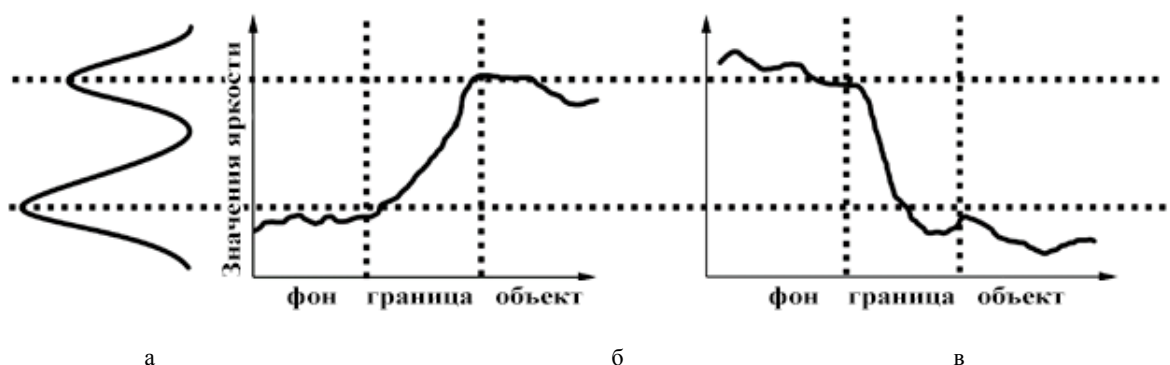


Рис. 4 – Распределение яркости на границе объектов: а – гистограмма яркости, б – скачки яркости в области границы для изображений ярче фона, в – скачки яркости в области границы для изображений темнее фона

Гистограмма яркости пикселей в этой области носит хорошо выраженный двугорбый характер. Фронту скачка яркости соответствует наименьшее по сравнению с фоном и изображением объекта число пикселей, что и приводит к провалу в центре графика гистограммы. Гистограммы яркостей, построенные в областях фона или в областях изображения объекта, не имеют таких хорошо выраженных максимумов. Поэтому ориентируясь на наличие провала в центральной части гистограммы яркостей или же на скачок яркости в пределах небольшого участка сцены, можно все пиксели этого участка разделить на три подмножества: фон, граница фон/изображение, изображение объекта. При таком подходе выделение граничных точек можно рассматривать как один из видов сегментации сцены.

На этапе предварительной обработки изображения, полученного с регистрирующего устройства, проводят минимизацию избыточной, для поставленных задач, информации на всех его позициях. Прежде чем приступить к обработке изображения, его переводят в оттенки серого, в связи с отсутствием необхо-

димости работы с цветовыми компонентами. Для преобразования исходного изображения в изображение в градациях серого, необходимо получить его яркостную составляющую. С этой целью удобно представить изображение в цветовой модели YUV (или HSL, HSV, подобных).

В случае, если на изображении проводится поиск крупномасштабных объектов, или объектов с однородной структурой, когда нет необходимости определять множество мелких деталей, осуществляется процедура предварительного сглаживания изображения.

Операцию сглаживания применяют для подавления шумов и приближения границ к идеальным и замкнутым. Чаще всего используется Гауссов фильтр, параметр размытия которого σ выбирают в зависимости от исследуемых изображений. Функция Гаусса для двумерного случая имеет вид

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1)$$

При определении круглых объектов на изображении, таких как лазерное пятно, лучшие результаты

обеспечивает применение гауссового фильтра с параметром размытия порядка $\sigma = 10$ (рис. 5).

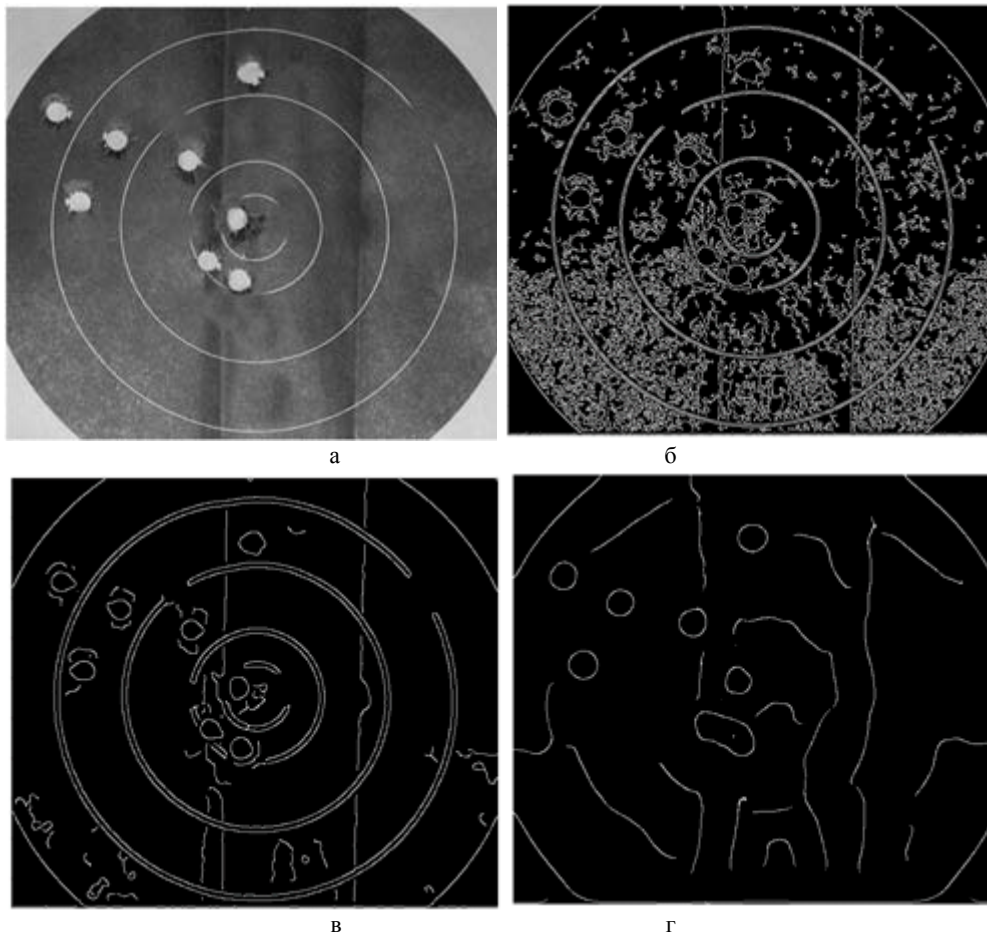


Рис. 5 – Влияние сглаживания исходного изображения (а) на детекторы контуров при $\sigma = 1$ (б), $\sigma = 10$ (в), $\sigma = 20$ (г)

В процессе сканирования сцены F , описываемой функцией яркости $f(x, y)$, происходит перебор по определенному закону ее пикселей. Если текущий пиксель не был отнесен к ранее обнаруженному изображению, то решается задача обнаружения начальной точки a_0 контура нового изображения. Сцена F содержит изображения фона $g(x, y)$ и объекта $s(x, y)$, а также флуктуационный шум $n(x, y)$. Изображение объекта $s(x, y)$ имеет подмножество точек $\gamma(x, y)$, относящихся к границе $\Gamma = \{\gamma(x, y)\}$ объект/фон. Граница Γ изображения $s(x, y)$ характеризуется двумерным скачком (перепадом) с функцией яркости $\gamma(x, y)$ (рис. 6).

Пространственные положения точек границы Γ сильно коррелированы. Граница реального изображения, как уже отмечалось ранее, представляет непрерывную замкнутую одновитковую кривую. Каждая граничная точка имеет в качестве соседей две других граничных точки. Поэтому информация о положении в сцене F хотя бы одной граничной точки, получаемая в процессе выполнения операции

обнаружения границы, в значительной степени облегчает нахождение ее остальных точек, особенно если форма изображения априорно известна.

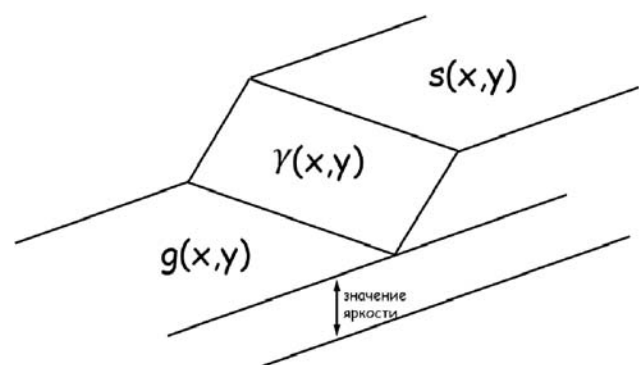


Рис. 6 – Двумерная модель границы изображения

Часто переход фон/объект происходит на интервале нескольких пикселей и поэтому скачок яркости характеризуется крутым фронтом. Иногда из-за ухудшения освещенности в пограничной части объекта этот скачок становится пологим. В ряде случаев в области границы могут находиться представляющие интерес отдельные точечные

объекты. Тогда разрешение границы должно быть достаточно высоким, что приводит к увеличению протяженности скачка.

В ряде случаев [5] при решении задач обнаружения изображений функция яркости $f(x, y)$ имеет более сложный вид, чем тот, который задается с помощью аддитивной модели сигнала и шума [8]

$$f(x, y) = s(x, y) + n(x, y), \quad (2)$$

Модель (2) используется при обнаружении сигналов на фоне белого шума. В качестве более адекватной модели функции $f(x, y)$ в работе [1] используется аддитивно-мультипликативная модель, имеющая, с точностью до параметров смещения изображения $s(x, y)$, вид

$$f(x, y) = g_0 + s(x, y) + g(x, y)n(x, y), \quad (3)$$

где g_0 – постоянная составляющая яркости, обеспечивающая неотрицательность функции $f(x, y)$. В ландшафтных сценах эта модель описывает локально однородное поле случайных значений яркости. Статистическая неоднородность поля вызвана медленно меняющейся детерминированной составляющей. Поэтому при обработке таких сцен сегментация производится с целью формирования локально однородных в статистическом плане областей («лес», «поле», «водоем» и др.)

Функция $s(x, y)$, $x, y \in F_s$ изображения объекта, как и функция $g(x, y)$ фона, является либо детерминированной функцией, либо реализацией случайного поля. Эти функции всегда имеют различные первые моменты, то есть разные средние яркости. Поэтому переход от одной функции к другой, то есть от фона к объекту или от объекта к фону, всегда сопровождается скачком яркости, расположенным в области границы фон/объект. Несмотря на разнообразие законов распределения вероятностей значений фонового шума, их одномерные АКФ в сценах природных аэроландшафтов, вещательного телевидения и некоторых других классов в пределах локально однородной области хорошо аппроксимируются экспоненциально-косинусной функцией вида [9, 10]

$$R(\xi) = \sigma_{\text{ex}}^2 e^{-\alpha|\xi|} \cos \beta \xi, \quad (4)$$

где σ_{ex}^2 – дисперсия фонового шума, α – декремент затухания непериодической АКФ, а β – круговая частота периодической составляющей АКФ.

