

**ОДЕССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ
СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ**

МОНОГРАФИЯ

ОДЕССА 2020

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 681.518.54

ББК 32.966

И 74

Авторский коллектив:

Борисова Н., Васянин В., Волошин В., Волошинов С., Вольская О., Востров Г., Вычужанин В., Гобов Д., Гоменюк С.І., Гришин С., Дрозд А., Дрозд Ю., Журиленко Б., Защелкин К., Заяц Ю., Кораблев Н., Красиленко В., Кузнецов Н., Лазарев А., Лисецкий Ю., Мартынюк А., Межуев В.І., Мельник К., Мироненко Д., Ю., Михайлов С., Николаев К., Опята Р., Петров И., Поворознюк А., Поворознюк О., Постан М., Рудниченко Н., Ситников В., Стрельцов О., Ступень П., Теплечук А., Трофимчук А., Ухіна Г., Ушакова Л., Федосова И., Филатова А., Фомичев А., Чуприна А., Чупринка В., Чупринка Н., Шibaев Д., Шibaева Н., Шинкевич Е.

Рецензенты:

ГОВОРУЩЕНКО Татьяна, доктор технических наук, профессор, Хмельницкий национальный университет (Украина);

ПАКСТАС Альгирдас, доктор технических наук, профессор, институт математики и информатики (Великобритания);

ЦАРЕВ Александр, доктор технических наук, профессор, Западно-Поморский технологический университет (Польша).

Рекомендовано в печать ученым советом

Одесского национального политехнического университета

(протокол № 1 от 30.09.2020 г.)

И 74 АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ: монография / Борисова Н., Васянин В. и др.; под науч. ред. проф. Вычужанина Владимира. –, 2020. – 296 с.:ил., табл. (укр., рус., англ. языками)

ISBN

В монографии отражены результаты научных исследований в области информационных систем управления, интеллектуальных систем и анализа данных, моделирования и разработки программ. Материалы монографии будут полезными для аспирантов, магистрантов, преподавателей высших учебных заведений, специализирующихся в области IT-технологий.

УДК 681.518.54

ББК 32.966

ISBN

© Одесский национальный
политехнический университет, 2020
© Коллектив авторов, 2020

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
<u>Информационные системы управления</u>	
<i>К.ф.-м.н. Журиленко Б.Е., Николаев К.И.</i>	
ОЦЕНКА МНОГОУРОВНЕВОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ПО ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ОДНОУРОВНЕВОЙ ЗАЩИТЕ.....	6
<i>Д.т.н. Волошин В. С., д.пед.н. Федосова И. В., к.т.н. Мироненко Д. С.</i>	
МЕХАНИЗМ ЭНЕРГОЗАТРАТНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЯХ БЛОКЧЕЙНА КАК ВОЗМОЖНЫЙ ФАКТОР ОГРАНИЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ.....	20
<i>Д.т.н. Чупринка В.И. к.т.н. Чупринка Н.В.</i>	
МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ РОЗКРОЮ МАТЕРІАЛІВ ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ НА ПЛОСКІ ГЕОМЕТРИЧНІ ОБ'ЄКТИ ЗІ СКЛАДНОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ ЗОВНІШНІХ КОНТУРІВ.....	32
<i>Ухина А.В., Афанасьев И.А., д.т.н. Ситников В.С., к.т.н. Стрельцов О.В., к.т.н. Ступень П.В.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОГО КОМПОНЕНТА.....	45
<u>Интеллектуальные системы и анализ данных</u>	
<i>К.т.н. Рудниченко Н.Д., д.т.н. Вычужанин В.В., к.т.н. Шibaева Н.О., Шibaев Д.С., к.т.н. Отрадская Т.В., к.т.н. Петров И.М.</i>	
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕРАКТИВНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ДАННЫХ НА БАЗЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	59
<i>Д.т.н.Кораблев М.М., д.т.н.Аксак Н.Г., к.т.н.Фомічов О.О.,Чуприна А.О.</i>	
РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ЗОБРАЖЕННІ ЗА ДОПОМОГОЮ CNN І НЕЙРО-НЕЧІТКОГО КЛАСИФІКАТОРА З ІМУННИМ НАВЧАННЯМ.....	72
<i>Д.т.н., проф. Поворознюк А.И., к.т.н. Поворознюк О.А.</i>	
САМООРГАНИЗАЦИЯ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ МОДЕЛИ С ЛИНЕЙНЫМИ ЧАСТНЫМИ ОПИСАНИЯМИ.....	88
<i>Д.т.н. Филатова А.Е. , Фахс М.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ....	101
<i>Д.т.н. Дрозд А.В., к.т.н. Мартынюк А.Н., к.т.н. Защелкин К.В., Кузнецов Н.А., к.т.н. Дрозд Ю.В.</i>	
МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ FPGA ПРОЕКТА ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ.....	115
<i>К.т.н. Мельник К.В., к.т.н. Борисова Н.В.</i>	
РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПІДБОРУ ПЕРСОНАЛУ.....	129
<i>Д.т.н. Лисецкий Ю.М.</i>	
ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ.....	143

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

<i>К.т.н. Гришин С.И., д.т.н. Шинкевич Е.С.</i> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ.....	155
<i>Д.т.н. Михайлов С.А., к.т.н. Харченко Р.Ю.</i> ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ МЕРЕЖ В АДАПТИВНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ КЛІМАТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ.....	165
<u>Моделирование и разработка программ</u>	
<i>Ph.D. Vostrov G., Opiata R.</i> PROBABILISTIC METHODS IN COMPUTER SIMULATION OF THE FORMATION OF CLASSES OF PRIMES AND ESTIMATION OF THE CONSTANTS OF THE GENERALIZED ARTIN HYPOTHESIS.....	176
<i>Д.т.н. Вычужанин В.В., Вычужанин А.В., к.т.н. Козлов А.Е.</i> КОГНИТИВНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	192
<i>Dr.Sci. Postan M.</i> TWO-PHASE MULTI-NOMENCLATURE PRODUCTION/STORAGE MODEL WITH RANDOM INPUT.....	212
<i>Dr.Sci. Pihnastyi O.M., Dr.Sci. Khodusov V.D.</i> THE STABILIZATION PROBLEM THE FLOW PARAMETERS OF THE PRODUCTION LINE.....	223
<i>Д.т.н. Васянин В.А., Заяц Ю.В., Ушакова Л.П.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУЗОПОТОКОВ В МЕЖДУНАРОДНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ.....	233
<i>Лаврик В.В., д.т.н. Гоменюк С.І., д.т.н. Межуєв В.І.</i> ВИВЕДЕННЯ МАТРИЦІ ЖОРСТКОСТІ ДЛЯ ТЕТРАЇДАЛЬНОГО СКІНЧЕНОГО ЕЛЕМЕНТА МЕТОДОМ МССЕ.....	249
<i>К.т.н. Гобов Д.А.</i> СУЧАСНЕ РОЗУМІННЯ БІЗНЕС-АНАЛІЗУ ТА ЙОГО СКЛАДОВИХ В ІТ-ПРОЕКТАХ.....	260
<i>Ph.D. Krasilenko V.G., Ph.D. Lazarev A.A., Nikitovich D.V.</i> THE BLOCK PARAMETRIC MATRIX AFFINE-PERMUTATION CIPHERS (BP_MAPCS) WITH ISOMORPHIC REPRESENTATIONS AND THEIR RESEARCH.....	270
<i>К.т.н. Волошинов С., д.т.н. Вольская О., Попова Х., Юрженко А.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LMS MOODLE В КАЧЕСТВЕ АДМИНИСТРАТИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ БУДУЩИХ МОРСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ.....	283

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ПРЕДИСЛОВИЕ

В коллективной монографии изложены результаты научных исследований в области информационных технологий, информационных систем управления, интеллектуальных систем, анализа данных, моделирования и разработки программ.

Монография составлена в виде научных статей-разделов, соответствующих тематическим направлениям, в которых основательно отражены результаты исследований в следующих направлениях: блокчейн и криптотехнологии, системы управления в робототехнических системах, безопасность данных и криптография, ИКТ в сети и администрировании, методология и дидактика обучения и использования ИКТ, искусственный интеллект, разработка и анализ больших данных, информационные системы и технологии в Data Mining, интеллектуальные технологии управления, процесс разработки приложений, математическое моделирование, системный анализ, разработка программного обеспечения.

В коллективной монографии авторами уделено внимание решению проблем в области информационных управляющих систем и технологий применением технологии хранения и управления данными, разработки программного обеспечения интерактивного интеллектуального анализа больших данных на базе методов машинного обучения, распознавания объектов изображения с помощью CNN и нейро-нечеткого классификатора с иммунным обучением.

Значительное внимание уделено оценке многоуровневой защите информации по эквивалентной одноуровневой защите, механизму энергозатратности в технологиях блокчейна как возможному фактору ограничения для пользователей, самоорганизации мультипликативной модели с линейными частными описаниями и другим актуальным темам.

Благодаря приведенным результатам исследований читатели получают полезный объем знаний, необходимых для лучшего понимания проблем и их решений в области информационных управляющих систем и технологий.

Материалы монографии будут полезными для аспирантов, магистрантов, преподавателей высших учебных заведений, специализирующихся в области информационных систем и технологий.

В работе над коллективной монографией приняли участие ученые в составе 20 докторов наук, 22 кандидатов наук, 14 соискателей.

Информационные системы управления

УДК 004.056.5(045)

**ОЦЕНКА МНОГОУРОВНЕВОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ПО
ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ОДНОУРОВНЕВОЙ ЗАЩИТЕ**

К.ф.-м.н. Журиленко Б.Е., Николаев К.И.

Аннотация. В данной работе проведены теоретические исследования физического процесса взлома комбинированной многоуровневой технической защиты информации (ТЗИ) с вероятностной надежностью, сравнение и оценка ее параметров взлома по эквивалентной одноуровневой защите. В исследованиях использовался подход, связанный с надежностью различной аппаратуры, технических устройств и систем, которые достаточно подробно изучены и обеспечили хорошие практические результаты с количественной вероятностной оценкой. Для расчетов и оценки возможностей комбинированной многоуровневой технической защиты информации использовались одноуровневые ТЗИ с вероятностной надежностью, предложенные и рассмотренные в работах Б. Журиленко. В работе предложен метод построения комбинированной многоуровневой технической защиты информации с вероятностной надежностью и возможностью ее оценки и сравнения с эквивалентной одноуровневой защитой. Такое сравнение может оказаться полезным при оценке и сравнении многоуровневых ТЗИ, поскольку такой подход позволит оценивать разные структуры многоуровневых защит и достаточно просто сравнивать модернизируемые, проектируемые и существующие ТЗИ с единой точки зрения. Проведенные исследования показали, что поверхность распределения максимумов вероятностей взлома эквивалентной одноуровневой ТЗИ не совпадает с распределением максимумов вероятности взлома комбинированной ТЗИ. Поэтому сравнение защит возможно только в выбранном для анализа направлении взлома. Для анализа и сравнения защищенности информации в других направлениях взлома необходимо по предложенной методике рассчитать и построить распределение максимумов вероятности взлома для этих направлений. В работе предложен способ определения реальной вероятности взлома комбинированной защиты не по максимальному значению вероятности взлома, а по реальному распределению вероятности взлома комбинированной многоуровневой ТЗИ, так как взлом ТЗИ не обязательно происходит при максимальных значениях вероятности взлома. В этом случае по построенным поверхностям вероятностей взлома реальную надежность ТЗИ можно определять для любого направления взлома.

Ключевые слова: техническая защита информации, эквивалентная одноуровневая защита, комбинированная многоуровневая защита информации с вероятностным взломом, распределение максимума вероятности взлома, распределение вероятности взлома, реальный процесс взлома.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

1. ВВЕДЕНИЕ

Безопасность циркулирующей информации в технических системах с программным управлением, и ее утечка будет определяться физическими, техническими и программными взаимодействиями этих систем и отражена в работах [1-6]. Например, в компьютерной системе безопасность информации будет зависеть от доступа различных устройств к устройству хранения этой информации. Доступ к сохраняемой информации может осуществляться через параллельно и последовательно работающие устройства. Такая схема работающих устройств усложняет оценку утечки сохраняемой информации. Параллельно и последовательно работающие устройства могут существенно изменять вероятность доступа к защищаемой информации. С точки зрения защиты информации работу параллельно и последовательно работающих устройств можно представить, как комбинированную многоуровневую техническую защиту информации (ТЗИ). Оценка общей вероятности взлома такой сложной многоуровневой ТЗИ можно определить через вероятность взлома эквивалентной одноуровневой защиты. Такой подход даст возможность оценивать и сравнивать различные комбинированные многоуровневые системы доступа к информации с вероятностной надежностью.

В работах Б. Журиленко достаточно подробно рассмотрены вопросы взлома одноуровневой защиты информации, но практически не уделено внимание вопросам проектирования и анализу состояния работающих комбинированных многоуровневых защит.

Известны методы расчета надежности различной аппаратуры [7], технических устройств и систем, которые достаточно подробно изучены и обеспечили хорошие практические результаты с количественной вероятностной оценкой. Эти методы дают хорошие результаты по обеспечению надежности различных работающих технических систем и устройств, поэтому желательно использовать эти методы расчета надежности к проектированию и анализу состояния многоуровневых систем защиты информации, тем более, что рассматриваемые в работах Б.Журиленко одноуровневые системы защиты дают количественную вероятностную оценку и могут быть применимы для расчета общей вероятности взлома комбинированной ТЗИ.

На практике основная трудность оценки и анализа состояния комбинированной многоуровневой технической защиты информации с помощью входящих в нее одноуровневых защит заключается в том, что неизвестно, какая из одноуровневых защит уже взломана (при разных коэффициентах эффективности защит) и какова осталась вероятность взлома этой многоуровневой защиты. Оценить состояние

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

комбинированной многоуровневой защиты можно, если известно распределение максимума вероятности взлома ТЗИ.

Из всего разнообразия технического взаимодействия и достаточно сложных технических систем, в которых циркулирует информация, рассмотрим комбинированную защиту информации с вероятностной надежностью, состоящую из двух параллельных, а затем одной последовательной защит.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Известно [6], что вероятность выхода из строя сложных технических систем будет определяться вероятностями надежности составляющих этих систем. Для ТЗИ представление сложных технических систем будет соответствовать проникновению через комбинированную многоуровневую защиту, для чего злоумышленнику необходимо взломать конкретные защиты, имеющие доступ к информации.

На рис.1 представлена структурная схема комбинированной многоуровневой защиты информации. Доступ к информации (выход 3) возможен из входов 1 и 2.

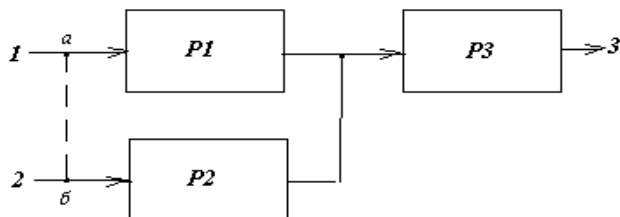


Рис. 1– Структурная схема рассматриваемой комбинированной защиты информации; 1, 2 – входы от устройств доступа к информации; 3 – выход к устройству хранения информации; а-б – возможная связь между входами 1, 2; P1, P2, P3 – вероятности взлома защит при несанкционированном доступе к информации.

Защита информации осуществляется устройствами с вероятностями взлома P1, P2, P3. Если входы 1 и 2 соединены между собой (пунктирное соединение а-б), тогда будем иметь параллельно подключенные защиты с вероятностями взлома P1, P2 и последовательную к ним защиту с вероятностью взлома P3. Если входы 1 и 2 не соединены между собой, тогда получаем два раздельных входа с доступом к информации через последовательные защиты с вероятностями взлома P1, P3 и P2, P3. Исследования распределений вероятности и максимума вероятности

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

взлома для последовательной двухуровневой системы защиты информации и сравнение ее с эквивалентным распределением одноуровневой защиты были рассмотрены ранее.

В данной работе проведемы теоретические исследования процесса взлома комбинированной многоуровневой защиты информации, представленной на рис.1, с соединением а-б между входами 1 и 2. Если попытки по взлому защит будут осуществляться одновременно через входы 1 и 2, то для расчетов распределений вероятностей будем использовать разные интенсивности и направления взломов.

3. ФОРМУЛИРОВАНИЕ ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Актуальность работы заключается в том, чтобы в отличие от нормативных документов разработать новый подход к требованиям ТЗИ, опирающийся на реальные физические процессы взлома информации.

Научная новизна заключается в разработке новой методологии в подходе к проектированию, анализу рабочего состояния работающей ТЗИ с целью экономии финансовых затрат, вкладываемых в защиту.

Целью работы является получение поверхностей распределения максимума вероятности и распределения вероятности взломов для комбинированной многоуровневой системы защиты информации и сравнение ее с эквивалентным распределением одноуровневой защиты, что позволит исследовать и сравнить различные виды комбинированных многоуровневых защит информации при их работе, проектировании и модернизации.

Задача исследования – разработка методологии и способа получения распределений вероятностей взлома ТЗИ с учетом направления взлома.

Объект исследования – процесс технической защиты информации.

Предмет исследования – распределение вероятностной надежности ТЗИ в зависимости от направления взлома.

Методы исследования – основываются на математическом представлении реального процесса взлома защиты информации.

4. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЙ

Теоретическое построение и исследование комбинированной многоуровневой системы защиты информации и сравнение ее с эффективным распределением одноуровневой защиты.

Существуют публикации [8-10] для одноуровневой защиты информации, в которых получены распределения вероятностей взлома в зависимости от вложенного финансирования в защиту, коэффициента эффективности защиты и направления процесса взлома, то есть от попытки m и времени этой попытки взлома t . Поверхность

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

распределения максимумов вероятности взлома будет описываться выражением

$$P_{\text{взл}}(m, t) = \{ P(X) \cdot \left[\frac{f(m, t)}{f(m, t) + t} \right]^{\frac{f(m, t)}{t}} \cdot \left[\frac{t}{f(m, t) + t} \right]^y =$$

$$= \{ P(X) \cdot \left[\frac{f(m)}{f(m) + t} \right]^{\frac{f(m)}{t}} \cdot \left[\frac{t}{f(m) + t} \right]^y$$
(1)

где $f(m, t) = f(m)$ - произвольная положительная функция, которая не может быть отрицательной, согласно работам [8-10].

Таким образом, имеем

$$f(m) = [t_1 + \frac{t_2 - t_1}{m_2 - m_1} \cdot (m - m_1)] \cdot (m - 1). \quad (2)$$

Анализируя выражение (2), отметим, что для обеспечения защиты информации функция рисков защищенности $f(m, t) = f(m)$ с ростом времени t должна быть хотя бы постоянной. Если функция $f(m, t)$ со временем будет уменьшаться, то используемая защита является неэффективной и ее необходимо заменить на другую более эффективную защиту. Если $f(m, t)$ увеличивается со временем, то такая защита в процессе эксплуатации более эффективна, так как риски защищенности будут увеличиваться со временем. Поверхность распределения вероятности взлома будет описываться выражением

$$P1_{\text{взл}}(m, t) = \{ P(X) \cdot \left[\frac{f(m, t)}{f(m, t) + t} \right]^{\frac{f(m_c, t_c)}{t_c}} \cdot \left[\frac{f(m, t)}{f(m, t) + t} \right]^y =$$

$$= \{ P(X) \cdot \left[\frac{f(m, t)}{f(m, t) + t} \right]^{\frac{f(m_c)}{t_c}} \cdot \left[\frac{f(m, t)}{f(m, t) + t} \right]^y$$
(3)

где функцию $f(m_c, t_c) = f(m_c)$, определяющую направление взлома, в зависимости от изменения одной из координат можно представить в виде максимального значения попытки взлома с координатами m_c и t_c .

$$f(m_c, t_c) = f(m_c) = [t_1 + \frac{t_2 - t_1}{m_2 - m_1} \cdot (m_c - m_1)] \cdot (m_c - 1) \quad (4)$$

Уравнения (1), (2), (3) и (4) позволяют рассчитать вероятности взломов комбинированной многоуровневой защиты, представляющей комплекс из одиночных защит. Данный подход к расчету вероятности взлома многоуровневой защиты является одним из способов оценки вероятностной надежности многоуровневого комплекса технической защиты информации (ТЗИ).

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрим случай ТЗИ, представленный на рис.1, состоящей из трех одноуровневых систем защиты информации с распределениями максимумов вероятностей взлома для одной или первой защиты $P1=P1_{\text{макс}}$, другой или второй - $P2=P2_{\text{макс}}$, и третьей - $P3=P2_{\text{макс}}$, поверхности которых определяются выражением (1), то есть распределения максимумов вероятностей взлома для второй и третьей защит одинаковы. Для вычислений и построения поверхностей максимумов вероятностей взлома будем считать, что параметры первой защиты $P1$ будут: $X1=x/H=0,5$, x – вложенное в первую защиту финансирование, H – финансовые потери при отсутствии защиты; $\gamma1=X1/(1+X1)=0,333$ – коэффициент эффективности первой защиты; $P1(X1)=X1^{X1}/(1+X1)^{1+X1}=0,385$ – максимум вероятности взлома от приведенного вложенного финансирования в защиту $X1$; $\omega1=(m21-m11)/(t21-t11)=1$ – направление или интенсивность взлома; $m11=1$, $t11=0$ – начальные условия процесса взлома для первой защиты (первая попытка взлома и ее время); $m12=3$, $t12=2$ – последующая попытка взлома и ее время по направлению взлома для первой одноуровневой защиты. Аналогичным образом определяем параметры для второй $P2$ и третьей $P3$ защит информации: $X2=0,4$ – приведенное вложенное финансирование во вторую и третью защиту; $\gamma2=0,286$ – коэффициент эффективности второй и третьей защиты; $P2(X2)=0,433$ – максимум вероятности взлома от приведенного вложенного финансирования во вторую и третью защиту $X2$; $\omega2=(m22-m21)/(t22-t21)=0,429$ – направление или интенсивность взлома по второй и третьей защите; $m21=1$, $t21=0$ – начальные условия процесса взлома для второй и третьей защиты (первая попытка взлома и ее время); $m22=7$, $t22=14$ – последующая попытка взлома и ее время по направлению взлома для второй и третьей одноуровневой защиты.

На рис.2 представлены, рассчитанные по формуле (1), поверхности распределений максимумов вероятностей взломов ТЗИ в зависимости от попыток и их времени взлома (темные поверхности): для первой защиты рис.2а по линии взлома 1; для второй и третьей защиты по линии взлома 2 – рис.2б. Линия 1 указывает направление взлома по первой одноуровневой защите, а линия 2 – по второй и третьей. Светлая поверхность дает реальную вероятность взлома каждой из защит и определяется выражением $P_{\text{реал}}=1/m$, где m текущая попытка взлома. Из рис.2 видно, что рассчитанные поверхности взлома ТЗИ мало отличаются друг от друга, хотя расчетные направления взлома у этих защит разные. Малые различия поверхностей максимумов вероятностей взломов объясняются близкими по значению исходными параметрами.

По пересечению темной, светлой поверхностей максимумов вероятностей и направлению линии взлома (рис.2) можно определить

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

параметры максимальных значений вероятности попытки и времени этой попытки взлома для одноуровневых защит с разными направлениями взлома.

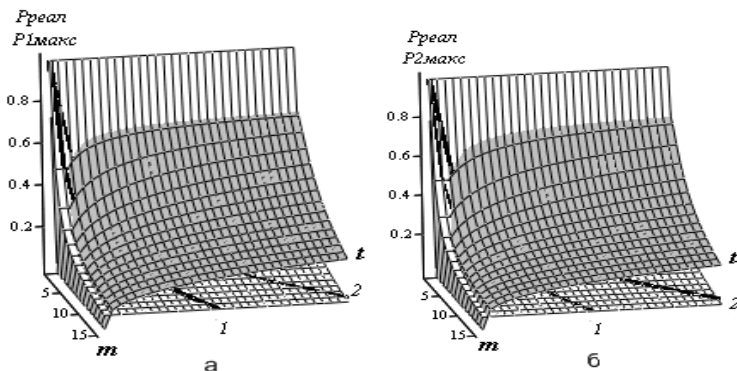


Рис. 2 – Поверхности распределений максимумов вероятностей взломов ТЗИ в зависимости от попыток и их времени взлома (темная поверхность); $P1_{\max}$ – для первой защиты $P1$; $P2_{\max}$ – для второй $P2$ и третьей $P3$; $P_{\text{реал}}$ – распределение вероятности реального взлома (светлая поверхность)

Возможно, разные направления взлома позволят проектировать многоуровневые комплексы с большей эффективностью защиты информации и сравнивать эти многоуровневые ТЗИ посредством их эквивалентных параметров для одноуровневой защиты по защитным свойствам. Для линии 1 и соответствующей ей расчетной поверхности координата точки максимума взлома для первой защиты будет $m1_{\text{взл}}=3$ и $t1_{\text{взл}}=2$, а для второй, третьей защиты и линии 2 – $m2_{\text{взл}}=2$ и $t2_{\text{взл}}=2$.

В результате рассматриваемой структурной схемы (рис.1) комбинированной защиты информации вероятность доступа к устройству или информационной системе будет определяться выражением

$$P_{\text{макс0}} = (P1_{\text{макс}} + P2_{\text{макс}} - P1_{\text{макс}} \cdot P2_{\text{макс}}) \cdot P2_{\text{макс}} \quad (5)$$

Определим параметры попытки и ее времени максимума вероятности взлома в направлении линии 2, для выбранной структурной схемы комбинированной многоуровневой ТЗИ. По этим параметрам максимума вероятности взлома определяем все необходимые параметры для эквивалентной одноуровневой защиты. По приведенным исходным данным по формулам (1) и (5) рассчитываем максимумы вероятности взлома комбинированной многоуровневой защиты информации.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Результаты расчета представлены на рис.3. Видно, что максимум вероятности взлома по направлению линии 2 будет в точке пересечения светлой (реальной) и темной (рассчитанной) поверхностей взлома при $m_{max}=7,5$ и $t_{max}=15$. По направлению линии 1 значение максимума вероятности взлома будет при больших значениях m_{max} и t_{max} и на представленной расчетной области рис.3 не отображается, так как интенсивность взлома по линии 1 больше, чем по линии 2.

Для представления параметров многоуровневой ТЗИ через эквивалентную одноуровневую защиту воспользуемся формулами работ [7-11]. В работе [7] представлено уравнение для определения коэффициента эффективности защиты информации одноуровневой ТЗИ.

$$\gamma = \frac{-\ln(m_{max})}{\ln\left[\frac{(m_{max}-1)^{(m_{max}-1)}}{(m_{max})^{m_{max}}}\right] + \ln\left[\frac{(X_i)^{X_i}}{(1+X_i)^{(1+X_i)}}\right]} = \frac{X_i}{1+X_i} \quad (6)$$

Решая уравнение (6) относительно эффективного приведенного вложенного финансирования в двухуровневую защиту X_i по точке максимума взлома, можно определить все необходимые эквивалентные параметры одноуровневой ТЗИ.