В рамках аддитивной модели (1) решение об обнаружении изображения объекта принимается путем сравнения с порогом значения статистики, формируемой оптимальным фильтром с частотным коэффициентом передачи (ЧКП) [8]:

$$H(\omega_x, \omega_y) = \frac{CS^*(\omega_x, \omega_y)}{|N(\omega_x, \omega_y)|^2} e^{-i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)}, \quad (5)$$

где $H(\omega_x, \omega_y)$ – преобразование Фурье от импульсной характеристики $\lambda(x, y)$ фильтра, $S^*(\omega_x, \omega_y)$ – комплексно сопряженный спектр функции $s(x, y)$, $|N(\omega_x, \omega_y)|^2$ – спектральная плотность мощности (энергетический спектр) шума $n(x, y)$, x_0, y_0 – координаты центра тяжести изображения, C – нормирующий множитель.

В случае получения на изображении белого шума $|N(\omega_x, \omega_y)|^2 = N_0 = \text{const}$, сам фильтр становится согласованным с полученным сигналом $s(x, y)$ и формирует на своем выходе отклик в виде ВКФ входного и эталонного сигналов. Если же энергетический спектр фона неравномерен, то оптимальный фильтр (5) может быть представлен последовательным соединением двух звеньев (рис. 7): фоновоподавляющего (обеляющего) звена с ЧКП

$$H_{\text{фн}}(\omega_x, \omega_y) = \frac{C}{|N(\omega_x, \omega_y)|^2} \quad (6)$$

и согласованного звена с ЧКП

$$H_c(\omega_x, \omega_y) = \frac{S^*(\omega_x, \omega_y)}{N_0} e^{-i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)}, \quad (7)$$

Фоновоподавляющее звено является инверсным фильтром и служит для выравнивания спектра фона.



Рис. 7 – Структуры оптимальных обнаружителей изображения объекта на фоне помех: а – с равномерным энергетическим спектром, б – с энергетическим спектром произвольной формы

В рамках аддитивно-мультипликативной модели (3), несмотря на ее значительно более сложный, чем у аддитивной модели (2), вид, ЧКП оптимального фильтра усложняется незначительно [8]

$$H(\omega_x, \omega_y) = \frac{CS^*(\omega_x, \omega_y)}{N_0 |G(\omega_x, \omega_y)|^2} e^{-i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)}, \quad (8)$$

где $|G(\omega_x, \omega_y)|^2$ – энергетический спектр функции фона $g(x, y)$, x_0 и y_0 – координаты центра изображения объекта. Согласованное звено оптимального фильтра не изменилось, а ЧКП фоновоподавляющего звена приобрел вид

$$H_{\phi n}(\omega_x, \omega_y) = \frac{C}{|G(\omega_x, \omega_y)|^2} \quad (9)$$

Задача обнаружения начальной точки контура изображения объекта в рамках модели (3) ставится аналогично задаче обнаружения самого объекта, только вместо функции яркости всего изображения $s(x, y)$ обнаруживается наличие в смеси (3) функции яркости $\gamma(x, y)$ только границы Γ . Обнаружитель, проводя анализ функции яркости $f(x, y)$ сцены F ,

должен обоснованно выбрать одну из альтернативных гипотез:

гипотеза I –

$$f(x, y) = g_0 + \gamma(x, y) + g(x, y)n(x, y);$$

гипотеза II –

$$f(x, y) = g_0 + g(x, y)n(x, y); \quad (10)$$

В начале анализа предполагается справедливость второй гипотезы, т.е. окно фильтра обнаружителя заведомо расположено в области фона. Фильтр обнаружителя начальной точки контура изображения должен содержать два звена (без учета фазового звена $e^{-i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)}$): фоновоподавляющее и согласованное с формой скачка яркости на границе фон/объект (рис. 8).

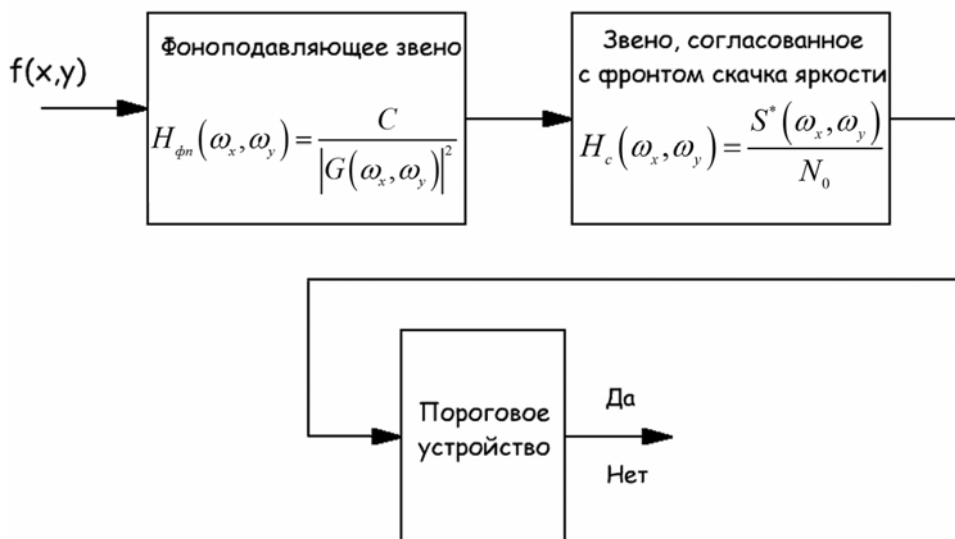


Рис. 8 – Структура обнаружителя начальной точки контура изображения

Для дальнейшего анализа изображения эффективным оказался переход из полученного пространства контуров в пространство площадей путем выполнения операции заливки. Замкнутые контуры образуют целостные площади, тогда как разомкнутые контуры будут отсеяны на этапе постобработки. Пулевые отверстия и отметки от лазерного излучателя при правильном выборе параметров детектора контуров будут давать целостный замкнутый контур (рис. 9).

На этапе постобработки контуров целесообразно также применять операции математической морфологии. Для того, чтобы избавиться от незамкнутых линий на изображении, применима операция морфологической эрозии [1] с использованием малого крестообразного структурирующего элемента.

При выполнении операции эрозии структурный элемент проходит по всем пикселям изображения. Если в некоторой позиции каждый единичный пиксель структурного элемента совпадает с единичным пикселем бинарного изображения, то выполняется логическое сложение сигнала центрального пикселя структурного элемента с сигналом соответствующего пикселя выходного изображения. В результате применения операции эрозии все объекты, меньшие чем структурный элемент, стираются, объекты, соединённые тонкими линиями, становятся разъединёнными и размеры всех объектов уменьшаются.

Результат применения эрозии с использованием крестообразного структурного элемента к анализируемому изображению представлен на рис. 10.

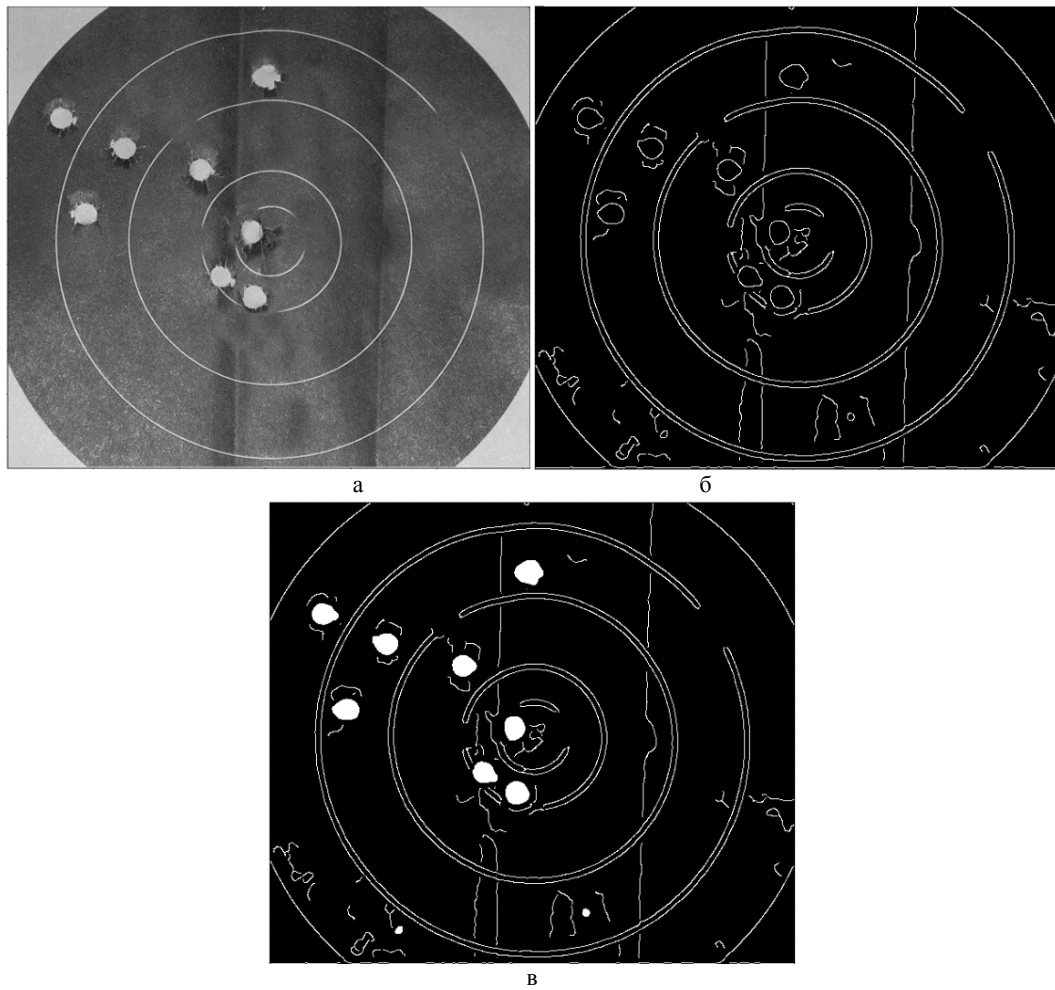


Рис. 9 Заливка замкнутых контуров исследуемого изображения: а – исходное изображение, б – контурное представление, в – заливка цельных контуров

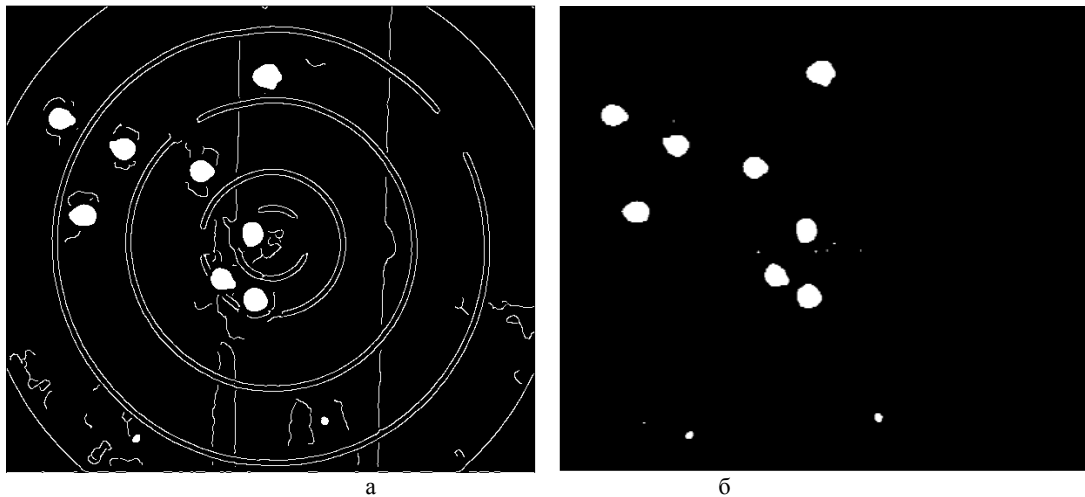


Рис. 10 – Применение операции морфологической эрозии к анализируемому изображению: а – исходное изображение, б – после эрозии

И последним этапом контурного анализа изображений в МСТ является принятие решения – определение координат центров округлых объектов и их диаметров. Выполняется это при помощи сравнения площадей и фактора формы рассматриваемых объектов.