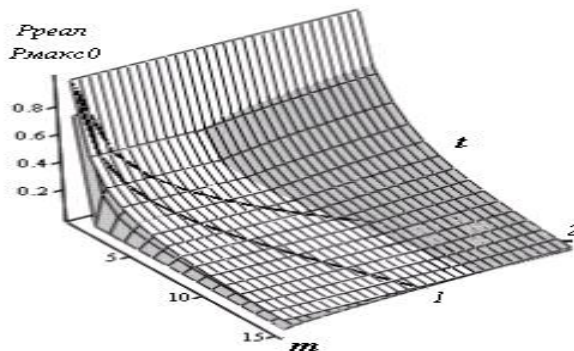


Рис.3 – Распределение максимума вероятности взлома для комбинированной многоуровневой защиты информации

На рис.4 представлено графическое решение уравнения (6). Где $P(X_i)$ - максимум вероятности взлома от эффективного приведенного вложенного финансирования в защиту X_i ; $f1(X_i)$ – функциональная зависимость средней части уравнения (6) от X_i ; $f2(X_i)$ – функциональная

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

зависимость правой части уравнения (6) от X_i . Пересечение $f1(X_i)$ и $f2(X_i)$ дает решение уравнения (6) $X_i=0,9$. Учитывая, что эффективный коэффициент одноуровневой защиты будет при $X_i=0,9$, получим $\gamma=f2$ (Графическое решение уравнения (6) дает следующие параметры для эквивалентной одноуровневой защиты $P(X_i)=0,27$; $\gamma=0,47$. Используя полученные параметры и направление взлома по линии 2 в формуле (1), получим поверхность максимумов вероятностей взломов одноуровневой защиты эквивалентной комбинированной многоуровневой ТЗИ, представленной на рис.5. При необходимости определить эквивалентную многоуровневую защиту для комбинированной защиты в другом направлении взлома необходимо на рис.3 построить другое направление и определить параметры максимума вероятности взлома в этом направлении. А затем, так же как по линии 2 и параметрам взлома, определить все необходимые параметры для эквивалентной одноуровневой защиты. При сравнении рис.3 и рис.5 видно, что одноуровневая защита, эквивалентная многоуровневой ТЗИ, не полностью соответствует максимумам вероятности взлома рассматриваемой многоуровневой ТЗИ. Однако следует заметить, что в выбранном направлении взлома эквивалентные одноуровневые защиты полностью соответствуют параметрам комбинированной ТЗИ и, следовательно, различные многоуровневые защиты в выбранном направлении взлома можно сравнивать. На практике реальный процесс взлома возможен не обязательно при максимальной вероятности взлома. Реальный взлом возможен и при других вероятностях взлома, хотя теоретически он наиболее возможен при максимальной вероятности.

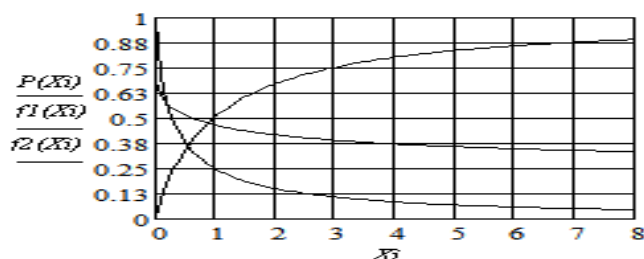


Рис.4 – Графическое решение уравнения (6)

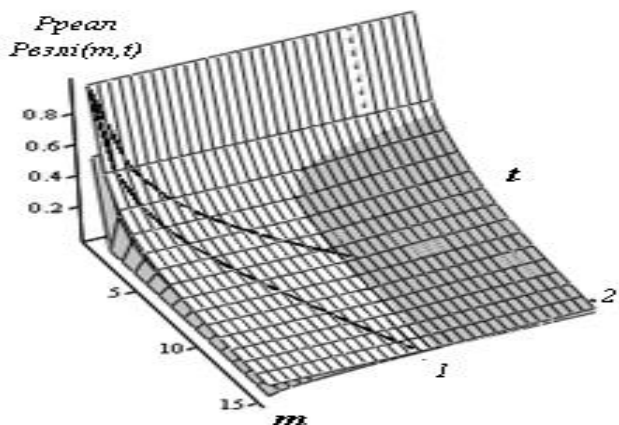
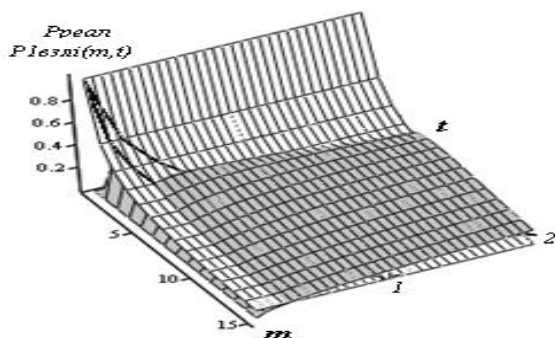


Рис.5 – Распределения поверхности вероятности реального взлома (светлая поверхность) и максимумов вероятности взлома одноуровневой защиты эквивалентной комбинированной многоуровневой ТЗИ (темная поверхность)

Чтобы определить вероятность реального процесса взлома, необходимо использовать выражение для распределения вероятности взлома (3) для каждого из выбранных направлений взлома с максимумами для линии 1 - $m_{1\text{взл}}=3$ и $t_{1\text{взл}}=2$, а для второй линии 2 – $m_{2\text{взл}}=2$ и $t_{2\text{взл}}=2$, и построить поверхность распределения вероятности взлома для комбинированной многоуровневой защиты. Рассчитывая распределение вероятностей взлома одноуровневых защит в соответствии с (5), получим реальное распределение вероятности взлома комбинированной многоуровневой защиты.

На рис.6 представлены расчеты поверхностей распределения реальной вероятности взлома (светлая поверхность) и распределения вероятности взлома комбинированной многоуровневой технической защиты информации (темная поверхность), которые определяются формулами (3) и (5). Из сравнения рис.3 и рис.6 видно, что в отличие от распределения максимумов вероятности взлома (рис.3) реальный взлом ТЗИ наиболее вероятен для направления по линии 1 в точке $m_1=4$ и $t_1=3$ и для направления по линии 2 в точке $m_2=4$ и $t_2=6$. Чтобы определить реальную вероятность взлома в других направлениях, необходимо построить эти направления и найти точку пересечения поверхностей рис.6 и других линий. Точка пересечения даст возможную реальную попытку и время этой попытки взлома ТЗИ.



***Рис.6** – Распределения реальной вероятности взлома и вероятности взлома комбинированной многоуровневой технической защиты информации*

5. ВЫВОДЫ

В данной работе проведены теоретические исследования физического процесса взлома для комбинированной многоуровневой технической защиты информации с вероятностной надежностью. Для расчетов, оценки и сравнения ее с эквивалентной одноуровневой защитой использовались одноуровневые ТЗИ с вероятностной надежностью. Сравнение с эквивалентной одноуровневой защитой может оказаться полезным при оценке и сравнении комбинированных многоуровневых ТЗИ, поскольку такой подход позволит оценивать разные структуры комбинированных многоуровневых защит и достаточно просто сравнивать модернизируемые, проектируемые и существующие рабочие ТЗИ с единой точки зрения. Проведенные исследования показали, что поверхность распределения максимумов вероятностей взлома эквивалентной одноуровневой ТЗИ не совпадает с распределением максимумов вероятности взлома комбинированной многоуровневой ТЗИ. Поэтому, сравнение защит возможно только в выбранном для анализа направлении взлома. Для анализа и сравнения защищенности информации в других направлениях, необходимо по предложенной методике рассчитать и построить распределение максимумов вероятности взлома для этих направлений. В работе предложен способ определения реальной вероятности взлома комбинированной многоуровневой защиты не по максимальному значению вероятности взлома, а по распределению вероятности взлома комбинированной ТЗИ, так как взлом ТЗИ не обязательно может

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

происходить при максимальных значениях вероятности взлома. В этом случае, по построенным поверхностям вероятностей взлома, можно определять реальную надежность ТЗИ для любых направлений взлома. Исследования комбинированной схемы защиты информации, для выбранных параметров одиночных защит, показали некоторое улучшение защиты информации по сравнению с одноуровневыми защитами. Возможность повышения эффективности защиты требует дополнительных исследований. Данный подход позволит исследовать и более сложные схемы защиты информации.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Tawfik Mudarri, Samer Abdo AL-RABEEI,: Security fundamentals: access control models. International journal of interdisciplinary in theory and practice, ITPB - NR.: 7, pp. 259-262. (2015)

[2] Jerome H. Saltzer, Michael D. Schroeder.: The Protection of Information in Computer Systems. https://www.google.com/search?q=3.+https%3A%2F%2Fwww.cl.cam.ac.uk%2Fteaching%2F1011%2FR01%2F75-protection.pdf&rlz=1C1AOHY_ruUA820UA823_&q=3.+https%3A%2F%2Fwww.cl.cam.ac.uk%2Fteaching%2F%2011%2FR01%2F75-protection.pdf&aqs=chrome..69i57.3772j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8

[3] Bokova O. I., Drovnikov I. G., Popov A. D., Rogozin E. A.: Model of the process of functioning of the information protection system from unauthorized access created in the software environment of imitation modeling "CPN TOOLS". https://www.researchgate.net/publication/334492982_MODEL_OF_THE_PROCESS_OF_FUNCTIONING_OF_THE_INFORMATION_PROTECTION_SYSTEM_FROM_UNAUTHORIZED_ACCESS_CREATED_IN_THE_SOFTWARE_ENVIRONMENT_OF_IMITATION_MODELING_CPN_TOOLS

[4] Jerome H. Saltzer, Michael. Schroeder.: The Protection of Information in Computer Systems. <https://www.cl.cam.ac.uk/teaching/1011/R01/75-protection.pdf>

[5] Albert Caballero.: Information Security Essentials for IT Managers: Protecting Mission-Critical Systems. https://booksite.elsevier.com/samplechapters/9781597495332/02~Chapter_1.pdf

[6] Pierangela Samarati, Sabrina de Capitani di Vimercati.: Access Control: Policies, Models, and Mechanisms. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/2F3-540-45608-2_3.pdf

[7] Румшинский Л.З. Элементы теории вероятностей / Румшинский Л.З. - М.: Изд-во «Наука», Главн. Ред. Физ.-мат. Лит., 1970. 256 с.

[8] Журиленко Б.Е. Метод проектирования и оценка работающей одиночной технической защиты информации по выбранному направлению взлома/ Журиленко Б.Е./Захист інформації, 2019. – №3(21). – С. 143-149. DOI:10.18372/2410-7840.21.13950

[9] Информационные управляющие системы и технологии. Проблемы и решения: монография. / авт. кол.: Васянин В., Журиленко Б., Николаева Н [и др.]; под науч. ред. проф. В.Вычужанина – Одесса: Экология, 2019 – С. 60-73.

[10] Журиленко Б.Е. Метод проектирования единичной системы технической защиты информации с вероятностной надежностью и заданными

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

параметрами взлома / Б.Е. Журиленко // Безпека інформації, 2014. – №1(20). – С. 36-42.

[11] Журиленко Б.Е. Оценивание финансовых затрат на построение системы защиты информации/ Журиленко Б.Е.//Захист інформації, 2018. – №4(20). – С. 231-239. DOI:10.18372/2410-7840.20.13424

EVALUATION OF MULTILEVEL PROTECTION OF INFORMATION ON EQUIVALENT SINGLE LEVEL PROTECTION

Zhurilenko Borys, Nikolaev Kirill

Abstract. In this work, theoretical studies of the physical hacking process of combined multi-level technical information protection (TIP) with probabilistic reliability, comparison and assessment of its cracking parameters by equivalent single-level protection are carried out. The research used an approach related to the reliability of various equipment, technical devices and systems, which were studied in sufficient detail and provided good practical results with a quantitative probabilistic assessment. To calculate and evaluate the capabilities of combined multilevel technical information protection, we used single-level TIP with probabilistic reliability, proposed and considered in the works of B. Zhurilenko. A method for constructing a combined multi-level technical protection of information with probabilistic reliability and the possibility of evaluating and comparing it with equivalent single-level protection is proposed. Such a comparison may be useful in assessing and comparing multilevel TIP, since such an approach will make it possible to evaluate different structures of multilevel protection and it is quite simple to compare modernized, designed, and existing TIP from a single point of view. Studies have shown that the distribution surface of the maximum probabilities of breaking the equivalent single-level TIP does not coincide with the distribution of the maximums of breaking probabilities of the combined TIP. Therefore, protection comparisons are only possible in the hacking direction selected for analysis. To analyze and compare the security of information in other areas of hacking, it is necessary to calculate and construct the distribution of the maximums of the probability of breaking for these areas using the proposed methodology. The paper proposes a method for determining the real probability of breaking a combined defense not by the maximum value of the probability of breaking, but by the real distribution of the probability of breaking a combined multi-level TIP, since breaking a TIP will not necessarily occur at the maximum values of the probability of breaking. In this case, based on the constructed surfaces of the probabilities of breaking, the real reliability of the TIP can be determined for any direction of breaking.

Keywords: technical protection of information, equivalent single-level protection, combined multi-level protection of information with probabilistic hacking, distribution of the maximum probability of hacking, distribution of the probability of hacking, the real process of hacking.

**ОЦІНКА БАГАТОРІВНЕВОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ ПО
ЕКВІВАЛЕНТНОМУ ОДНОРІВНЕВОМУ ЗАХИСТУ**

К.ф.-м.н. Журіленко Б.Є., Миколаїв К.І.

Анотація. У даній роботі проведено теоретичні дослідження фізичного процесу злому комбінованої багаторівневої технічного захисту інформації (ТЗІ) з ймовірнісної надійністю, порівняння і оцінка її параметрів злому по еквівалентній однорівневої захисту. У дослідженнях використовувався підхід, пов'язаний з надійністю різної апаратури, технічних пристроїв і систем, які досить детально вивчені і забезпечили хороші практичні результати з кількісної ймовірнісної оцінкою. Для розрахунків і оцінки можливостей комбінованої багаторівневої технічного захисту інформації використовувалися однорівневі ТЗІ з ймовірнісної надійністю, запропоновані і розглянуті в роботах Б. Журіленко. В роботі запропонований метод побудови комбінованої багаторівневої технічного захисту інформації з ймовірнісної надійністю і можливістю її оцінки та порівняння з еквівалентної однорівневої захистом. Таке порівняння може виявитися корисним при оцінці і порівнянні багаторівневих ТЗІ, оскільки такий підхід дозволить оцінювати різні структури багаторівневих захистів і досить просто порівнювати модернізовані, проєктовані й існуючі ТЗІ з єдиної точки зору. Проведені дослідження показали, що поверхня розподілу максимумів ймовірностей злому еквівалентної однорівневої ТЗІ не збігається з розподілом максимумів ймовірності злому комбінованої ТЗІ. Тому порівняння захистів можливо тільки в обраному для аналізу напрямку злому. Для аналізу і порівняння захищеності інформації в інших напрямках злому необхідно за запропонованою методикою розрахувати і побудувати розподіл максимумів ймовірності злому для цих напрямків. В роботі запропонований спосіб визначення реальної ймовірності злому комбінованої захисту не за максимальним значенням ймовірності злому, а по реальному розподілу ймовірності злому комбінованої багаторівневої ТЗІ, так як злом ТЗІ не обов'язково відбувається при максимальних значеннях ймовірності злому. У цьому випадку за побудованими поверхонь ймовірностей злому реальну надійність ТЗІ можна визначати для будь-якого напрямку злому.