На рис. 11 приведены изображения лазерного луча и пулевого отверстия, а также их контурные представления.

На рис. 12 показан результат проведенных операций.

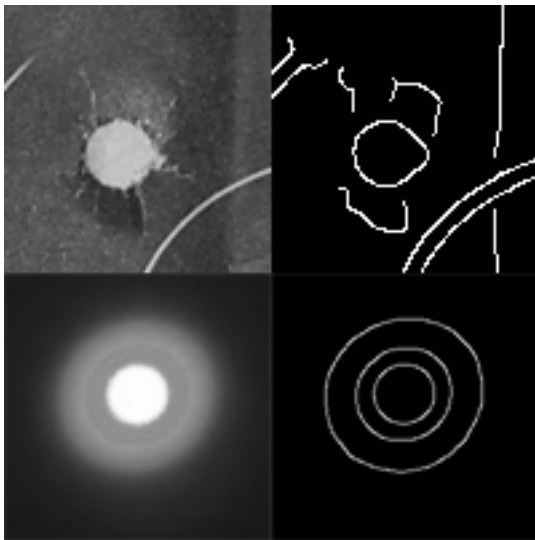


Рис. 11 – Контурные представления основных информационных объектов на изображении МСТ – пулевой пробоины и лазерного луча

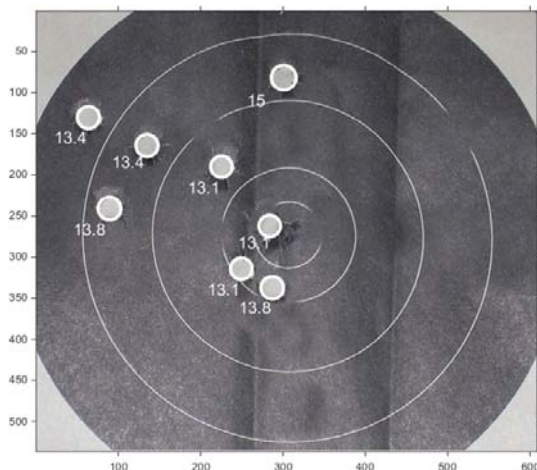


Рис. 12 – Расположение пулевых отверстий на фоне исходного изображения

Анализ эффективности предложенного метода. Предложенный метод был реализован и протестирован с использованием мультимедийного стрелкового тренажера кафедры «Медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем» Харьковского национального университета радиоэлектроники. Ра-

нее в системе обработки тренажера применялся метод кадрового вычитания для определения новых объектов на слабо изменяющемся фоне. Полученное разностное изображение позволяло определить координаты точки попадания лазерного луча или пулевых отверстий. Однако, слабое освещение в тирах и собственные шумы камеры не позволяли определять пулевые отверстия на темных фонах, из-за чего было предложено применение инфракрасной подсветки за проекционным экраном и соответствующего светофильтра на видеокамере. Из-за этого технического решения приходилось использовать две разных камеры с разными светофильтрами, что увеличивало стоимость конструкции и усложняло ее.

Контурный анализ изображений позволяет использовать всего один комплект видеоаппаратуры без применения дополнительной системы подсветки пулевых отверстий. Во время тестирования данного метода было выявлено, что он имеет лучшие характеристики правильного обнаружения в случае использования сцен с неоднородным динамическим фоном, тогда как метод кадрового вычитания показал неспособность отслеживания целей при быстро изменяющемся изображении.

Выводы

1. Предложен метод и разработан сопутствующий программный комплекс для МСТ, позволяющий упростить и удешевить существующую систему. Предложенный метод основан на применении контурного анализа изображения, принимаемого со стационарной видеокамеры.

2. Экспериментально выведены оптимальные характеристики применяемых в блоке обработки видеокамер и параметры фильтров для максимизации характеристики правильного обнаружения системы и минимизации ложного срабатывания.

3. Определено, что использование разработанной методики анализа изображений в МСТ позволяет обрабатывать изображения с динамически изменяющимся фоном, что позволяет расширить функционал новыми тренировочными видеосюжетами и использовать более сложные видеосюжеты с использованием уровневой структуры современной игровой индустрии.

Список литературы:

1. Беляев, А. В. Обнаружение объектов заданной формы и определение их координат на изображении в мультимедийном стрелковом тренажере [Текст] / А. В. Беляев, В. М. Карташов // Системы обработки информации. – 2015. – № 10 (135). – С. 16–21.
2. Беляев, А. В. Обработка сигналов в универсальном мультимедийном стрелковом тренажере [Текст] / А. В. Беляев, О. В. Зубков, В. М. Карташов, К. С. Тарасов // Вестник НТУ «ХПИ». – 2017. – № 16 (1238) – С. 23–29.
3. Беляев, А. В. Стробирование отметок движущихся объектов в системе обработки изображений со стационарной видеокамерой [Текст] / А. В. Беляев, В. М. Карташов, Ф. А. Лутуангу // ScienceRise. – 2017. – № 3. – С. 66–71. doi: [10.15587/2313-8416.2017.96524](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.96524)
4. Burlachenko, I. Devising a method for the active coordination of video cameras in optical navigation based on the multi-agent approach [Text] / I. Burlachenko, I. Zhuravska, M. Musiyenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, Issue 9 (85). – P. 17–25. doi: [10.15587/1729-4061.2017.90863](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90863)
5. Tsyporenko, V. Development of direct method of direction finding with two-dimensional correlative processing of spatial signal [Text] / V. Tsyporenko, V. Tsyporenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 6, Issue 9 (84). – P. 63–70. doi: [10.15587/1729-4061.2016.85599](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85599)
6. Elachi, C. Spaceborne synthetic-aperture imaging radars: Applications, techniques, and technology [Text] / C. Elachi, T. Bicknell, R. L. Jordan, C. Wu // Proceedings of the IEEE. – 1982. – Vol. 70, Issue 10. – P. 1174–1209. doi: [10.1109/proc.1982.12448](https://doi.org/10.1109/proc.1982.12448)
7. Sotnikov, A. A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects [Text] / A. Sotnikov, V. Tarshyn, N. Yeromina, S. Petrov, N. Antonenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, Issue 9 (87). – P. 68–74. doi: [10.15587/1729-4061.2017.101920](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101920)

8. Trabka, E. A. Shape Detection using Incoherent Illumination* [Text] / E. A. Trabka, P. G. Roetling // Journal of the Optical Society of America. – 1967. – Vol. 57, Issue 1. – P. 108. doi: [10.1364/josa.57.000108](https://doi.org/10.1364/josa.57.000108).
9. Василенко, Г. И. Голографическое опознавание образов [Текст] / Г. И. Василенко. – М.: Сов. радио, 1977. – 328 с.
10. Сергеев, Г. А. Статистические методы исследования природных объектов [Текст] / Г. А. Сергеев, Д. А. Янутш. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 300 с.

Bibliography (transliterated):

1. Bieliaiev, O. V., Kartashov, V. M. (2015). Obnaruzhenie ob'ektov zadannoy formy i opredelenie ih koordinat na izobrazheniy v mul'timediynom strelkovom trenazhere [Objects detection and determination of their coordinates on the image in a multimedia shooting simulator]. Information processing systems, 10 (135), 16–21.
2. Bieliaiev, O. V., Zubkov, O. V., Kartashov, V. M., Tarasov, K. S. (2017). Signal processing in the universal multimedia shooting simulator. Vestnik NTU "KhPI", 16 (1238), 23–29.
3. Bieliaiev, O., Kartashov, V., Loutouangou, F. (2017). Strobing the moving objects marks in the image processing system with stationary video camera. ScienceRise, 3, 66–71. doi: [10.15587/2313-8416.2017.96524](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.96524).
4. Burlachenko, I., Zhuravska, I., Musiyenko, M. (2017). Devising a method for the active coordination of video cameras in optical navigation based on the multi-agent approach. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (9 (85)), 17–25. doi: [10.15587/1729-4061.2017.90863](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90863).
5. Tsymporenko, V., Tsymporenko, V. (2016). Development of direct method of direction finding with two-dimensional correlative processing of spatial signal. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (9 (84)), 63–70. doi: [10.15587/1729-4061.2016.85599](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85599).
6. Elachi, C., Bicknell, T., Jordan, R. L., Wu, C. (1982). Spaceborne synthetic-aperture imaging radars: Applications, techniques, and technology. Proceedings of the IEEE, 70 (10), 1174–1209. doi: [10.1109/proc.1982.12448](https://doi.org/10.1109/proc.1982.12448).
7. Sotnikov, A., Tarshyn, V., Yeromina, N., Petrov, S., Antonenko, N. (2017). A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (9 (87)), 68–74. doi: [10.15587/1729-4061.2017.101920](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101920).
8. Trabka, E. A., Roetling, P. G. (1967). Shape Detection using Incoherent Illumination*. Journal of the Optical Society of America, 57 (1), 108. doi: [10.1364/josa.57.000108](https://doi.org/10.1364/josa.57.000108).
9. Vasilenko, G. I. (1977). Golograficheskoe opoznavanie obrazov. Moscow: Sov. radio, 328.
10. Sergeev, G. A., Yanutsh, D. A. (1973). Statisticheskie metody issledovaniya prirodnih ob'ektov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 300.

Поступила (received) 11.07.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Застосування методу контурного аналізу зображень в системі обробки мультимедійного стрілецької тренажера/ Беляєв О. В., Зубков О. В., Карташов В. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.109–118. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Применение метода контурного анализа изображений в системе обработки мультимедийного стрелкового тренажера/ Беляев А. В., Зубков О. В., Карташов В. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.109–118. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Application of the method of contour analysis of images in the processing system of a multimedia shooting simulator/ Bieliaiev O., Zubkov O., Kartashov V. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242).– P.109–118. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Беляєв Олексій Володимирович – аспірант, асистент кафедри Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; e-mail: oleksii.bieliayev@nure.ua.

Зубков Олег Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; e-mail: oleh.zubkov@nure.ua.

Карташов Володимир Михайлович – доктор технічних наук, завідувач кафедри Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; te-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua.

Беляєв Алексей Владимирович – аспирант, ассистент кафедры Медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; тел. 093-13-32-729; e-mail: oleksii.bieliayev@nure.ua.