Ключові слова: технічний захист інформації, еквівалентна однорівнева захист, комбінована багаторівневий захист інформації з ймовірнісним зломом, розподіл максимуму ймовірності злому, розподіл ймовірності злому, реальний процес злому.

**МЕХАНИЗМ ЭНЕРГОЗАТРАТНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЯХ
БЛОКЧЕЙНА КАК ВОЗМОЖНЫЙ ФАКТОР ОГРАНИЧЕНИЯ
ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ**

Д.т.н. Волошин В. С., д.пед.н. Федосова И. В., к.т.н. Мироненко Д. С.

Аннотация. Диапазон энергетических затрат в целом при использовании интернета стал уже соизмеримым с энергозатратами на многие другие виды деятельности человека и является одной из их крупных составляющих. Наиболее энергоемкими являются интернет системы блокчейна и майнинга криптовалют. Многочисленные методы оценки энергетических затрат дают информацию лишь о том, что не существует единых достоверных методов оценивания их при майнинге и для блокчейн технологий. Цель исследования состоит в анализе роста энергозатрат на получение одного биткоина и доли энергоемкости в его себестоимости, а также в оценке общих затрат электроэнергии на майнинговые операции в системе биткоина по эмпирически введенным формулам и сопоставлению с реальными данными, которые получены из литературных источников. Несмотря на системный рост объемов хеширования и энергозатрат на получение одного биткоина, в системе блокчейн технологии происходит снижение общих энергетических затрат. Причина этого, пока, только в тех возможностях, которые представляют нам разработчики современного майнингового оборудования, и только. Учитывая популярность и перспективы развития, в частности, биткоина, возможности для децентрализации и доверительности при получении этого продукта, в который уже поверили миллионы людей, назрела необходимость во внедрении более энергоэффективных технологий, простых и удобных, позволяющих большому количеству потребителей создавать локальные системы распределенного реестра в самых различных областях человеческой деятельности и для решения самых разнообразных задач.

Ключевые слова: интернет системы, блокчейн-технология, криптовалюта, майнинг, энергопотребление, хешрейт, энергоэффективность, энергетическая ценность.

1. ВВЕДЕНИЕ

Учитывая сегодняшнюю популярность интернет сервисов и систем, использования огромного количества компьютерной техники, гаджетов самого различного назначения, объемы и массовость этих видов деятельности в обществе, следует обратить внимание на проблемы энергопотребления, по крайней мере, для некоторых из видов интернет систем. Диапазон энергетических затрат в целом при использовании интернета стал уже соизмеримым с энергозатратами на многие другие виды деятельности человека и является одной из их крупных составляющих. Учитывая темпы развития всего, что связано с глобальным информационным пространством (ГИП), можно сделать вывод, что эта составляющая общего количества энергии, потребляемой

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

человеческой цивилизацией, и дальше будет иметь тенденцию к увеличению. А это, в свою очередь, повлечет за собой нормативное перераспределение энергоресурсов между отраслями экономики во многих странах [1]. Энергетическая зависимость интернет технологий кроме своей очевидности, несет и ряд проблем для экономики и для человека в частности. В более сложном варианте, энергетические затраты в ГИП связаны с применением современных компьютерных технологий, таких, как, например, блокчейн технологии и их наиболее эффективный продукт, биткоин, эфириум и другие виртуальные валюты.

В литературе часто встречаются предупреждения относительно запредельных объемов потребляемой электроэнергии в системах биткоина и блокчейн технологиях. Так в [2] приводятся данные, что общий объем мощности средств, которые используются для майнинга криптовалюты, достигает размеров $9 \cdot 10^3 \text{ MВт}$, что подтверждает предположение о том, что проблема чрезмерного энергопотребления существует. Только эта цифра уже дает повод для более точной оценки расхода количества расходуемой электроэнергии на эти цели.

2. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Наравне с приобретением дорогостоящего майнингового оборудования, статья энергозатрат является пока непреодолимым препятствием в развитии блокчейн технологий. По данным И. Камински, усредненное количество энергии, расходуемой на операции майнинга в современном мире соизмеримо с расходами энергии на острове Кипр [3]. Дино Марк Ангритис представляет, на 2015 год среднее число решений по поиску хеша для каждой майнинговой задачи в количестве $3 \cdot 10^{20}$ хешей, что далеко не всякому компьютерному ресурсу под силу [4]. Оценки расходов электроэнергии на операции майнинга по различным литературным источникам весьма отличаются, показывая лишь достаточно большую величину, сравнимую с энергопотреблением таких стран, как Швейцария, Кувейт [5], Австрия, Аргентина [6, 7] и др. Создатель индекса Digiconomist А. де Врис считает, что с применением самого современного компьютерного оборудования, на майнинг должно расходоваться не менее $15 \cdot 10^6 \text{ MВт} \cdot \text{ч}$ мировой электроэнергии в год и даже цифра в $30 \cdot 10^6 \text{ MВт} \cdot \text{ч}$ не предел, потому, что система современного майнинга, включая режимы работы, это своеобразный «черный ящик» [8]. По данным [9], уже проведенная генерация 18 млн. биткоинов потребовала около $20 \cdot 10^6 \text{ MВт} \cdot \text{ч}$ или 0,13% всего энергопотребления в мире. По данным [10], при общем мировом

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

потреблении энергии в $158 \cdot 10^9 \text{ MBt} \cdot \text{ч}$, генерация биткоинов стоила всего $9,6 \cdot 10^6 \text{ MBt} \cdot \text{ч}$ или 0,006% мирового расхода. По данным А. Нараяна [11] в мире в 2018 году тратится на биткоины $1,8 \cdot 10^6 \text{ MBt} \cdot \text{ч}$ энергии. В 2019 году по данным [12] общие затраты на биткоин – $53 \cdot 10^6 \text{ MBt} \cdot \text{ч}$. Расчетные данные немецкого математика М. Страубе [13] показывают годовое потребление энергии не менее $14 \cdot 10^6 \text{ MBt} \cdot \text{ч}$. По словам ученых из Лаборатории им. Лоуренса в Беркли, предполагалось, что к 2020 году энергоэффективность отрасли может повыситься на 45%, условный рост составил всего 3 – 5%.

В целом, такие сравнительные и многочисленные оценки дают информацию лишь о том, что не существует достоверных методов оценивания энергетических затрат при майнинге и, в целом, для блокчейн технологий.

3. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования состоит в анализе роста энергозатрат на получение одного биткоина и доли энергоемкости в его себестоимости, а также в оценке общих затрат электроэнергии на майнинговые операции в системе биткоина по эмпирически введенным формулам и сопоставлению с реальными данными, которые получены из литературных источников.

4. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА.

В самом упрощенном варианте энергетические расходы, связанные с ГИП, относятся к компьютерному оборудованию, которое используется для работы в этом пространстве.

Для оценочного расчета потребностей компьютерной техники в электроэнергии при работе в ГИП, воспользуемся эмпирической формулой:

$$E_{\Sigma} = A \cdot [N_k \tau_c + N_{ож} (24 - \tau_c)], \quad (1)$$

где τ_c – средняя продолжительность работы в интернете для одного пользователя в сутки, ч;

N_k – мощность одного пользовательского компьютерного оборудования, кВт;

$N_{ож}$ – мощность одного компьютера в режиме ожидания, кВт;

$A = 1,2 \cdot 10^6$ – расчетный коэффициент, учитывающий годовую загруженность техники и суммарное количество пользователей в сетях интернет.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

На рис 1 представлены расчетные данные об энергопотреблении при систематической работе в интернете и при устойчивой продолжительности этой работы в течение каждого дня и вероятность соотношения приведенной мощности одного компьютерного устройства к продолжительности ежедневной работы его пользователя. Разброс данных, в зависимости от приведенной мощности используемых технических средств весьма существенный, от 1,5 до 2-х кратного значения, что свидетельствует о том, что эти данные можно использовать только как оценочные в исследованиях, а сама проблема энергетических затрат в интернет системах требует более тщательного изучения.

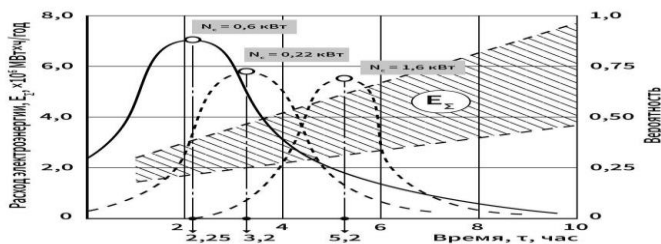


Рис. 1 — Расчетное энергопотребление при работе в интернете при устойчивой продолжительности в течение каждого дня и вероятность соотношения приведенной мощности одного компьютера к продолжительности ежедневной работы его пользователя

Наиболее часто «работают» в интернете пользователи с компьютерным оборудованием локальной мощностью не более $0,6 \text{ кВт}$ (в течение 2,25 часа в среднем ежедневно с вероятностью 0,89). Пользователи с профессиональным оборудованием мощность (не менее $1,6 \text{ кВт}$) работают в интернете по 5,2 часа в день с вероятностью 0,705 (см. рис. 1). Если допустить, что все 3,3 млрд. пользователей в интернете работали бы каждый день, в пределе, по 10 часов на компьютерном оборудовании, с суммарной мощностью $9 \cdot 10^3 \text{ МВт}$, расходы на электроэнергию достигли бы 40% мирового потребления (рис. 1). Безусловно, это оценочное суждение, но оно показывает, что без существенных изменений в компьютерной инженерии в пользу суперэнергоэффективных технологий интернет и соответствующие ему технологии не выживут и глобальное информационное пространство потеряет свою привлекательность для огромного количества пользователей. С увеличением объема операционного фонда биткоинов, принимаемых в работу, увеличивается сложность задачи по перебору вариантов поиска хеша, растет длина его записи, что делает задачу поиска хеш-ответа значительно сложнее, и что, в свою очередь, требует существенного увеличения потребления энергии. Только за период с

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

2016 по 2020 годы, по данным [14], сложность хеширования биткоина увеличилась в 5 раз, что также не могло не сказаться на росте энергозатрат. Усредненное время транзакций, входящих в очередной блок, определяющее скорость этих операций, с 2012 года менялось в достаточно широких пределах [14,15] в зависимости от нагрузки на систему. Устойчивая динамика (рис. 2) здесь наблюдается только в связи с появлением новых майнинговых устройств и технологий, например, в период активного майнинга приватными участниками в 2012-2016 годы (область I) на базе первых GPU-видеокарт в начале 10-х годов, объединения майнинговых ферм, или в период 2017-2020 годы (область III), когда появилась более мощная системная майнинговая техника: современный ASIC (Application Specific Integrated Circuit)-майнинг, в частности, ставшая известной система ASIC Antiminer S9, Bitmain S9, «облачный» майнинг, более традиционные Antiminer S7, Antiminer D3 компании Bitmain [16], использующие алгоритм Scrypt. В общей сложности, современный майнинг биткоина осуществляется устройствами, суммарная мощность которых превышает $9 \cdot 10^3 \text{ MBm}$.

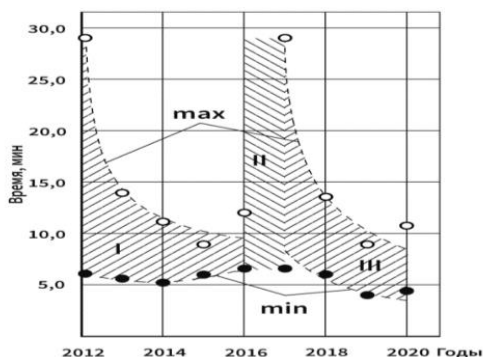


Рис. 2 — Динамика усредненной продолжительности транзакции и подтверждения майнингового блока (по данным источника [15])

Динамика усредненных ежедневных транзакций с 2010 года представлена на рис. 3. Только с апреля 2019 года по март 2020 года суммарный хешрейт биткоинов находился пределах от 40 ТН/s до 100 ТН/s, при возрастании сложности задачи майнинга в 2,5 раза [17]. Безусловно, от этого следует ожидать и роста энергозатрат на единицу криптовалюты, расчетные данные которых представлены на рис. 4. В 2010 году хешрейт майнинга одного блока из 50 биткоинов составлял $1 \cdot 10^{-11} \text{ TH/s}$, или на один биткоин приходилось $0,2 \cdot 10^{-12} \text{ TH/s}$ [18].

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

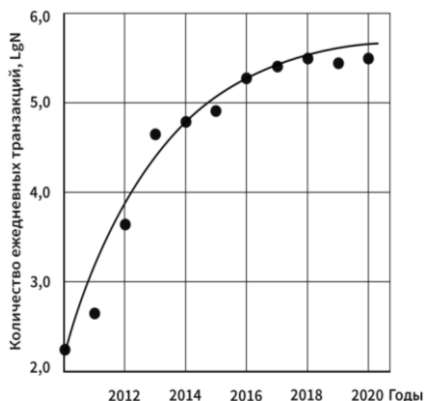


Рис. 3 – Динамика ежедневных подтверждаемых транзакций в системе биткоина (по данным источника [15])

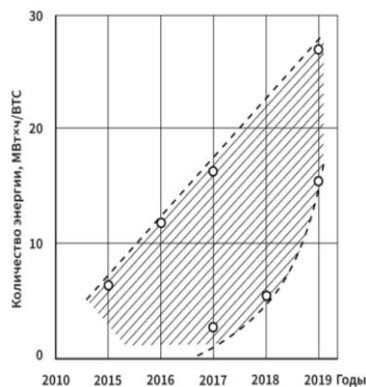


Рис. 4 – Расчетная энергетическая емкость биткоина по годам

Позднее, после каждых 250 тыс. отработанных блоков (12,5 млн. биткоинов) система заявляла новый размер блока, из 25 биткоинов, хешрейт каждого из которых составлял уже $1,4 \cdot 10^{-11} \text{ TH/s}$ [19, 20], а после 2015 года каждый из 12,5 блоковых биткоинов требовалось уже $4,5 \cdot 10^{-11} \text{ TH/s}$. Рост числа переборных вариантов нахождения нового хеша также требовал роста затрат энергии от инженерной техники (рис. 5, а). Логично утверждать, что пересмотр объема одного блока в сторону его сохранения или увеличения может способствовать энергосбережению, это вариант, который может обсуждаться. Хешрейт таких объемов уже не подвластен приватным майнерам, а для крупных компаний будет обходиться в перебор вариантов обозначаемых числом с 21 нулем (zetta) и при такой мощности последние монеты биткоин теоретически должны потребовать $n = 1 \cdot 10^{24}$ единиц хешрейта (рис. 5, б). Если принимать во внимание, что аппаратные мощности для хеширования у всех участников должны работать круглые сутки, можно, таким образом, рассчитать энергетику и транзактирования, и майнинга. На практике режимы работы майнеров (исключая компании для профессионального майнинга) далеки от равномерности, что делает любые балансовые расчеты интегральных энергозатрат только оценочными. Можно показать, что эти расчеты далеки от реальных.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Именно поэтому для технологии блокчейна трудно подобрать достаточно объективную систему расчета энергозатрат.