Зубков Олег Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры Медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: oleh.zubkov@nure.ua.

Карташов Владимир Михайлович – доктор технических наук, заведующий кафедры Медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua.

Belyaev Alexey – postgraduate student, assistant of the Department of Media Engineering and Information Radioelectronic Systems, Kharkov National University of Radio Electronics, 14 Nauka Avenue, Kharkov, Ukraine, 61166; E-mail: oleksii.bieliayev@nure.ua.

Zubkov Oleg – PhD, associate professor of the Department of Media Engineering and Information Radioelectronic Systems, Kharkov National University of Radioelectronics, 14 Nauka Avenue, Kharkov, Ukraine, 61166; E-mail: oleg.zubkov@nure.ua.

Kartashov Volodymyr – Doctor of technical sciences, professor, Head of the Department of Media Engineering and Information Radioelectronic Systems, Kharkov National University of Radioelectronics, 14 Nauka Avenue, Kharkov, Ukraine, 61166; E-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua.

УДК 004.853

В. О. ЛІСКІН

ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СТВОРЕННЯ КОНТЕНТУ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО НАВЧАННЯ

Проведено класифікацію систем комп'ютерного навчання. Досліджено поняття «онтологічного інжинірингу». Доведено актуальність розробки засобів автоматизації створення контенту. В роботі запропоновано метаонтологію навчальної дисципліни та модель тестового запитання. Модель тестового запитання дозволяє розробити алгоритми автоматичного генерування тестових запитань і контрольних робіт. Розроблену технологію узгоджено з таксономією Блюма та психологічними теоріями сприйняття навчального контенту. Експериментальне дослідження виявило кореляцію між розробленими методами автоматизованої перевірки знань з традиційними методами.

Ключові слова: інформаційна технологія, електронне навчання, дистанційне навчання, навчальний контент, метаонтологія, бази знань.

Проведена классификация систем компьютерного обучения. Исследовано понятие «онтологического инжиниринга». Доказана актуальность разработки средств автоматизации создания контента.

В работе предложено метаонтологию учебной дисциплины и модель тестового вопроса. Модель тестового вопроса позволяет разработать алгоритмы автоматического генерирования тестовых вопросов и контрольных работ.

Разработанную технологию согласован с таксономией Блума и психологическими теориями восприятия учебного контента.

Экспериментальное исследование выявило корреляцию между разработанными методами автоматизированной проверки знаний с традиционными методами.

Ключевые слова: информационная технология, электронное обучение, дистанционное обучение, учебный контент, метаонтология.

In this article, a classification of e-learning systems has been conducted. The “ontological engineering” term is researched. The relevance of development of means for automatization of content creation is grounded with proof.

This work proposes a metaontology of learning disciplines and the model for a test question. The metaontology of a learning disciplines is constituted of the didactic and content parts. The didactic part implements cross-subject connections, while the content part represents the knowledge of certain disciplines. The test question model allows developing algorithms for automatic generation of test and test questions.

The developed technology is matched with Bloom's taxonomy and psychological theories of content perception. The basis for an ontology driven management system is an engine, which ensures synchronous content playback and supports learning in a two-windowed mode. The educational application of ontology driven learning information technologies is based on granting lecture lessons with an additional motivational component, creation of computer based support of unsupervised work, automatization of knowledge level control tasks, which would allow to create more time for individual interaction between the student and the teacher.

The conducted experimental research has shown a correlation between the developed methods of automated knowledge testing and traditional methods.

Keywords: Information technology, e-learning, distance learning, educational content, metaontology.

Вступ. Розвиток сучасного суспільства характеризується постійно зростаючою роллю інформаційних технологій в усіх сферах людської діяльності. В останні роки об'єми інформації та знань збільшились в багато разів, що призвело до необхідності пошуку нових способів зберігання, представлення, формалізації, систематизації та автоматичної обробки інформації в комп'ютерних системах.

Пріоритетом концепції освіти є навчання через усе життя, основна форма якої – самостійна робота. При цьому значно зростає роль систем комп'ютерного навчання та дистанційної освіти як основного засобу навчання.

В той же час процес модернізації системи освіти який проходить в руслі Євроінтеграційних прагнень України та зростаюча кількість інформації виявила тренд до скорочення аудиторних годин і відповідно до зменшення часу на спілкування студентів із викладачем. У всьому світі визнано, що найбільш якісна освіта є при співвідношенні взаємодії одного викладача із одним студентом. Зазначені проблеми у освітній сфері можуть бути вирішені шляхом запрова-

дження у процес навчання вищих навчальних закладів України систем дистанційної освіти.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. З входженням у європейський освітній простір в Україні розвивається дистанційне навчання, яке регламентується з 2013 року положенням МОН України. Дистанційне навчання – це індивідуалізований процес набуття знань, умінь, навичок і способів пізнавальної діяльності людини, який відбувається в основному за опосередкованої взаємодії віддалених один від одного учасників навчального процесу у спеціалізованому середовищі, яке функціонує на базі сучасних психолого-педагогічних та інформаційно-комунікаційних технологій [1].

Під дистанційним навчанням розуміється взаємодія викладачів та студентів на відстані, що відбиває цілі, методи, організаційні форми і засоби навчання, реалізовані засобами інтерактивних технологій та представлені системами управління навчанням [2].

Електронне навчання сприяє створенню умов для розвитку особистісних якостей студентів в процесі освіти. Воно розглядається як спосіб підвищення

© В. О. Ліскін. 2017

ефективності засвоєння навчального матеріалу за рахунок аудіального, візуального, кінестетичного типів сприйняття інформації. Одночасне використання всіх трьох типів сприйняття підводить студента до стереоскопічного сприйняття [3].

Сучасне електронне навчання, включаючи системи на основі технології LMS (Learning Management System), MOOC (Massive Open Online Courses), WiKi та ін., характеризується високими темпами появи нових освітніх ресурсів і великим обсягом освітніх даних. При цьому кожен новий електронний курс, як правило, існує самостійно, а його автори створюють весь необхідний для його вивчення контент.

Домінують в області Internet освіти LMS – системи управління навчанням. До таких платформ відносяться WebCT/Blackboard, Moodle, Sakai. З точки зору еволюції електронного навчання вони забезпечили перехід до реалізації модульної архітектури і показали необхідність семантичного обміну [4]. Під впливом Web 2.0, який перетворив користувача інтернет з пасивного читача в автора, у терміні eLearning з'явився додатковий ідентифікатор – 2.0, що виводить навчання на новий рівень застосування соціального програмного забезпечення в учбовому процесі [5].

Досвід використання Moodle [6] показав, що застосування тестів з невеликим банком питань (менше 100) доцільно лише з метою перевірки знань, а використання тестів у режимі навчання можливе за наявності певної кількості (не менше 20) питань, що стосуються одного і того-ж факту з різними формулюваннями. Створення таких банків питань, її верифікація є досить трудомістким процесом.

Таким чином, розробка інформаційної технології, що базується на онтологічному інжинірингу освітніх процесів на основі семантичних технологій дозволить вирішити задачу автоматизації створення і підтримки в актуальному стані навчальних матеріалів, створення якісного контенту та дозволить вдосконалити контроль знань звільнивши час викладача від рутинної роботи на користь її творчої складової, при цьому підвищить якісний рівень освіти в системах комп'ютерного навчання та дистанційної освіти.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є створення технології підвищення ефективності навчального процесу ВНЗ шляхом інтеграції засобів комп'ютерного навчання та дистанційної освіти що базуються на підході онтологічного інжинірингу навчальних дисциплін. Для досягнення поставленої мети було поставлено й виконано такі задачі:

1. Провести дослідження підходів побудови та використання систем комп'ютерного навчання та дистанційної освіти, існуючих методів, моделей та технологій побудови онтологій навчальних дисциплін.
2. Розробити модель метаонтології навчальної дисципліни, яка дозволить автоматизувати створення контенту систем комп'ютерного навчання та дистанційної освіти.
3. Розробити концепцію рушія інформаційної системи та розробити онтологізовану інформаційну систему для комп'ютерного навчання та дистанційної освіти. Обґрунтувати навчальну методику інтеграції розроблених засобів в навчальний процес.

5. Провести експериментальне дослідження розроблених технологій з використанням розробленої онтологізованної інформаційної системи в навчальному процесі.

6. Проаналізувати результати застосування розробленої онтологізованної інформаційної системи.

Дослідження підходів побудови та використання систем комп'ютерного навчання та дистанційної освіти, існуючих методів, моделей та технологій побудови онтологій навчальних дисциплін. В результаті проведеного в роботі огляду засобів та технологій електронного навчання було запропоновано умовно поділити їх за функціональним призначенням на три групи: ті що забезпечують комунікацію і колективну взаємодію (соціальні мережі), ті, що зберігають, верифікують, рейтинують і надають доступ до знань або інформації – репозитарії та системи управління навчанням (Learning management systems LMS). Звичайно кожен окремих програмний засіб або Web-сервіс поєднує в собі в тій чи іншій мірі різні функціональні можливості. (рис. 1):

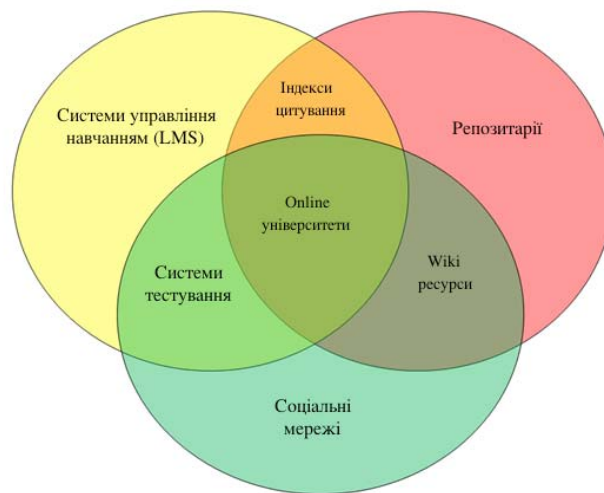


Рис. 1 – Діаграма функціональних можливостей технологій електронного навчання

На перетині функціоналу “LMS” та “репозитарій” знаходяться “індекси цитування”. Перетин груп “LMS” та “соціальні мережі” відповідає функціоналу “системи тестування”. А перетин “репозитаріїв” та “соціальних мереж” відповідає функціоналу “wiki”. В свою чергу перетин всіх трьох груп відповідає утворюють “online університети”.

Разом з тим розглянуті програмний засіб або Web-сервіс технології електронного навчання не надають в достатній кількості засобів автоматизації створення навчального контенту. Зокрема вони надають засоби для проведення лекцій, практичних, лабораторних та моніторингу знань студентів, аналізу проведеного моніторингу, але не мають відповідних засобів для створення тестових питань з існуючого контенту.

З розвитком Web 2.0 та соціальних мереж з'явилися нові форми електронної освіти, що виникають в результаті мережевої взаємодії студентів з ви-

кладачем і між собою, так звані колективні знання [4]. Освіта сьогодні не стоїть на місці, проте присутність викладача у віртуальному Інтернет середовищі є необхідною умовою, не тільки в сенсі створення контенту, а й розробки нових методичних прийомів.