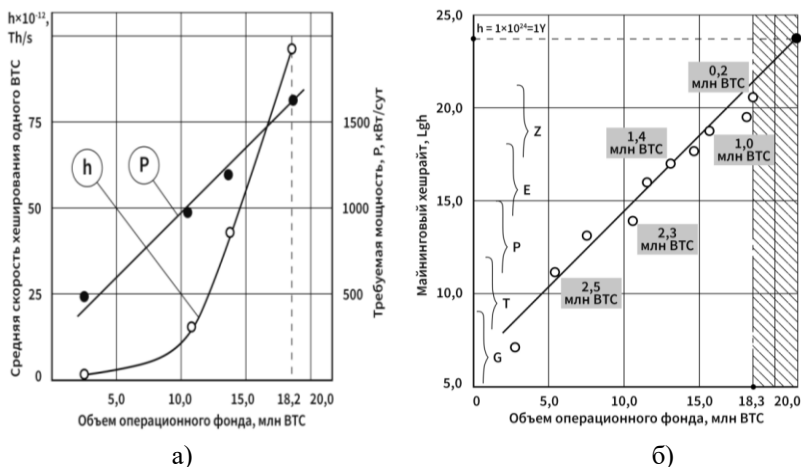


Рис. 5 – Динамика хеширования одного биткоина и потребности в мощном оборудовании (а) для обеспечения необходимой мощности хешрейта в зависимости от освоения всего операционного фонда биткоинов (б) (по данным источника [21])

Усилиями Мишель Раухс из Кембриджского центра альтернативных финансов разработан индекс потребления энергии биткоином CBEI (Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index), при помощи которого запущен в реальном времени счетчик общего потребления электроэнергии в сети биткоинов. На сегодня это наиболее эффективная методика и реальные данные по энергозатратам в блокчейн технологиях.

На март 2020 года (момент написания работы) индекс изменялся в пределах $(33,5 \div 96,1) \cdot 10^6 \text{ MBm} \cdot \text{ч}$ [8], что составляет 0,21% от мировых поставок электроэнергии [20]. Показано, что в год генерируется $12,5 \cdot 6 \cdot 24 \cdot 365 = 657$ тыс. биткоинов, таким образом, что один биткоин в 2020 году обходится в $96,4 \text{ MBm} \cdot \text{ч}$ (правда расчетные данные, см. рис. 4, дают результат вполнину заявленного в данном источнике). При средней цене $1 \text{ кВт} \cdot \text{часа}$ в $\$0,07$ стоимость расходуемой электроэнергии на майнинг одного биткоина составляет $\$4820$. По тем же данным М. Раухс [8] в 2018 году энергозатраты на один биткоин составили $33 \text{ MBm} \cdot \text{ч}$ и стоил он $\$2310$. Эта цифра соизмерима с нашими расчетами (см. рис. 4). Очевидным является рост как энергозатрат на получение одного биткоина так и доля энергоемкости в его себестоимости. Несмотря на увеличение объемов хеширования и

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

энергетической ценности каждого последующего биткоина, общие затраты электроэнергии на майнинговые операции в системе биткоина системно снижаются (рис. 6).

Причина этого, пока, только в тех возможностях, которые представляют нам разработчики современного майнингового оборудования, и только.

Профессиональный майнинг все более ориентируется на малые формы энергосбережения, например, вместо алгоритма доказательного консенсуса типа PoW (Proof-of-Work), - использование системы PoS (Proof-of-Stake) как способа сокращения потребления энергии майнинговым оборудованием и обеспечения безопасности системы. Следует отметить, что график (см. рис. 6) не учитывает такие пояснения, как, например, банкротство компании Mt.Gox и потерю в 2014 году более 750 тыс. единиц биткоина, или выпуск финальной версии Bitlicense, как развитие проекта биткоина в 2015 году, или скандал 2013 года с вэбсайтом «Silk Road», замешанным в использовании системы биткоинов для торговли наркотиками, что очевидно не могло не влиять на динамику и на энергетику хеширования и поддержки транзакций в этой системе.

Более точно генерированную энергоемкость биткоинов отображает размерная величина энергопотребления, приведенная не только к одному биткоину, но и к одному хешрейту в его логарифмическом отображении согласно формуле:

$$e = \frac{E_{общ}}{N_{btc} \cdot LgH} . \quad (2)$$

В формуле (2) учитывается не только снижение количества генерируемых биткоинов во временном интервале, но и рост объемов требуемого хешрейта в этом, же интервале. Эти показатели взаимосвязаны и сопровождают дальнейшее развитие блокчейн технологии биткоина.

Показатель e , в отличии от энергоемкости, на графике показывает возможность к минимальному насыщению энергоемкости биткоина с приближением к запрограммированному пределу в 21 млн. биткоинов (см. рис. 6).

Условия технологии биткоина таковы, что дуплекс $N_{btc} \cdot LgH$ постоянно растет, своим существованием уменьшая приведенную цифру энергоемкости биткоина. При этом следует подвергнуть сомнению данные в оценочной области «1», которые, по всей видимости, искажены в литературных источниках и отличаются от оценочных расчетных данных (рис. 1).

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

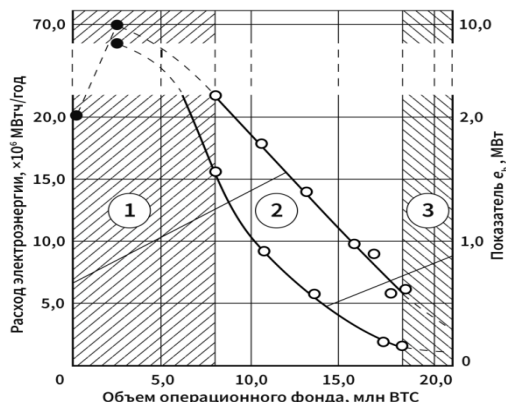


Рис. 6 – Динамика суммарной энергоёмкости рынка биткоинов с 2000 по 2020 годы и приведенная энергетическая ценность одного биткоина: 1 – область оценочных данных; 2 – область расчетных данных; 3 – область прогноза

Данные по энергетическим затратам за последние годы в большей мере более корреспондируются между собой. С другой стороны, по данным Digiconomist, на биткоин в 2019 году приходилось около 100 млн финансовых транзакций в год. С традиционными же финансовыми инструментами проводится 500 млрд. транзакций в год. То есть в 5000 раз больше. Но на одну традиционную финансовую транзакцию тратится в среднем $3 \cdot 10^{-7} \text{ MBm} \cdot \text{ч}$ энергии, а на майнинг одного блока (9 байтов) в биткоине нами подсчитано – $96,4 \text{ MBm} \cdot \text{ч}$.

Таким образом, 100 млн. транзакций требуют почти $1 \cdot 10^4 \text{ MBm} \cdot \text{ч}$ энергии (без майнинга), а 500 млрд. традиционных финансовых операций требуют $15 \cdot 10^4 \text{ MBm} \cdot \text{ч}$. При этом следует учитывать, что, с приближением к заветному числу 21 млн биткоинов, энергоёмкость каждого из них растет в геометрической прогрессии и достижение отметки в $150 \cdot 10^6 \text{ MBm} \cdot \text{ч}$ наступит очень быстро. Уже сейчас очевидно, что растущая сложность майнинга биткоина должна быть сопоставима с его энергоёмкостью, постепенно ставшей естественным ограничителем в любых системах блокчейна.

Генерация оставшихся до 2032 года 2758 тыс. биткоинов (суммарно 99,8% всего пула биткоинов), путем экстраполирования к нынешнему состоянию, может потребовать энергозатрат более, чем $0,9 \cdot 10^9 \text{ MBm} \cdot \text{ч}$, что может составить уже 4,3% от мирового потребления электроэнергии,

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

и будет равнозначно экономическим потерям от производства товаров на сумму \$50 млрд. Это фактическая плата за доверительность. На это сегодня мало обращают внимания, потому, что уже 80% биткоинов находятся в работе, а энергетического коллапса не видно. Майнинг биткоинов за период с 2015 по 2020 годы вырос с 13,1 до 18,2 млн. единиц виртуальной валюты, а потребление электроэнергии с $4,5 \cdot 10^6 \text{ MВт} \cdot \text{ч}$ до $20 \cdot 10^6 \text{ MВт} \cdot \text{ч}$, то есть более, чем в четыре раза. Тем не менее, рентабельность биткоина остается крайне высокой. Для средней цены $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ в $\$0,05 \div 0,07$ энергозатраты на майнинг одного биткоина составляют около \$2160, при рыночной цене этой криптовалюты в пределах $\$6,5 \div 8,7$ тыс.

5. ВЫВОДЫ

Таким образом, несмотря на системный рост объемов хеширования и энергетической ценности каждого сгенерированного биткоина, в системе этой блокчейн технологии происходит снижение общих энергетических затрат. Учитывая популярность и перспективы развития, в частности, биткоина, возможности для децентрализации и доверительности при получении этого продукта, в который уже поверили миллионы людей, мы вправе ожидать появления более энергоэффективных технологий, простых и удобных, позволяющих большому количеству потребителей создавать локальные системы распределенного реестра в самых различных областях человеческой деятельности и для решения самых разнообразных задач.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Статистический ежегодник мировой энергетики 2019. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.ru/>
- [2] Расходы на майнинг биткоина превысили его стоимость. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://finance.liga.net/cryptoeconomics/novosti/rashody-na-mayning-bitkoina-prevysili-ego-stoimost>
- [3] Kaminska I. Bitcoin's Wasted Power-and How It Could Be Used to Heat Homes [Electronic resource] / I. Kaminska // Financial Times. – 2014. – September 5. – Mode of access: <https://www.ft.com/content/384a349a-32a5-11e4-93c6-00144feabdc0>
- [4] Тапскотт Д. Технология блокчейн: то, что движет финансовой революцией сегодня / Д. Тапскотт, А. Тапскотт; пер. с англ. К. Шашковой, Е. Ряхиной. – М.: Эксмо, 2018. – 448 с.
- [5] Пятин А. Эксперты сравнили энергозатраты на майнинг биткоина и на обеспечение электричеством Швейцарии [Электронный ресурс] / А. Пятин. – Режим доступа: <https://www.forbes.ru/tehnologii/379291-eksperty-sravnil-energozatraty-na-mayning-bitkoina-i-na-obespechenie>
- [6] Новый индекс CBECI предполагает, что биткоин потребляет больше энергии, чем Швейцария [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

<https://bitnewstoday.ru/news/novyy-indeks-cbeci-predpolagaet-cto-bitcoin-potrebyaet-bolshe-energii-chem-shveysariya/>

[7] К концу этого года биткоин будет потреблять столько же энергии, как целая Австрия. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.facepla.net/the-news/tech-news-mnu/5863-%D0%BC%D0%B0%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%BD%D0%B3-%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5.html>

[8] Сколько сейчас майнинг потребляет электричества? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://masterok.livejournal.com/4485604.html>

[9] Bitcoin Mining Now Consuming More Electricity Than 159 Countries Including Ireland & Most Countries In Africa [Electronic resource]. – Mode of access: <https://powercompare.co.uk/bitcoin/>

[10] Биткоин-майнинг и потребление энергии [Электронный ресурс] / пер. материала Л. Уиза. – Режим доступа: <https://vc.ru/crypto/30588-bitcoin-mayning-i-potreblenie-energii>

[11] Демченко Д. Майнинг биткоина занимает почти 1% потребления энергии в мире [Электронный ресурс] / Д. Демченко. – Режим доступа: <https://ain.ua/2018/08/27/majning-bitkoina-zanimaet-1-potrebleniya-energii-v-mire/>

[12] Bitcoin Energy Consumption Index [Electronic resource]. – Mode of access: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>

[13] Palacio N. S. Blockchain : A technological tool for sustainable development or a massive energy consumption network [Electronic resource] / Palacio N. S. // Bionatura., 2018. – Vol. 3, № 4. – Mode of access: <https://ain.ua/2018/08/27/majning-bitkoina-zanimaet-1-potrebleniya-energii-v-mire/>

[14] Среднее значение времени подтверждения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.blockchain.com/charts/median-confirmation-time?timespan=all>

[15] Графики Биткоин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.blockchain.com/ru/charts>

[16] Оборудование для майнинга криптовалют 2019 – ASIC и GPU-фермы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mining-cryptocurrency.ru/oborudovanie-dlya-majninga/>

[17] Крутов В. Главный фактор успешности майнинга. Все о добыче Bitcoin – за 5 минут [Электронный ресурс] / В. Крутов. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/crypto/news/5e578c759a79479afbbdb2ad>

[18] Дурдыева Д. А. Состояние криптовалютного рынка и перспективы развития биткоина / Д. А. Дурдыева, А. А. Трапизонян // Инновационная наука, 2017. – № 01-1. – С. 43–47.

[19] Саакян А. Г. Криптовалюта как первичный инструмент в формировании валютного регулирования государства / А. Г. Саакян // Научный вестник Южного института менеджмента. – 2015. – № 4. – С. 17–20.