Важливу роль при використанні та побудові освітнього процесу відіграють правильно поставлені освітні цілі. Широко відомі результати досліджень в цій галузі проведені Б. Блумом в 1956 році XX сторіччя.

Таксономія Блума – це ієрархічна система освітніх цілей, які охоплюють три рівні діяльності: когнітивну, афективну та психомоторну. Згідно з класифікацією таксономії Блума шести різних рівнів когнітивних освітніх цілей, що охоплюють процес мислення від найпростішого до найскладнішого: знання, розуміння, застосування, аналіз, синтез, оцінка.

На рис. 2 представлено, як на сьогоднішній день система навчання охоплює рівні таксономії.



Рис. 2 – Існуюча ситуація охоплення таксономії системою навчання

Як видно з рис. 2 останні рівні таксономії повністю лежать на самостійній роботі студента, а рівні “знання”, “розуміння”, “застосування” перетинаються в традиційному навчанні та електронному.

З метою повного охоплення таксономії та побудови особистісно-зорієнтованого навчального простору на рис. 3 пропонується бажана ситуація охоплення таксономії.



Рис. 3 – Бажана ситуація охоплення таксономії системою навчання

Запропонована на рис. 3 ситуація охоплення таксономії дає можливість побудови навчального процесу таким чином, щоб викладач створював проблемні ситуації, для їх усвідомлення та прийняття студентами, пошуку варіантів розв'язання різноманітних задач в процесі конструктивної взаємодії на лекційних, практичних та лабораторних заняттях. А самостійна робота студентів ґрунтувалась на електронному навчанні, яке складається з двох компонент: навчального контенту та моніторингу його засвоєння.

Таким чином перерозподіл навантаження та освітніх цілей дасть змогу підняти якісний рівень освіти за рахунок охоплення на заняттях більш високих рівнів когнітивного мислення.

Термін «онтологія» для позначення зв'язкового фрагмента декларативного знання та використання його в інформаційних технологіях було введено Томом Грубером в 1991 році [7].

Сам термін «онтологія» бере свій початок, як філософська дисципліна, яка вивчає найбільш загальні характеристики буття і сутностей. Визначення онтології в ІТ сфері, як формалізації деякої предметної області з'явилося порівняно недавно [8].

Повноцінна розробка онтологій з точки зору інформаційних систем почалася лише наприкінці 90-х. Це досить нова і мало розроблена галузь прикладної лінгвістики. Онтології широко використовуються у

всіх областях, що займаються обробкою даних на природній мові.

Згідно [9] формальною моделлю онтологічної системи Z є трійка вигляду:

$$Z = \langle O, P, M \rangle, \quad (1)$$

де O – метаонтологія; P – множина предметних онтологій і онтологій завдань предметної області; M – модель машини виведення даної онтологічної системи.

Метаонтологія O оперує загальними концептами і відношеннями, які не залежать від конкретної предметної області. Концептами метаонтології є “об’єкт”, “властивість”, “значення”. в той час коли предметна онтологія P містить поняття, що описують конкретну предметну область та відношення [9].

Онтологічний інжиніринг в освітньому процесі, зокрема в електронному навчанні, дозволяє отримати ряд переваг, таких як [10]:

- обмін інформацією між системами навчання та навчальними дисциплінами;
- надання можливості повторного використання навчальних об’єктів, таких як навчальні програми, банк тестів та ін.;
- реалізація інтелектуальної і персоналізованої підтримки студента [11];
- використання візуальних моделей предметних областей в викладанні різних дисциплін [12].

Використання онтології в освітньому процесі робить його більш адаптивним щодо побудови навчального процесу, опису моделей предметних областей навчальних дисциплін і дозволяє використовувати міждисциплінарні зв’язки та зв’язки між різними об’єктами освітнього процесу [13, 14].

Таким чином, застосування онтологічного інжинірингу для систем електронного навчання дозволяє описувати предметні області, що вивчаються в дистанційних курсах, зберігати інформацію про відносини між об’єктами предметної області, проводити аналіз змісту предметної області, змісту навчальних матеріалів та роботи студентів.

Модель метаонтології навчальної дисципліни, яка дозволить автоматизувати створення контенту систем комп’ютерного навчання та дистанційної освіти. Модель метаонтології навчальної дисципліни складається з двох частин змістовної та дидактичної.

$$O^{Meta} = \langle O^{Diadectics}, O^{Content} \rangle. \quad (2)$$

На підставі вивченого досвіду за елементом сутності дидактичної частини метаонтології повинна бути одиниця знання, яка з одного боку відповідає формальному поняттю [15], гештальтальту [16], концепту [17], але може бути названа або уявна. Для позначення такої одиниці запропоновано використовувати термін “чанк знань” по аналогії з [18] далі за текстом

«чанк» Таким чином базовим елементом – сутністю дидактичної онтології була взята трійка:

<чанк знань, мітка в контенті, відношення>.
Або:

$$O^{Diadectics} = \langle Ch, L, R \rangle, \quad (3)$$

де $Ch = \{ch_i\}$ – множина чанків з якої складається дидактична онтологія; $L_i = \{l_{li}, \dots, l_{mi}\}$ – множина міток в контенті; $R = \{r_j\}$ – множина відношень, при цьому є два відношення “чанк-чанк”, “чанк-мітка”, які можуть бути різних типів «вивчається після», «витікає з», «тотожність» «відповідність».

Мітки в контенті зв’язують змістовні блоки в рамках однієї дисципліни в різних типах контенту, будь то текстовий файл, презентація, відео файл, тест або контрольна робота. А також пов’язують чанки з контентом інших дисциплін.

Чанк вказує на деякий об’єкт предметної області, що представляється для вивчення студентів. Відношення дидактичного слідування між чанками вказує на порядок слідування чанків.

Так, наприклад чанк з дисципліни “Алгебра і геометрія” – “Система лінійних алгебраїчних рівнянь” має слідувати після вивчення чанків з меншою/більшою вагою (рис. 4).

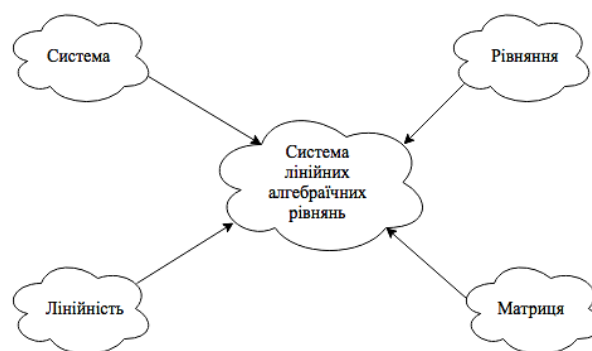


Рис. 4 – Чанк “СЛАР”

З другого боку змістовна модель метаонтології навчальної дисципліни представляється трійкою:

$$O^{Content} = \langle C, A, R \rangle, \quad (4)$$

де $C = \{c_i\}$ – множина об’єктів з якої складається онтологія навчальної дисципліни $O^{Content}$; $A_i = \{a_{li}, \dots, a_{ni}\}$ – множина властивостей об’єктів c_i , n – кількість властивостей, які описують даний об’єкт; $R = \{r_k\}$ – множина відношень між об’єктами та властивостями.

При побудові змістовної онтології навчальної дисципліни потрібно виділити основні сутності дисципліни [19]. Дані сутності співставляються з класами (рис. 5). В свою чергу кожен клас має ряд певних властивостей.

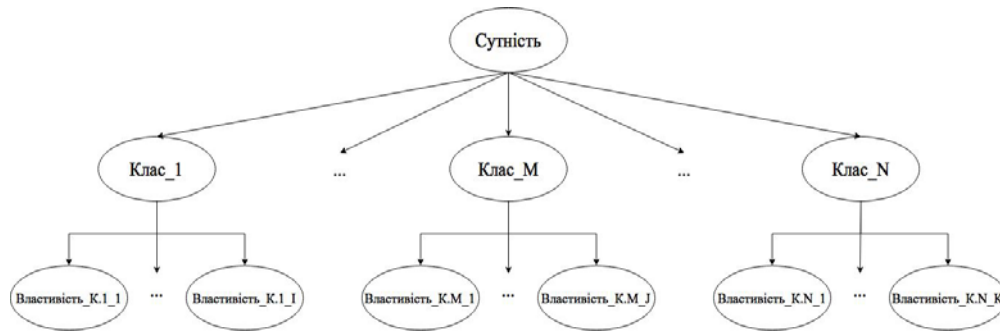


Рис. 5 – Принцип побудови онтології навчальної дисципліни

Множина об'єктів з якої складається онтологія навчальної дисципліни $O^{Content}$ разом з властивостями цих об'єктів та відношеннями між ними відображають знання студента з певної дисципліни.

Однією з головних особливостей розробленої моделі онтології є можливість міжпредметного зв'язування об'єктів в електронних курсах.

Онтології різних дисциплін, які побудовані за однією схемою, завдяки дидактичній частині, дають змогу автоматично виявляти міжпредметні зв'язки, і таким чином створювати нові міжпредметні онтології.

Наприклад, тест за курсом «Обчислювальна геометрія та комп'ютерна графіка» включає в себе вико-

ристання чанків, таких як «Вектор» і «Система координат».

Якщо студент не зможе успішно пройти даний тест, то за рахунок дидактичної онтології буде зрозуміло, що студент не засвоїв ці знання, а тому йому потрібно рекомендувати до повторення не тільки лекції з комп'ютерної графіки, а й певні лекції з векторної алгебри. Даний приклад демонструє зв'язування курсів «Обчислювальна геометрія та комп'ютерна графіка» та «Алгебра і геометрія» за допомогою чанків «Вектор» і «Система координат». Описаний приклад представлений на рис. 6.

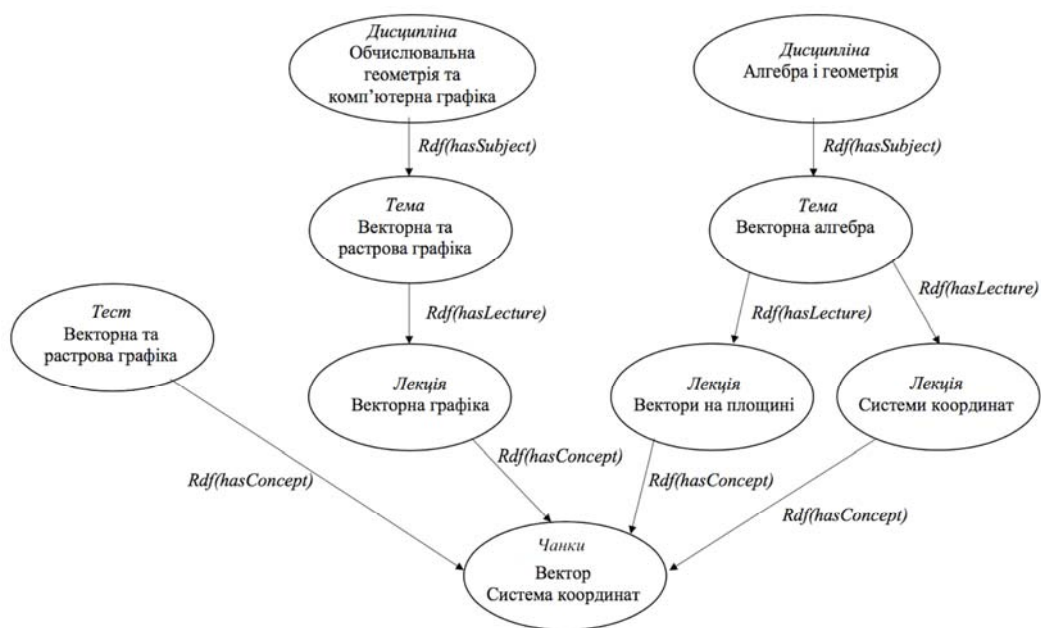


Рис. 6 – Міжпредметний зв'язок курсів

Таким чином, вирішена задача формування структури навчального матеріалу предметної області дисципліни за рахунок визначення властивостей навчальних об'єктів (теоретичного і практичного фрагменту, тестового завдання), що визначаються вектором параметрів (метаданих) і базуються на поняттях.