[20] Статистический ежегодник мировой энергетики [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/world-electricity-production-statistics.html>

[21] Биткоин Хешрейт график [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bitinfocharts.com/ru/comparison/bitcoin-hashrate.html>

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ENERGY COSTS MECHANISM IN BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES AS A POSSIBLE FACTOR OF RESTRICTIONS FOR USERS

Voloshin V., Fedosova I., Mironenko D.

Abstract. The range of energy costs in general when using the Internet has already become commensurate with energy costs for many other types of human activities and is one of their major components. The most energy-intensive are the Internet blockchain and cryptocurrency mining systems. Numerous methods for assessing energy costs provide information only that there are no uniform reliable methods for assessing them in mining and for blockchain technologies. The goal of the study is to analyze the growth of energy consumption for obtaining one bitcoin and the share of energy consumption in its cost, as well as to estimate the total electricity consumption for mining operations in the bitcoin system using empirically introduced formulas and compare it with real data obtained from literature sources. Given the popularity and development prospects, in particular, of bitcoin, opportunities for decentralization and trust in obtaining this product, which millions of people have already believed in, there is a need to introduce more energy efficient technologies, simple and convenient, allowing a large number of consumers to create local distributed ledger systems in the most diverse areas of human activity and for solving a wide variety of problems.

Keywords: internet systems, blockchain technology, cryptocurrency, mining, energy consumption, hash rate, energy efficiency, energy value

МЕХАНІЗМ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ В ТЕХНОЛОГІЯХ БЛОКЧЕЙНА ЯК МОЖЛИВИЙ ЧИННИК ОБМЕЖЕННЯ ДЛЯ КОРИСТУВАЧІВ

Волошин В. С., Федосова І. В., МIRONENKO Д. С.

Анотація. Діапазон енергетичних витрат в цілому при використанні інтернету став вже сумірним з енерговитратами на багато інших видів діяльності людини і є однією з їх великих складових. Найбільш енергоємними є інтернет системи блокчейна і майнінга криптовалют. Численні методи оцінки енергетичних витрат дають інформацію лише про те, що не існує єдиних достовірних методів оцінювання їх при майнінгу і для блокчейн технологій. Мета дослідження полягає в аналізі зростання енерговитрат на отримання одного биткоїна і долі енергоємності в його собівартості, а також в оцінці загальних витрат електроенергії на майнінгові операції в системі биткоїна по емпірично введених формулах і зіставленні з реальними даними, які отримані з літературних джерел. Враховуючи популярність і перспективи розвитку, зокрема, биткоїна, можливості для децентралізації і довірчості при отриманні цього продукту, в який вже повірили мільйони людей, назріла необхідність у впровадженні енергоефективніших технологій, простих і зручних, дозволяючих великій кількості споживачів створювати локальні системи розподіленого реєстру в найрізноманітніших областях людської діяльності і для вирішення найрізноманітніших завдань.

Ключові слова: інтернет системи, блокчейн-технологія, криптовалюта, майнінг, енергоспоживання, хешрейт, енергоефективність, енергетична цінність.

УДК 685.31.02

**МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ
СХЕМ РОЗКРОЮ МАТЕРІАЛІВ ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ НА
ПЛОСКІ ГЕОМЕТРИЧНІ ОБ'ЄКТИ ЗІ СКЛАДНОЮ
КОНФІГУРАЦІЄЮ ЗОВНІШНІХ КОНТУРІВ**

Д.т.н. Чупринка В.І. к.т.н. Чупринка Н.В.

Анотація. В роботі розглядається математичне та програмне забезпечення для автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів прямокутної форми на плоскі геометричні об'єкти зі складною конфігурацією зовнішніх контурів. Для успішного вирішення ця задача розбивається на чотири наступні задачі: автоматичне проектування множини щільних укладок для кожного із плоских геометричних об'єктів; автоматичне генерування раціональної схеми розкрою (секцій) для кожного із плоских геометричних об'єктів; щільне розміщення секцій у схемі розкрою; інтерактивне коригування отриманої схеми розкрою. Для кожної із цих чотирьох задач запропоновані математичні моделі та методи вирішення. Поставлені задачі були реалізовані в програмне забезпечення для автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів прямокутної форми на *плоскі геометричні об'єкти зі складною конфігурацією зовнішніх контурів*.

Ключові слова: раціональний розкрій, матеріал, зовнішній контур, системне розміщення, площина, інтерактивне коригування

1. ВСТУП

У будь-якій галузі промисловості питання витрат матеріалу при виробництві завжди було дуже актуальним. Висока матеріалоемність та значна вартість використовуваних матеріалів роблять задачу мінімізації витрат особливо важливою. Раціональні й економічні витрати матеріальних і енергетичних ресурсів, а також захист навколишнього середовища від забруднення відходами, які виникають при розкрої матеріалів є важливими задачами виробництва. Автоматизоване проектування раціональних схем розкрою дозволить раціонально використовувати матеріали при розкрої на плоскі геометричні об'єкти, зменшити кількість відходів, які забруднюють навколишнє середовище, знизити собівартість виробів.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Проектуванню раціональних схем розкрою матеріалів на плоскі геометричні об'єкти присвячено багато робіт. В роботах [1-3] представлені математичні моделі компактного розміщення опуклих плоских геометричних об'єктів. Але в більшості випадків плоскі геометричні об'єкти є не опуклі. В роботах [4-9] застосовуються генетичні алгоритми при проектуванні раціональних схем розкрою матеріалів на плоскі геометричні об'єкти. Але ці алгоритми не завжди дають

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

задовільний результат за обмежений час. Тому завданням цієї роботи є розробка методу автоматичного проектування раціональних схем розкрою матеріалів прямокутної форми для плоских геометричних об'єктів з складною конфігурацією зовнішніх контурів. Але задача автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів прямокутної форми на плоскі геометричні об'єкти в такій постановці не розглядалася. Технологічна постановка цієї задачі така: на матеріалів прямокутної форми обмеженої довжини розмістити заданий набір плоских геометричних об'єктів з урахуванням технологічних вимог (орієнтація цих об'єктів, мінімальна технологічна відстань Δ між двома сусідніми об'єктами в схемі розкрою) таким чином, щоб відходи були найменшими.

Математична постановка цієї задачі така: для заданого комплексу плоских геометричних об'єктів S^i та заданої кількості цих об'єктів $\tilde{N}_i$, де $i=1..q$, із множини допустимих схем розміщення в прямокутній області довжиною $DlMat$ та шириною $ShMat$ знайти таку раціональну схему розміщення, яка забезпечувала максимальне значення функції цілі:

$$F = \max\{F_j\}, \text{ де } F_j = \frac{\sum_i^q |S^i| \cdot N_i^j}{DlMat_j \cdot ShMat} \text{ та } j = 1, 2, \dots, \infty, \quad (1)$$

де $DlMat_j$ – довжина прямокутної області, яку займає j - та раціональна схема розміщення. При цьому урахуються технологічні вимоги (орієнтація цих об'єктів, мінімальна технологічна відстань Δ між двома сусідніми об'єктами в раціональній схемі розміщення).

Виходячи з практики розкрою в легкій промисловості розглянемо таку спрощену математичну модель задачі. Розглянемо три послідовні задачі:

Задача А - «Системне розміщення N_i^j ($N_i^j \leq \tilde{N}_i$) плоских геометричних об'єктів S^i , $i=1..q$ в прямокутній області фіксованої ширини $ShMat$ » («Секція»);

Задача Б - «Проектування схеми розкрою із секцій» («Схема»);

Задача В - «Інтерактивне коригування спроектованої схеми розкрою» («Інтерактивне коригування»).

Дамо математичну постановку кожної із цих трьох задач.

Задача А - «Секція». Для N_i^j ($N_i^j \leq \tilde{N}_i$) плоских геометричних об'єктів S^i із множини системних схем розкрою знайти таку область (секцію $\hat{S}_i$) прямокутної форми Ω розміром $ShMat \times Dl_{S_i}$ $i=1..q$, для

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

якої функція цілі Q_i приймає максимум, тобто

$$Q_i = \max\{Q_i^j\} = \max\left\{\frac{|S^i| \cdot N_i^j}{ShMat \cdot Dl - S_i^j}\right\}, \text{ де } N_i^j \leq \check{N}_i \text{ та } j=1,2,..p_i.$$

Задача Б - «Схема». Для циклічної перестановки $\mu=[\hat{S}_1, \hat{S}_2... \hat{S}_q]$ секцій $\hat{S}_i, i=1,2,..q$ знайти таку перестановку $\mu^* \in \mu$, що при щільному суміщенні секцій утворена схема матиме найменшу довжину, тобто $L^* = L(\mu^*) = \min_{\mu} (L(\mu))$.

Задача В - «Інтерактивне коригування». У багатьох випадках не вдається в автоматичному режимі побудувати схеми розкрою, які б задовольняли технологічні вимоги. Тому доводиться одержані схеми коригувати або будувати нові в інтерактивному режимі. Для успішного розв'язання цієї задачі необхідно вирішити дві проблеми: розміщення плоских геометричних об'єктів в прямокутній області заданих розмірів з контролем: належності плоского геометричного об'єкту прямокутній області заданих розмірів; не перетин активного плоского геометричного об'єкту із вже розміщеними в прямокутній області плоских геометричних об'єктів; вилучення будь-якого раніш розміщеного плоского геометричного об'єкту із розкрійної схеми.

3. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Так як плоскі геометричні об'єкти S^i в більшості випадків мають складну конфігурацію зовнішнього контуру, який не може бути описаний аналітично, то ми будемо його апроксимувати.

Для апроксимації виберемо кусково-лінійний метод апроксимації як такий, що не накладає обмежень на зовнішній контур плоского геометричного об'єкту.

При кусково-лінійній апроксимації зовнішній контур плоского геометричного об'єкту S^i буде апроксимуватись багатокутником із координатами вершин $S^i\{X_j^i, Y_j^i\}, j=1,2,..k_i$. Тому в подальшому ми будемо вважати, що плоскі геометричні об'єкти S^i є багатокутниками із відомими кількістю вершин та їх координатами.

Визначимо максимальні та мінімальні значення координат вершин апроксимуючого багатокутника для плоского геометричного об'єкту S^i :

$$\begin{aligned} \text{Max} X_i &= \max \{X_j^i\} \\ \text{Max} Y_i &= \max \{Y_j^i\} \\ \text{Min} X_i &= \min \{X_j^i\} \\ \text{Min} Y_i &= \min \{Y_j^i\} \end{aligned}, j = 1..k_i. \quad (2)$$

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

Перерахуємо координати апроксимуючих багатокутників таким чином:

$$\begin{aligned} X_j^i &= X_j^i - (MaxX_i + MinX_i) / 2 \\ Y_j^i &= Y_j^i - (MaxY_i + MinY_i) / 2, \quad j = 1..k_i \end{aligned} \quad (3)$$

Після перерахування координат апроксимуючих багатокутників отримаємо наступні вирази для :

$$MaxX_i = -MinX_i = MX_i = (MaxX_i + MinX_i) / 2$$

$$MaxY_i = -MinY_i = MY_i = (MaxY_i + MinY_i) / 2$$

Після зроблених перерахунків координат вершин апроксимуючих багатокутників для плоских геометричних об'єктів S^i , $i=1..q$ координати вершин апроксимуючого багатокутника будуть визначені відносно центру прямокутників, описаних навколо плоских геометричних об'єктів S^i . Ці точки назовемо полюсами плоских геометричних об'єктів S^i .

1. Задача А - «Секція»

Для генерації множини системних схем розкрою для плоского геометричного об'єкту S^i необхідно згенерувати множину решітчастих щільних укладок, як множину прототипів схем розкрою.

Задача генерування множини щільних укладок детально розглядається в роботі [10]. Для відтворення щільної решітчастої укладки за одинарною решіткою $\Lambda = \Lambda(\vec{a}, \vec{b})$ необхідно визначити два вектори решітки $\vec{a}, \vec{b}$. Для відтворення щільної решітчастої укладки за подвійною решіткою $W = W(\vec{a}, \vec{b}, \vec{q})$ необхідно визначити два вектори решітки $\vec{a}, \vec{b}$ та вектор зсуву решіток $\vec{q}$.

Генерування множини секцій. Вихідною інформацією для генерування множини допустимих секцій для плоского геометричного об'єкту S^i буде множина допустимих щільних укладок, що побудовані за одинарними $\Lambda_p = \Lambda(\vec{a}_p, \vec{b}_p)$, $p=1,2...p_0$ та подвійними решітками $W_r = W(\vec{a}_r, \vec{b}_r, \vec{q}_r)$, $r=1,2...r_0$.

Для успішного вирішення задачі «Секція» необхідно описати її структурні компоненти, а саме:

- аналітичний опис прямокутної області Ω розміром $ShMat \times DL_Si$, в якій необхідно щільно розмістити плоскі геометричні об'єкти S^i ;

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

- визначення параметрів, які однозначно визначають положення плоского геометричного об'єкту S^i в прямокутній області Ω_i заданих розмірів;
- умови, при виконанні яких плоский геометричний об'єкт S^i знаходиться в середині прямокутної області Ω_i ;
- математичний опис множини допустимих розв'язків;
- функція цілі.

Зв'яжемо систему координат з матеріалом, який має прямокутну форму (рулони або листи). Нехай початок координат знаходиться у лівому нижньому куті матеріалу. Тоді допустима область (рис.1), де можуть бути розміщені плоскі геометричні об'єкти може бути представлена у вигляді системи нерівностей:

$$\begin{cases} 0 \leq X \leq Dl_{S_i} \\ 0 \leq Y \leq ShMat_i \end{cases}, \quad (4)$$

де Dl_{S_i} , $ShMat$ – відповідно довжина та ширина прямокутної області Ω_i .