Для детального опису змісту тестових питань та їх автоматизованої генерації запропонована концепція онтології тестового питання. Онтологія тестових питань будується на основі онтології навчальної дисципліни в системах електронного навчання та інтегрується в основну онтологію з метою деталізації пред-

метної області, навчальних тестів в системах дистанційної освіти. Онтологія тестового завдання розроблялась за рахунок розкриття та конкретизації існуючих онтологій вищих рівнів, а саме детального розкриття кожного концепту та на основі детального розбору структури та типів тестових завдань, які були в системі дистанційної освіти. Саме тому онтологія тестового завдання має пірамідальну структуру.

Основними класами онтології тестового питання є:

- тест;
- тип тестового питання;
- обчислювальне завдання;

- типизоване питання;
- типизована відповідь.

Основною метою онтології тестового питання є представлення структури тестових завдань і надання можливості автоматичного семантичного зв'язування завдань тестів з концептами предметної області та автоматизованої генерації тестових питань по заданому концепту.

Як зазначалось в роботі [20], в основі міні-онтології тестового питання лежить поняття. Пропонується розглядати поняття як набір ланцюжків: сутність – зв'язок – опис, якому передують нотація:

Concept = Notatio: Essentia – Ligamentum – Descriptio (лат.)
Або :

$$C = \langle N, E, L, D \rangle, \quad (6)$$

де, N – нотація; $E = \{E_i\}$ – кортеж сутностей предметної області; L – зв'язки; $D = \{D_i\}$ – кортеж властивостей.

У зв'язку з тим, що в різних роботах українські терміни: «поняття», «контекст», «сутність» мають різні значення ми вживатимемо латинські терміни.

Таблиця 1 – Узагальнений приклад поняття предметної області з 5 сутностей

Concept: "Concept Name", Notatio: "Notatio Name"		
E	L	D
Essentia 1	Ligamentum_A	Descriptio 1
Essentia 2		Descriptio 2
Essentia 3		Descriptio 3
Essentia 4		Descriptio 4
Essentia 5		Descriptio 5

Розроблено міні-онтологію обчислювального завдання. В основі міні онтології обчислювального завдання лежить тип завдання. Пропонується розглядати завдання як набір ланцюжків: відповідь – математичні перетворення – проміжний результат – задача:

Або :

$$T = \langle X, A_1 \dots A_n, X_1 \dots X_n, P \rangle, \quad (7)$$

де, X – відповідь на обчислювальне завдання; $A_1 \dots A_n$ – математичні перетворення, які формують умову; $X_1 \dots X_n$ – проміжні результати відповідно до перетворень; P – умова обчислювального завдання.

На основі дослідження існуючих методів представлення онтологій, були розроблені правила та рекомендації щодо побудови онтології предметної області. А саме те, що ієрархія властивостей в представ-

ленні онтології повинна відповідати зв'язці тестового запитання.

Концепція рушія інформаційної системи та онтологокерована інформаційна система для комп'ютерного навчання та дистанційної освіти. Обґрунтування навчальної методики інтеграції розроблених засобів в навчальний процес. Концепція рушія онтологокерованої системи електронного навчання базується на "клієнт-серверній" архітектурі та має зручну для налаштування модульну структуру. Структура ОСЕН представлена на рис. 7.

Клієнтська частина ОСЕН базується на Web-браузері, який в залежності від типу користувача надає: інтерфейс адміністратора, інтерфейс викладача, інтерфейс студента.

Серверна частина ОСЕН складається з рушія підтримки онтологокерованого навчання, бази даних користувачів і результатів навчання та бази знань, яка поєднує онтологію навчальних дисциплін та навчальний контент.

Основними модулями є: модуль адміністрування, модуль аналізу результатів, модуль роботи з контентом, модуль чату, модуль тестування та модуль інтерактивного навчання.

Навчальний контент за допомогою метаонтології навчальних дисциплін та мініонтологій тестових завдань зберігається в базі знань, до якої надається доступ через модуль доступу до бази даних та бази знань.

Для того щоб розроблена технологія реалізовувала принципи індивідуалізації та диференціації процесу навчання було співставлено тип тестового питання у відповідності до компетенцій таксономії Блума (табл. 2).

Завдання I рівня складаються з типових завдань на один, два кроки. При виконанні правильно всіх завдань максимальна оцінка для студента задовільно (Е або D). Це означає, що студент оволодів базовими вміннями з дисципліни.

Завдання II рівня складаються з типових завдань на два-три кроки. При виконанні правильно всіх завдань максимальна оцінка для студента добре (В або С). Це означає, що студент вміє правильно виконувати завдання з достатнім поясненням.

Завдання III рівня складаються з завдань на три-чотири кроки. При виконанні правильно всіх завдань максимальна оцінка для студента відмінно (А). Це означає, що студент оволодів високим знаннями, вміннями та навичками.

Таблиця 2 – Компетенції – тип питання

Компетенції	Тип тестового питання	Диференціація
Знання	TF, так/ні питання; SA, множинний вибір з однією правильною відповіддю	I рівень складності
Розуміння	MA, множинний вибір з декількома правильними відповідями	II рівень складності
Застосування	M, питання на відповідність	III рівень складності

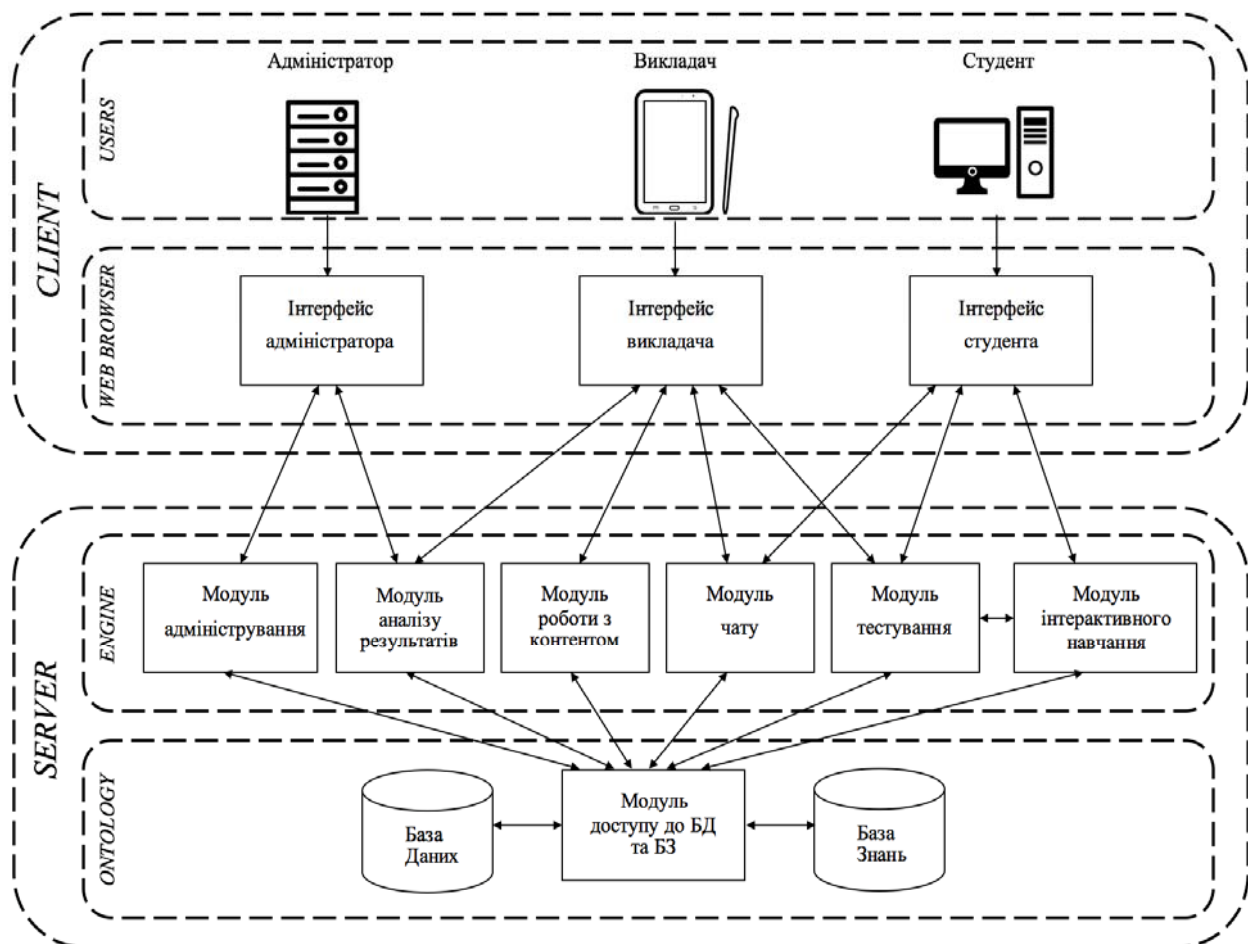


Рис. 7 – Структурна схема онтологокерованої системи електронного навчання

Експериментальне дослідження розроблених технологій з використанням розробленої онтологокерованої інформаційної системи в навчальному процесі. Для перевірки адекватності розробленої ОСЕН було проведено ряд експериментів серед учбових груп студентів кафедри прикладної математики КПІ ім. Ігоря Сікорського протягом 2014-2017 років.

Експеримент проводився на базі трьох навчальних дисциплін: “Алгебра і геометрія” (1 та 2 семестр), “Структури даних і алгоритми” (2 семестр), “Обчислювальна геометрія та комп’ютерна графіка” (4 семестр).

Аналіз методик роботи з тестовими запитаннями показав, що у випадку невеликої кількості банку запитань (до 30 по кожному розділу) тести доцільно використовувати лише для фінального контролю в режимі екзамену. Приймаючи до уваги, що при кожній спробі послідовність запитань і номери правильних відповідей тесту різні, можна розраховувати, на те що кожен студент має свою власну версію тесту, і буде відповідати самостійно.

Результати застосування розробленої онтологокерованої інформаційної системи. Було проведено експеримент, трьом групам студентів було запропоновано пройти три тестування з однієї теми:

- традиційне тестування до використання ОСЕН;
- тестування за допомогою ОСЕН в режимі «навчання»;
- тестування за допомогою ОСЕН в режимі «екзамен».

Після проведеного експерименту було проаналізовано результати студентів представлені на рис. 8.

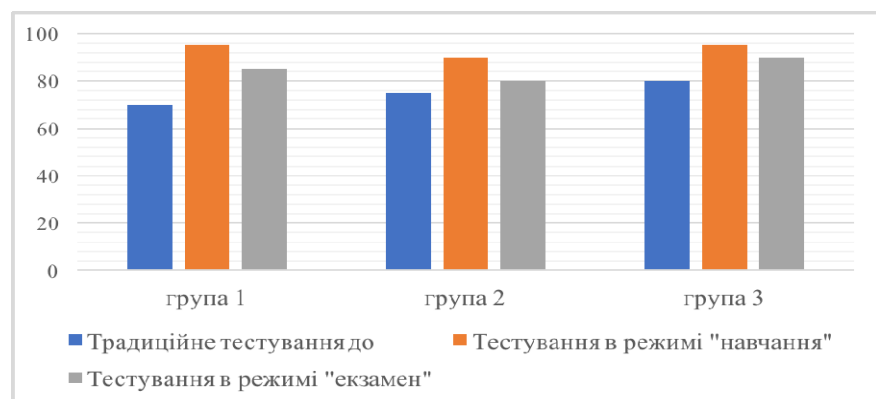


Рис. 8 – Аналіз результати трьох тестувань

Як видно з рис. 8 при тестуванні в режимі «навчання» студенти мають найкращий результат, оскільки система надає їм можливість переглянути інформацію про поняття в другому вікні.

З іншого боку при тестуванні в режимі «екзамену» студенти підвищили свої знання щонайменше на 10% порівняно з тестування до використання ОСЕН. Це зумовлено більшою мотивованістю та уважністю, а також індивідуальним підходом при вивченні дисципліни в ОСЕН.

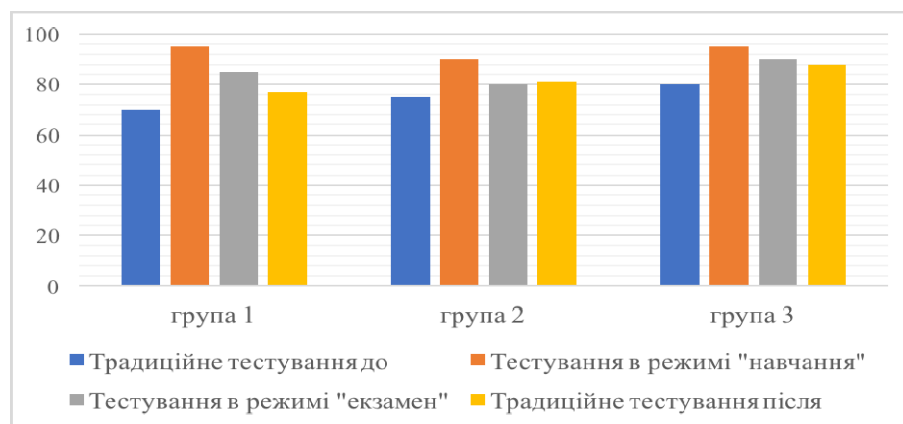


Рис. 9 – Порівняння результатів тестування “до” та “після” використання ОСЕН

Як видно з рис. 9 при повторному традиційному тестуванні вже після використання ОСЕН студенти також підвищили свої знання щонайменше на 7% порівняно з початковим тестуванням.

Таким чином, за допомогою ОСЕН у студентів створено цілісне уявлення про предметну область та засобами автоматизованого контролю проведено діагностування та моніторинг ефективності її використання.

Розроблена інформаційна система на основі онтологій дозволяє виявити недобросовісних студентів, що виводить комп’ютерне навчання та дистанційну освіту на новий якісний рівень.

Аналіз відповідей на тестові запитання в порівнянні із усною бесідою показав що найбільш ефективними для розв’язання даної задачі є ситуаційні тести. Тобто запитання ставлять студентів певну ситуацію і пропонують шляхи вирішення.

Результати застосування розробленої онтологієваної системи електронного навчання та створеного банку тестових питань та обчислювальних завдань на контрольних і тестованих групах студентів, при викладанні трьох дистанційних курсів показали, що успішність навчання та оволодіння знаннями,

уміннями та навичками дисциплін покращилася в середньому на 8 %.

Висновки

1. Проведено огляд і класифікацію існуючих систем комп’ютерного навчання та систем підтримки онтології. Досліджено поняття «онтологічного інжинірингу» та основні технології які він використовує. Виділено спільний та відмінний функціонал засобів та сервісів електронного навчання. Доведено актуальність розробки засобів автоматизації створення контенту.

2. Запропоновано метаонтологію навчальної дисципліни, яка складається з дидактичної та предметної частин. При цьому дидактична частина реалізує міжпредметні зв’язки, а предметна частина відображає знання певної дисципліни. Запропоновано модель тестового запитання яка дозволила розробити алгоритми автоматичного генерування тестових запитань і контрольних робіт

3. Розроблена технологія узгоджується із сучасними педагогічними теоріями зокрема, з таксономією Блума та психологічними теоріями сприйняття навчального контенту. Особливістю концепції онтологієваної системи управління навчальним контентом є рушій, який забезпечує синхронне відтворення контенту та підтримку процесу навчання в двовіконному режимі. Основні засади освітньої методики, яка базується на інформаційній технології онтологієваної навчання полягають в наданні лекційним заняттям мотиваційної складової, створення комп’ютерної підтримки для самостійної роботи, автоматизацію контрольних заходів що дозволить збільшити час на індивідуальне спілкування викладача і студента.

4. В результаті проведеного експериментального дослідження було виявлено кореляцію між розробленими методами автоматизованої перевірки знань з традиційними методами. В якості нової можливості розробленої технології можна відзначити здатність системи виявляти несумлінне ставлення до навчання. Розроблена технологія, за умови її комерційного просування, могла би зайняти достойне місце в сучасному освітньому процесі.

Список літератури:

1. Журавський, В. С. Болонський процес: головні принципи входження в європейський простір вищої освіти [Текст] / В. С. Журавський, М. З. Згуровський. – К.: Політехніка НУТУ "КПІ", 2003. – 195 с.
2. Положення про дистанційне навчання [Текст]. – Міністерство Освіти і Науки України. – 2013. – № 466. – Режим доступу: http://osvita.ua/legislation/Dist_osv/2999/print/
3. Герасимчук, О. О. E-learning. Технології електронного навчання [Текст]: навч. пос. / О. О. Герасимчук; Луц. держ. техн. ун-т. – Луцьк, 2008. – 430 с.
4. Dagger, D. Service-Oriented E-Learning Platforms: From Monolithic Systems to Flexible Services [Text] / D. Dagger, A. O'Connor, S. Lawless, E. Walsh, V. P. Wade // IEEE Internet Computing. – 2007. – Vol. 11, Issue 3. – P. 28–35. doi: [10.1109/mic.2007.70](https://doi.org/10.1109/mic.2007.70)
5. Web 2.0: перелом в парадигме обучения [Электронный ресурс] // Открытые системы. – 2008. – № 9. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2008/09/5717450/>
6. Сирота, С. В. Використання системи “Moodle” для викладання дисципліни “Алгоритми і структури даних” – досвід і проблеми [Текст] / С. В. Сирота, В. О. Ліскін // ScienceRise. – 2015. – Т. 9, № 2 (14). – С. 30–35. doi: [10.15587/2313-8416.2015.50610](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.50610)

7. Gruber, T. R. The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases [Text] / T. R. Gruber, J. A. Allen, R. Fikes, E. Sandewell; M. Kaufmann (Ed.) // Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Proceedings of the Second International Conference. – 1991. – P. 601–602.
8. Добров, Б. В. Онтологии и тезаурусы [Электронный ресурс] / Б. В. Добров, В. В. Иванов, Н. В. Лукашевич, В. Д. Соловьев // Режим доступа: <http://download.yandex.ru/class/solovyev/plan.pdf>
9. Лутвин, В. В. Технології менеджменту знань [Текст]: навч. пос. / В. В. Лутвин; ред. В. В. Пасічника. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 260 с.
10. Сирота, С. В. Обзор современных онтологически ориентированных информационных систем и сервисов и перспективы их использования в электронном образовании [Текст] / С. В. Сирота, В. О. Лискин // Технологический аудит та резерви виробництва. – 2015. – Т. 5, № 6 (25). – С. 58–60. doi: [10.15587/2312-8372.2015.51234](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.51234)
11. Gaeta, M. Ontology Extraction for Knowledge Reuse: The e-Learning Perspective [Text] / M. Gaeta, F. Orcioli, S. Paolozzi, S. Salerno // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans. – 2011. – Vol. 41, Issue 4. – P. 798–809. doi: [10.1109/tsmca.2011.2132713](https://doi.org/10.1109/tsmca.2011.2132713)
12. Gavrilova, T. A. Using visual conceptual models in teaching [Text] / T. A. Gavrilova, I. A. Leshcheva, E. S. Bolotnikova // Proceedings of the 8th International Conference on Education (ICE- 2012). – 2012. – P. 191–197.
13. Wilson, R. The role of ontologies in teaching and learning [Text] / R. Wilson // TechWatch Reports. – 2004.
14. Гаврилова, Т. А. Использование моделей инженерии знаний для подготовки специалистов в области информационных технологий [Текст] / Т. А. Гаврилова, И. А. Лещева, Д. В. Кудрявцев // Системное программирование. – 2012. – Т. 7, № 1. – С. 90–105.
15. Ganter, B. Formal Concept Analysis: Mathematical Foundations [Text] / B. Ganter, R. Wille. – Springer, 1999. – 284 p. doi: [10.1007/978-3-642-59830-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59830-2)
16. Валькман, Ю. Р. Гештальты и метафоры в когнитивной семиотике [Текст] / Ю. Р. Валькман // XV міжнародна наукова конференція IAI-2015 ім. Т. А. Таран. – Київ: Просвіта, 2015. – С. 31–39.
17. Langacker, R. W. Introduction to Concept, Image, and Symbol [Text] / R. W. Langacker // Cognitive linguistics: basic readings. – Berlin, New-York: Mouton de Gruyter, 2006. – Vol. 34. – P. 29–67.
18. Канеман, Д. Внимания и усилие [Текст] / Д. Канеман. – М.: Смысл, 2006. – 288 с.
19. Сирота, С. В. Онтологический инжиниринг систем компьютерного обучения на примере дисциплин учебного плана подготовки бакалавров по специальности прикладная математика [Текст] / С. В. Сирота, В. О. Лискин // XVI міжнародна наукова конференція IAI-2016 ім. Т. А. Таран. – Київ: Просвіта, 2016. – С. 208–213.
20. Сирота, С. В. Разработка генератора тестов для “Moodle” на базе онтологии [Текст] / С. В. Сирота, В. О. Лискин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Т. 5, № 2 (77). – С. 44–48. doi: [10.15587/1729-4061.2015.51334](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51334)

Bibliography (transliterated):