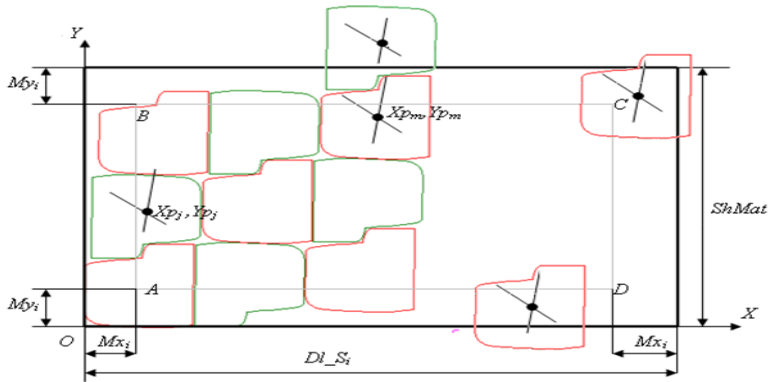


Рис. 1 - Визначення взаємного положення плоского геометричного об'єкту S^i та прямокутної області Ω_i

Для однозначного відображення плоского геометричного об'єкту на матеріалі необхідно знати таку інформацію:

i – код плоского геометричного об'єкту S^i , що розміщується (в нашому випадку $i=1,2..q$);

$Xp_m, Yp_m, m=1,2..t$ – координати полюсу плоского геометричного об'єкту S^i відносно системи координат, що пов'язана із прямокутною областю Ω_i , на якій плоского геометричного об'єкту S^i розміщується;

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІОННИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

Pr – признак положення плоского геометричного об'єкту (в нашому випадку: 0 – основне положення; 1 – плоский геометричний об'єкт, повернутий на 180 градусів відносно основного положення)

Знайдемо умови, при виконанні яких плоский геометричний об'єкт S^i знаходиться всередині прямокутної області Ω_i . Очевидно, якщо полюс плоского геометричного об'єкту S^i всередині прямокутника $ABCD$, то цей плоский геометричний об'єкт буде знаходитись всередині прямокутної області Ω_i (рис.1) Тоді очевидно, що якщо виконується нерівність

$$\begin{cases} MX_i \leq Xp_m \leq Dl - S_i - MX_i, \\ MY_i \leq Yp_m \leq Sh - MY_i \end{cases}, \quad (5)$$

то плоский геометричний об'єкт S^i , який буде розміщений в прямокутній області Ω_i , ніколи не вийде за межі цієї області.

Визначимо функцію цілі. Функцією цілі буде кількість розміщених плоских геометричних об'єктів S^i на матеріалі прямокутної форми заданих розмірів. Для будь-якої решітки $W = W(\vec{a}, \vec{b}, \vec{q})$ значення функціоналів $N_{\Omega}^{(1)}(\vec{a}, \vec{b}, \vec{q})$, $N_{\Omega}^{(2)}(\vec{a}, \vec{b}, \vec{q})$ дорівнюють кількості пар (n, m) цілих чисел із сукупності $0, \pm 1, \pm 2, \dots$, що задовольняють нерівностям (5). Використавши функцію $sign(x)$

$$sign(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x \geq 0 \\ -1, & \text{якщо } x < 0 \end{cases},$$

функцію цілі можна записати в такому вигляді:

$$N_{\Omega}(\vec{a}, \vec{b}, \vec{q}) = N_{\Omega}^{(1)}(\vec{a}, \vec{b}, \vec{q}) +, \text{ де } N_{\Omega}^{(2)}(\vec{a}, \vec{b}, \vec{q})$$

$$\begin{aligned} N_{\Omega}^{(1)}(\vec{a}, \vec{b}, \vec{q}) = & \frac{1}{16} \sum_{n, m} (1 + sign(x'_{nm} - Mx_i)) \cdot \\ & \cdot (1 + sign(Dl - S_i - Mx_i - x'_{nm})) \cdot \\ & \cdot (1 + sign(y'_{nm} - My_i)) \cdot \\ & \cdot (1 + sign(Sh - My_i - y'_{nm})) \cdot \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} N_{\Omega}^{(2)}(\vec{a}, \vec{b}, \vec{q}) = & \frac{1}{16} \sum_{n, m} (1 + sign(x''_{nm} - Mx_i)) \cdot \\ & \cdot (1 + sign(Dl - S_i - Mx_i - x''_{nm})) \cdot \\ & \cdot (1 + sign(y''_{nm} - My_i)) \cdot \\ & \cdot (1 + sign(Sh - My_i - y''_{nm})) \cdot \end{aligned} \quad (7)$$

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

$$\begin{aligned} x'_{nm} &= n \cdot Xa + m \cdot Xb + Mx_i \\ y'_{nm} &= n \cdot Ya + m \cdot Yb + My_i \\ x''_{nm} &= n \cdot Xa + m \cdot Xb + Mx_i + Xq \\ y''_{nm} &= n \cdot Ya + m \cdot Yb + My_i + Yq \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{де} \\ \text{та} \end{array} \quad \begin{aligned} \bar{a} &= (Xa, Ya) \\ \bar{b} &= (Xb, Yb) \\ \bar{q} &= (Xq, Yq) \end{aligned}$$

$$n, m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

2. Задача Б - «Схема»

Часто розкрійна схема складається із окремих схем, які будемо називати секціями. Ці секції при побудові розкрійної схеми суміщаються як прямокутники, описані навколо них. А це не завжди є раціональним, так як в цьому випадку секції суміщені не скрізь щільно.

Нехай довжина j -ої секції дорівнює Dl_{sj} та координати полюсів деталей будуть Xp_k^j, Yp_k^j , де $k=1..n(j)$. Для щільного суміщення j -ої та

i -ої секції необхідно знайти нові координати Xp_k^i , де $k=1..n(i)$ для i -ої секції.. Початкове їх значення можна визначити при щільному суміщенні

прямокутників, що описані навколо цих секцій, тобто $Xp_k^i = Xp_k^j + Dl_{sj}$. Для щільного суміщення секцій необхідно знайти

праву границю j -ої секції та ліву границю i -ої секції після попереднього суміщення. Під правою границею плоского геометричного об'єкту G_{jt}^R ,

$t=1,2...t_R$ будемо мати на увазі контури цього об'єкту, які знаходяться праворуч від опорної прямої, що проведена від правого краю j -ої секції на відстані $Dl_{dj}/2$ паралельно вісі OY , де Dl_{dj} – довжина прямокутника, який описаний навколо плоского геометричного об'єкту S^j (рис.2). Сторони прямокутника паралельні сторонам j -ої розкладки.

Під лівою границею деталі G_{it}^L , $t=1,2...t_L$ будемо мати на увазі контур деталі, який знаходиться ліворуч від опорної прямої, що проведена від лівого краю i -ої секції на відстані $Dl_{di}/2$ паралельно вісі OY , де Dl_{di} – довжина прямокутника, який описаний навколо плоского геометричного об'єкту S^i (рис. 2). Сторони прямокутника паралельні сторонам i -ої розкладки. Права границя j -ої секції складається із правих границь G_{jt}^R , $t=1,2...t_R$ плоских геометричних об'єктів, для яких

виконується нерівність $Xp_k^j > Dl_{sj} - Dl_{dj}$, де Dl_{sj} -

довжина j -ої секції (рис.2). Ліва границя i -ої розкладки складається із лівих границь плоских геометричних об'єктів G_{it}^L , $t=1,2...t_L$, для яких

виконується нерівність $Xp_k^i < Dl_{di}$ (рис.2). Для щільного суміщення

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

j -ої та i -ої секцій необхідно щільно сумістити праву границю j -ої секції та ліву границю i -ої секції (рис.2).

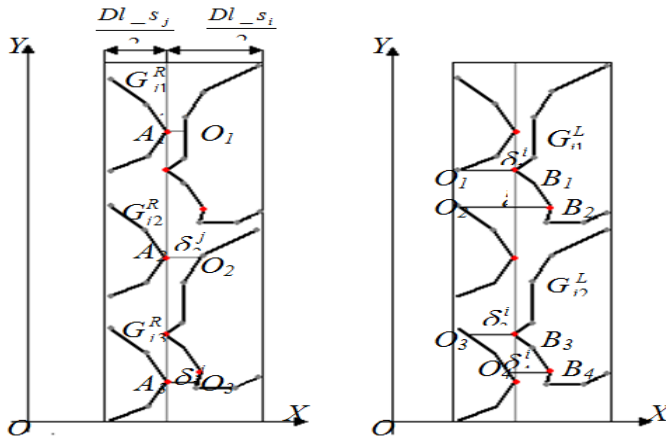


Рис. 2 - Визначення величини δ , на яку необхідно змістити ліворуч вздовжвісі OX i -ту секцію для її щільного суміщення із j -ою секцією

Для цього спочатку виділимо ліву границю G_{it}^L , $t=1,2\dots t_L$ для кожного плоского геометричного об'єкту S^i i -ої секції, полюси яких задовольняють умові $Xp_k^i < Dl - d_i$ та праву границю G_{jt}^R , $t=1,2\dots t_R$ для кожного плоского геометричного об'єкту S^j j -ої секції, полюси яких задовольняють умові $Xp_k^j < Dl - s_j - Dl - d_j$. Тоді ліву границю G_i^L для i -ої секції можна представити як об'єднання лівих границь плоских геометричних об'єктів S^i , тобто $G_i^L = \bigcup_{t=1}^{t_L} G_{it}^L$. Аналогічно праву границю G_j^R для j -ої секції можна представити як об'єднання правих границь плоских геометричних об'єктів S^j , тобто $G_j^R = \bigcup_{t=1}^{t_R} G_{jt}^R$.

Для кожної лівої границі G_i^L знаходимо точки, для яких координата X досягає локального мінімуму. Нехай це буде масив точок $A_k(Xa_k, Ya_k)$, $k=1,2\dots k_i$. Для кожної правої границі G_j^R знаходимо точки, для яких координата X досягає локального максимуму. Нехай це буде масив точок $B_k(Xb_k, Yb_k)$, $k=1,2\dots k_j$. Проведемо з кожної точки $A_k(B_k)$ пряму, паралельну

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

вісі OX до перетину з лівою границею G_i^L (правою границею G_j^R) і (j) -ої секції (рис.2). Знайдемо довжину відрізків $A_k O_k = \delta_k^1$, $\kappa = 1, 2, \dots, k_j$ ($B_k O_k = \delta_k^2$, $\kappa = 1, 2, \dots, k_i$). Знайдемо $\delta_{ji} = \min(\delta^1, \delta^2)$, де $\delta^1 = \min(\delta_k^1)$ та $k=1, 2, \dots, k_j$

$\delta^2 = \min(\delta_k^2)$. Знайдена величина δ_{ji} буде тією величиною, на яку

потрібно зсунути i -у розкладку, щоб вона щільно сумістилася із j -ою розкладкою. Тоді координати полюсів деталей в i -ій секції після щільного суміщення із j -ою секцією приймуть наступний вигляд:

$$Xp_k^{Hob_i} = Xp_k^i + Dl - s_j - \delta_{ji} \text{ та } Yp_k^{Hob_i} = Yp_k^i, \text{ де } \kappa = 1, 2, \dots, h_i.$$

3. Задача В - «Інтерактивне коригування»

У багатьох випадках не вдається в автоматичному режимі побудувати схеми розкрою, які б задовольняли технологічні вимоги. Тому доводиться одержані схеми коригувати або будувати нові в інтерактивному режимі. Для успішного розв'язання цієї задачі необхідно вирішити такі задачі: розміщення деталей на матеріалі заданих розмірів та не перетин деталями границь матеріалу; вилучення будь-якої раніш розміщеної деталі із розкрійної схеми; не перетин деталей при їх розміщенні.

Зупинимося більш детально на кожній із перерахованих вище задач. Задача розміщення деталей на матеріалі заданих розмірів та не перетин деталями границь матеріалу була детально розглянута у першому розділі.

Для вилучення будь-якої раніш розміщеної деталі із розкрійної схеми необхідно ідентифікувати деталь, яку необхідно вилучити. Для цього необхідно вирішити, чи знаходиться точка всередині опукло-ввігнутого багатокутника. Для прискорення роботи алгоритму визначення взаємного розміщення точки $O(X_0, Y_0)$ та багатокутника P розглянемо задачу взаємного розміщення точки $O(X_0, Y_0)$ та прямокутника, описаного навколо багатокутника P . Нехай цей прямокутник визначається системою нерівностей:

$$\begin{cases} X_{\min}^a \leq x \leq X_{\max}^a \\ Y_{\min}^a \leq y \leq Y_{\max}^a \end{cases} \quad (8)$$

Тоді точка $O(X_0, Y_0)$ розташована поза багатокутником P_1 , якщо вона не задовольняє системі нерівностей (8), інакше точка O може належати або не належати багатокутнику P . Для виявлення цього факту скористаємось методом кутів. Розглянемо метод кутів [11] для вирішення проблеми належності точки. При цьому підході необхідно визначити поняття кута зі знаком.

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІОННИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

Нехай маємо вектор $\mathbf{OA}_i$ та вектор $\mathbf{OA}_{i+1}$ (рис.3). Позначимо кут між ними через $\varphi_i = \angle A_i O A_{i+1}$, де $i = 1, 2, \dots, n_p - 1$. Кут φ_i буде зі знаком плюс, коли при повороті вектор $\mathbf{OA}_i$ навколо точки O найближчий шлях до вектора $\mathbf{OA}_{i+1}$ буде при повороті вектора $\mathbf{OA}_i$ проти годинникової стрілки, інакше цей кут φ_i буде від'ємним. Точка O буде знаходитись за межами

многокутника P , якщо $\alpha = \sum_{i=1}^{n_p-1} \varphi_i = 0^\circ$ та точка O буде знаходитись

всередині многокутника P , якщо $\alpha = \sum_{i=1}^{n_p-1} \varphi_i = 360^\circ$ та точки a відносно

низки вершин дорівнюватиме суммі кутів зі знаком для точки O відносно ребер, що входять в цей ланцюг. Розглянемо тепер, як кути зі знаком можуть бути використані для визначення розташування точки O відносно заданого багатокутника P .

Позначимо буквою α величину кута зі знаком в точці O відносно границі багатокутника P , при чому обхід багатокутника виконується в напрямку годинникової стрілки. Значення кута α дозволяє визначити приналежність точки: якщо $\alpha = 360$ градусів, то точка A лежить в середині багатокутника; $\alpha = 0$ градусів, якщо точка A розташована поза багатокутником. Справедливість цього ствердження візуалізуально демонструється на рис. 3.