1. Zhuravskiy, V. S., M. Z. Zghurovskiy (2013). Bolonskiy protses: holovni pryntsyipy vkhodzhennia v yevropeiskiy prostir vyshchoi osvity. Kyiv: Politehnika NUTU "KPI", 195.
2. Polozhennia pro dystantsiynе navchannia (2013). Ministerstvo Osvity i Nauky Ukrainy, No. 466. Available at: http://osvita.ua/legislation/Dist_osv/2999/print/
3. Herasymchuk, O. O. (2008). E-learning. Tekhnolohii elektronnoho navchannia. Luts'k, 430.
4. Dagger, D., O'Connor, A., Lawless, S., Walsh, E., Wade, V. P. (2007). Service-Oriented E-Learning Platforms: From Monolithic Systems to Flexible Services. IEEE Internet Computing, 11 (3), 28–35. doi: [10.1109/mic.2007.70](https://doi.org/10.1109/mic.2007.70)
5. Web 2.0: perelom v paradigmatе obucheniya (2008). Otkrytye sistemy, 9. Available at: <http://www.osp.ru/os/2008/09/5717450/>
6. Syrota, S. V., Liskin, V. O. (2015). Experience and problems of using “moodle” for the course “algorithms and data structures”. ScienceRise, 9 (2 (14)), 30–35. doi: [10.15587/2313-8416.2015.50610](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.50610)
7. Gruber, T. R., Allen, J. A., Fikes, R., Sandewell, E., Kaufmann, M. (Ed.) (1991). The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases. Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Proceedings of the Second International Conference, 601–602.
8. Dobrov, B. V., Ivanov, V. V., Lukashevich, N. V., Solov'ev, V. D. Ontologii i tezaurusy. Available at: <http://download.yandex.ru/class/solovyev/plan.pdf>
9. Lytvyn, V. V.; Pasichny, V. V. (Ed.) (2010). Tekhnolohii menedzhmentu znan. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politehniki, 260.
10. Syrota, S. V., Liskin, V. O. (2015). The review of modern ontology driven information systems and services, prospect of their application in e-learning. Technology audit and production reserves, 5 (6 (25)), 58–60. doi: [10.15587/2312-8372.2015.51234](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.51234)
11. Gaeta, M., Orcioli, F., Paolozzi, S., Salerno, S. (2011). Ontology Extraction for Knowledge Reuse: The e-Learning Perspective. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans, 41 (4), 798–809. doi: [10.1109/tsmca.2011.2132713](https://doi.org/10.1109/tsmca.2011.2132713)
12. Gavrilova, T. A., Leshcheva, I. A., Bolotnikova, E. S. (2012). Using visual conceptual models in teaching. Proceedings of the 8th International Conference on Education (ICE- 2012), 191–197.
13. Wilson, R. (2004). The role of ontologies in teaching and learning. TechWatch Reports.
14. Gavrilova, T. A., I. A. Leshcheva, D. V. Kudryavcev (2012). Ispol'zovanie modeley inzhenerii znaniy dlya podgotovki specialistov v oblasti informatsionnykh tekhnologii. Sistemnoe programmirovaniye, 7 (1), 90–105.
15. Ganter, B., Wille, R. (1999). Formal Concept Analysis: Mathematical Foundations. Springer, 284. doi: [10.1007/978-3-642-59830-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59830-2)
16. Val'kman, Yu. R. (2015). Geshtal'ty i metafory v kognitivnoy semiotike. XV mizhnarodna naukova konferentsiia IAI-2015 im. T. A. Taran. Kyiv: Prosvita, 31–39.
17. Langacker, R. W. (2006). Introduction to Concept, Image, and Symbol. Cognitive linguistics: basic readings. – Berlin, New-York: Mouton de Gruyter, 34, 29–67.
18. Kaneman, D. (2006). Vnimanie i usilie. Moscow: Smysl, 288.
19. Syrota, S. V., Liskin, V. O. (2016). Ontologicheskii inzhenering sistem komp'yuternogo obucheniya na primere disciplin uchebnogo plana podgotovki bakalavrov po special'nosti prikladnaya matematika. XVI mizhnarodna naukova konferentsiia IAI-2016 im. T. A. Taran. Kyiv: Prosvita, 208–213.
20. Syrota, S. V., Liskin, V. O. (2015). Development of onthology based quiz generator for “Moodle”. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (2 (77)), 44–48. doi: [10.15587/1729-4061.2015.51334](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51334)

Надійшла (received) 07.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Технологія для автоматизації створення контенту систем комп'ютерного навчання/ Ліскін В. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.118–127. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-5459.

Технология для автоматизации создания контента систем компьютерного обучения/ Лискин В. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 20(1242). – С.118–127. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-5459.

Technology for automating the creation of content for computer training systems/ Liskin V. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242).– P.118–127. – Bibliogr.:20. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ліскін Вячеслав Олегович – аспірант, кафедра прикладної математики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056, e-mail: lis-580@rambler.ru.

Лискин Вячеслав Олегович – аспирант, кафедра прикладной математики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056, e-mail: lis-580@rambler.ru.

Viacheslav Liskin – Postgraduate student at the Department of Applied Mathematic, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Peremohy ave., Kyiv, Ukraine 03056, e-mail: lis-580@rambler.ru.

ЗМІСТ

Балакін С. В. Організація запобігання вторгнень в комп'ютерні мережі алгоритмами виявлення змін	3
Савченко С.В., Тимчик Г. С. Метод контроля сварных соединений баллистических стальных стержней с помощью акустической эмиссии	7
Шлыков В. В., Данилова В. А., Диденко М. Пирометрическая система контроля температуры	11
Кулик Я. А., Книш Б. П., Шкуран М. В., Черноволик О. В. Розробка системи стеження за рухом сонця для підвищення ККД сонячних електростанцій	19
Лисий А.О. Забезпечення безпечної льодової навігації на каналах Азовського моря	25
Онищук В. В. Розв'язування системи рівнянь Нав'є-Стокса для оцінки динамічної рівноваги системи «галактика – космічний простір Всесвіту»	30
Сергеев-Горчинский А. А. Выбор меры различия значений образцового и отфильтрованного биомедицинских сигналов	37
Сердюк О. Ю. Розробка інформаційної технології верифікації показників оптимізації періодичних операційних процесів та виявлення прогностичних властивостей верифікованих показників	42
Федоров Н. В., Хренов А. М. Структурная и параметрическая оптимизация локальной подсистемы инженерной сети	48
Романюк В. А., Жук О. В., Ткаченко Д. В. Управління енергоспоживанням в безпроводових сенсорних мережах	53
Мегель Ю. Е., Путятин В. П., Левкин Д. А., Левкин А. В. Математическое моделирование и оптимизация параметров действия лазерного луча на многослойные биоматериалы	60
Березовський С. О. 3D програмно-конфігуровані комутаційні структури на елементах Березовського	65
Сорокун А. Д. Дослідження можливості та перспектив використання каналу передачі з можливістю корекції помилок в області стеганографії	72
Дьомін Р. Ю. Дослідження втомного руйнування бандажів коліс тягового рухомого складу	77
Иукурдизе Э. Ж., Ткаченко О. Б., Киселёв С. В. Лаборатория сенсорного анализа как современный инструмент в технологии вина	83
Гасымов С. Ю., Мамедов Р. С. Численное моделирование процесса фильтрации газа и воды на основе разностно-итерационного метода в подвижных сетках	89
Годун Н. І., Миздренко О. М., Буц М. А., Харченко Н. А. Класифікація професійних захворювань та їх профілактика	94
Рикусова Н. І. Вплив на навколишнє природне середовище (НПС) бурових робіт та відходів буріння нафтогазових свердловин	98
Павличенко А. В., Бучавий Ю. В., Федотов В. В., Деменко О. В., Тріпачова К. В. Удосконалення системи обліку, оцінки і моніторингу техногенних родовищ з використанням геоінформаційних технологій	103
Беляев А. В., Зубков О. В., Карташов В. М. Применение метода контурного анализа изображений в системе обработки мультимедийного стрелкового тренажера	109
Ліскін В. О. Технологія для автоматизації створення контенту систем комп'ютерного навчання	118

CONTENTS

Balakin S. Organization of prevention of intrusions in computer networks using algorithms for detecting changes	3
Savchenko S., Timchik G. Method of control of wall compounds of ballistic steels based on acoustic emissions	7
Shlykov V., Danilova V., Didenko M. Pyrometric system of temperature control	11
Kulik Y. A., Knysh B. P., Shkuran M. V., Chernovolik O. V. Development of the solar tracking system to increase the efficiency of solar power plants	19
Lysyi A. The ensuring safe ice navigation on the Azov Sea channels	25
Onischuk V. Solving the Navier-Stokes equations for estimating the dynamic equilibrium of the "galaxy-space universe" system	30
Serheiev-Horchynskiy O. Selection of Error Measure for Reference and Filtered Biomedical Signals Values	37
Serdiuk O. Development of information technology of verification of optimization indicators for periodic operating processes and determination of prognostic properties of verified indicators	42
Fedorov N., Khrenov A. Structural and parametric optimization of the local subsystem of the engineering network	48
Romaniuk V., Zhuk O., Tkachenko D. Power management in wireless sensor networks	53
Megely Yu., Pytyatin V., Levkin D., Levkin A. Mathematical modeling and optimization of parameters of action of a laser beam on multilayered biomaterials	60
Berezovsky S. 3D Program-configurable commutative structures using the elements by Berezovsky	65
Sonokun A. Investigation of the possibility and prospects of using the transmission channel with the possibility of correction of errors in the field of steganography	72
Domin R. Investigation of fatigue failure of wheel bandages of traction rolling stock	77
Iukuridze E., Tkachenko O., Kiselev S. Laboratory of sensory analysis as modern instrument in wine-making technology	83
Qasimov S. Y., Mammadov R. S. Numerical simulation of the process of gas and water filtration on the basis of the difference - iterative method in moving grids	89
Godun, N. Mizdrenko O., Buzz M., Kharchenko N. Classification of professional diseases and their prevention	94
Rykusova N. Impact of drilling operations and waste of drilling of oil and gas wells upon natural environment	98
Pavlychenko A., Buchavyy Yu., Fedotov V., Demenko O., Tripachova K. Improvement of the accounting, assessment and monitoring system of technogenic deposits using geoinformation technologies	103
Bieliaiev O., Zubkov O., Kartashov V. Application of the method of contour analysis of images in the processing system of a multimedia shooting simulator	109
Liskin V. Technology for automating the creation of content for computer training systems	118

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць

Серія:

Механіко-технологічні системи та комплекси

№ 20(1242) 2017

Наукові редактори: д-р техн. наук, проф. Д. О. Дьомін
д-р техн. наук, проф. О. В. Акімов
Технічний редактор П. С. Пензев

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кірпічова, 21, НТУ «ХПІ».
Кафедра ливарного виробництва.
Тел. (057) 707-68-54; e-mail: c7508990@gmail.com

Обл.-вид. №11-17

Підп. до друку 26.08.2017р. Формат 60x84/16. Надруковано на різнографі
Gestetner 6123CP. Ум.-друк. арк. 16,25. Облік.вид.арк. 17,47.
Наклад 100 прим. Зам. № 32-17. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК №3657 від 24.12.2009
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня "Технологічний Центр"
Свідоцтво про державну реєстрацію №1 480 120 0000 021055 від 02.04.2002
Адреса: 61145, м. Харків, вул. Шатилова дача,4, тел. (057)750-89-90