Якщо точка O знаходиться за межами багатокутника P то очевидно, що $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = 0^\circ$ (рис. 3.а). Якщо точка O знаходиться всередині багатокутника P то очевидно, що $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = 360^\circ$ (рис. 3.б). Для визначення сумарного кута необхідно знайти елементарні кути. Елементарні кути будуть мати знак.

Для визначення знаку елементарного кута α (рис.4.2) скористаємося модулем векторного добутку [12]. Визначимо кут між векторами $\mathbf{OA}_i$ та $\mathbf{OA}_{i+1}$.

Для цього знайдемо модуль векторного добутку та скалярний добуток векторів $\mathbf{OA}_i$ та $\mathbf{OA}_{i+1}$. Введемо позначення: $\mathbf{a}_j = \mathbf{OA}_j = (X_{a_j}, Y_{a_j}) = (X_{ij} - X_0, Y_{ij} - Y_0)$; $\mathbf{b}_j = \mathbf{OA}_j = (X_{a_j}, Y_{a_j}) = (X_{ij} - X_0, Y_{ij} - Y_0)$;

$$\begin{aligned} \text{Тоді } |[\mathbf{OA}_{i+j-1} \mathbf{OA}_{i+j+1}]| &= |[\mathbf{a}_j \mathbf{b}_j]| \\ &= \begin{vmatrix} X_{a_j} & Y_{a_j} \\ X_{b_j} & Y_{b_j} \end{vmatrix} = X_{a_j} \cdot Y_{b_j} - X_{b_j} \cdot Y_{a_j} = \\ &= |\mathbf{a}_j| \cdot |\mathbf{b}_j| \cdot \sin \varphi_j, \\ (\mathbf{OA}_{i+j-1} \cdot \mathbf{OA}_{i+j+1}) &= (\mathbf{a}_j \cdot \mathbf{b}_j) = X_{a_j} \cdot X_{b_j} + Y_{a_j} \cdot Y_{b_j} = |\mathbf{a}_j| \cdot |\mathbf{b}_j| \cdot \cos \varphi_j. \\ \text{Звідси:} \quad \sin \varphi_j &= (X_{a_j} \cdot Y_{b_j} - Y_{a_j} \cdot X_{b_j}) / (|\mathbf{a}_j| \cdot |\mathbf{b}_j|) \\ \cos \varphi_j &= (X_{a_j} \cdot X_{b_j} + Y_{a_j} \cdot Y_{b_j}) / (|\mathbf{a}_j| \cdot |\mathbf{b}_j|) \end{aligned}$$

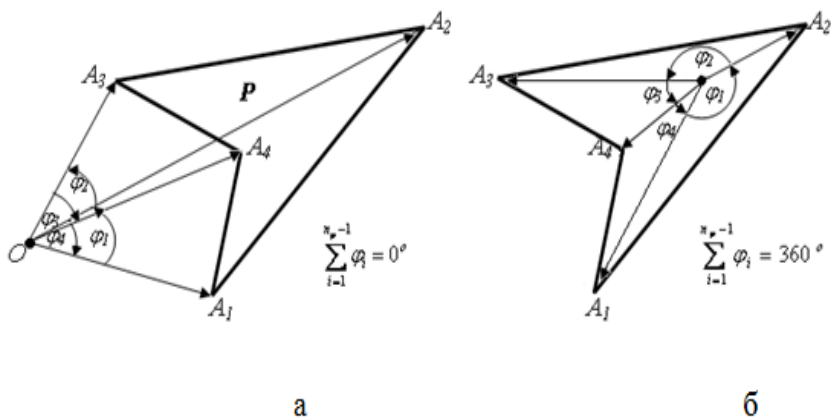


Рис. 3 - Розташування точки

а) поза багатокутником б) в багатокутнику

Якщо $|\langle \mathbf{OA}_{ij+1} \mathbf{OA}_{i+1} \rangle| = |\langle \mathbf{a}_j \mathbf{b}_j \rangle| > 0$, то кут буде додатнім, якщо $|\langle \mathbf{OA}_{ij+1} \mathbf{OA}_{i+1} \rangle| = |\langle \mathbf{a}_j \mathbf{b}_j \rangle| < 0$, то кут буде від'ємним.

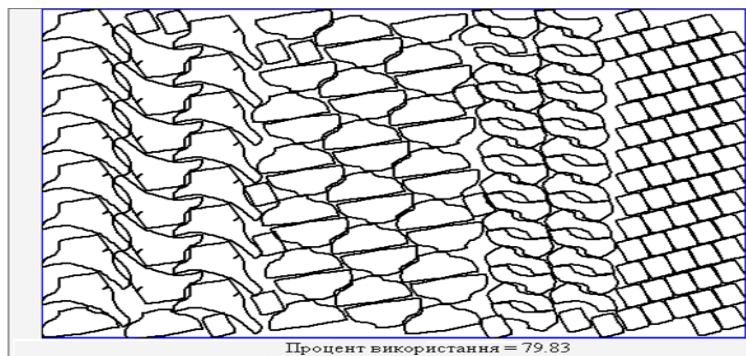


Рис. 4 - Приклад спроектованої раціональної схеми розкрою за допомогою розробленого програмного забезпечення

Розглянуті вище задачі А-В були реалізовані в програмне забезпечення для автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів прямокутної форми на плоскі геометричні об'єкти довільної форми зовнішнього контуру із врахування потреби в цих об'єктах. Приклад отриманої раціональної схеми розкрою за допомогою цього програмного продукту представлений на рис. 4.

4. ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано математичне забезпечення для автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів прямокутної форми на плоскі геометричні об'єкти зі складною конфігурацією зовнішнього контуру. Для успішного вирішення цю задачу поділено на три послідовні задачі, для вирішення яких запропоновані методи та алгоритми. Запропоновані математичні моделі та алгоритми дозволили розробити програмне забезпечення для автоматизованого проектування раціональних схем розкрою матеріалів прямокутної форми на плоскі геометричні об'єкти зі складною конфігурацією зовнішнього контуру. Це програмне забезпечення можна використовувати в різних галузях, де необхідно раціонально розкрити матеріали прямокутної форми на плоскі геометричні об'єкти зі складною конфігурацією зовнішнього контуру і підвищити ефективність використання матеріалів при розкрою.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Guo P.N. Floor-planning using a tree representation/ P.N. Guo, T. Takahashi, C.K. Cheng, T. Yoshimura // IEEE Trans. on Computer Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2001. – 281 p.
- [2] Sakanushi K. The quarter-state-sequence floorplan representation / K. Sakanushi, Y/ Kajitani, D.P. Mehta// IEEE Trans. on Computer Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2003. – 376 p.
- [3] Бухвалова В.В. Задача прямоугольного раскроя: метод зон и другие алгоритмы СПб.: СПбГУ, 2001. -96с
- [4] Колиско О.З. Модифікація генетичного алгоритму для генерації секцій розкрійних схем / О. З. Колиско // Вісник КНУТД, 2009. – №1. – С.14-17.
- [5] Deb K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000. – Vol. 186, № 2–4. – P. 311-338.
- [6] Верхотуров М.А. Задача нерегулярного раскроя плоских геометрических бъектов: моделирование и расчет рационального раскроя // Информационные технологии, 2000. – №5. – С.37-42.
- [7] Скобцов Ю.А. К вопросу о применении метаэвристики в решении задач рационального раскроя и упаковки / Ю.А. Скобцов, В.Н. Балабанов // Вестник Хмельницкого национального университета, 2008. – Т. 1, № 4. – С. 205-217
- [8] Валеева А.Ф. Применение конструктивной метаэвристики "муравьиная колония" к задаче гильотинного прямоугольного раскроя / А.Ф. Валеева, А.А. Петунии, Р.И. Файзрахманов// Вестник Башкирского университета. Раздел: Математика. Уфа, 2007. – Том 12. –N3. – С. 12-14.
- [9] Zhang D.F. An improved heuristic recursive strategy based on genetic algorithm for the strip rectangular packing problem/ D.F. Zhang, C.D.Chen, Y.I. Lin // Acta Automatica Sinica, 2007. – №33(9). – P. 911-916

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[10] Информационные управляющие системы. Проблемы и решения. Монография – Одесса, 2019, – С. 198-210

[11] Майкл Ласло Вычислительная техника и компьютерная графика на C++ / Москва: БИНОМ, 1997. – 304 с.

[12] Воднев В.Т. Основные математические формулы / А.Ф. Наумович, Н.Ф. Наумович. Минск: Высшая школа, 1988. – 270 с.

MATHEMATICAL AND SOFTWARE FOR AUTOMATED DESIGNING RATIONAL SCHEMES OF CUTTING RECTANGULAR MATERIALS ON FLAT GEOMETRIC OBJECTS WITH COMPLEX CONFIGURATION OF EXTERNAL CONTOURS

Chuprynk V., Chuprynk N.

Abstract. The paper considers mathematical and software for automated design of rational schemes of cutting rectangular materials into flat geometric objects with a complex configuration of external contours. To solve this problem successfully, it is divided into the following four tasks: construction of a set of dense tabs for each of the flat geometric objects; generating a rational cutting scheme (sections) for each of the flat geometric objects; dense placement of sections in the cutting scheme; interactive adjustment of the received cutting scheme. For each of these four problems, mathematical models and methods for solving them are proposed. The tasks were implemented in software for the design of rational schemes for cutting rectangular materials on flat geometric objects with a complex configuration of external contours.

Keywords: rational cutting, material, external contour, system placement, plane, interactive adjustment.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ РАСКРОЯ МАТЕРИАЛОВ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ НА ПЛОСКИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ СО СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ВНЕШНЕГО КОНТУРА

Чупринка В.И., Чупринка Н.В.

Аннотация. В работе рассматривается математическое и программное обеспечение для автоматизированного проектирования рациональных схем раскроя материалов прямоугольной формы на плоские геометрические объекты со сложной конфигурацией внешних контуров. Для успешного решения эта задача разбивается на четыре следующие задачи: автоматическое проектирование множества плотных укладок для каждого из плоских геометрических объектов; автоматическое генерирование рациональной схемы раскроя (секций) для каждого из плоских геометрических объектов; плотное размещение секций в схеме раскроя; интерактивная корректировка полученной схемы раскроя. Для каждой из этих четырех задач предложены математические модели и методы решения. Поставленные задачи были реализованы в программном обеспечении для автоматизированного проектирования рациональных схем раскроя материалов прямоугольной формы на плоские геометрические объекты со сложной конфигурацией внешних контуров.

Ключевые слова: рациональный раскрой, материал, внешний контур, системное размещение, плоскость, интерактивная корректировка

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАТОЧНОЙ
ФУНКЦИИ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОГО КОМПОНЕНТА**

**Ухина А.В., Афанасьев И.А., д.т.н. Ситников В.С., к.т.н.
Стрельцов О.В., к.т.н. Ступень П.В.**

Аннотация. В работе рассматривается построение компонентов компьютерных робототехнических систем, которые могут комплексно перестраивать свои характеристики программно-аппаратными средствами в зависимости от условий функционирования для повышения эффективности системы. Характеристики ЧЗК однозначно зависят от коэффициентов передаточной функции. Поэтому при расчете коэффициентов необходимо учитывать особенности характеристик. В связи с этим было рассмотрено применение значений фазочастотной характеристики перестраиваемых цифровых ЧЗК второго порядка при вычислении коэффициентов передаточной функции. Получены аппроксимации зависимости ФЧХ от уровня пульсации и уравнения для нахождения коэффициентов знаменателя передаточных функций цифровых фильтров. Была проведена экспериментальная проверка теоретических положений. Выявлено, что в случае резкого изменения условий работы, формулы могут пригодиться для оперативного расчета, с целью поддержания наилучшего функционирования робототехнической системы.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, роботизированные системы, расчет коэффициентов передаточной функции, аппроксимация

1. ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие информационно-управляющих и роботизированных систем идет в соответствии с концепцией Индустрия 4.0. В рамках этого магистрального направления возникает необходимость усовершенствовать существующие и разрабатывать новые подходы к разработке компонентов подобных систем с точки зрения мобильности, гибкости, способности оперативной перестройки и адаптации систем к условиям эксплуатации. Одной из задач в этом направлении является разработка новых компонент, которые могли бы осуществлять комплексную перестройку своих характеристик, самонастройку и самообучение [1]. Существующая технология Интернета вещей (Internet of Things, IoT) подразумевает использование обмена информацией не только между людьми и «вещами», но и между «вещами», т.е. машинами, устройствами, компонентами, датчиками. С одной стороны, «вещи», снабженные датчиками, могут обмениваться данными и обрабатывать их без участия человека, а с другой - человек может активно участвовать в этом процессе, например, когда речь идет об «умных устройствах» или «умном производстве». «Умное

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

производство» является разновидностью IoT, как промышленный (индустриальный) Интернет вещей (Industrial Internet of Things, IIoT). Поэтому многие компоненты технологического оборудования снабжаются многофункциональными датчиками, исполнительными механизмами и контроллерами. А применение Интернет технологий и беспроводных сетей к ним способствует оперативному сбору данных, первичной их обработке и представлению оператору в удобном виде для оперативного и своевременного принятия решения. Однако повышение уровня автоматизации на всех участках предприятия позволяет организовать производство без участия людей. В этом плане робототехнические производства стоят на первом месте, как и робототехнические платформы. Роль персонала при этом сводится к контролю технологического процесса и реакции на экстренные ситуации [1-6]. Особо остро такая задача стоит перед робототехническими платформами и системами критического применения, которые должны работать в сложных условиях без доступа человека [7-10]. Тогда, задача построения компонентов компьютерных робототехнических систем, которые могут комплексно перестраивать свои характеристики программно-аппаратными средствами в зависимости от условий функционирования для повышения эффективности системы является актуальной. Следует отметить, что в тракте обработки сигналов таких систем используются частотно-зависимые компоненты (ЧЗК), которые представляют собой совокупность аппаратных и программных средств со сложной архитектурой и многообразием связей [11-14].

Однако, характеристики ЧЗК однозначно зависят от коэффициентов передаточной функции [7]. Тогда при расчете коэффициентов можно учитывать особенности характеристик - амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик. Рассмотрим применение значений фазочастотной характеристики перестраиваемых цифровых ЧЗК второго порядка при вычислении коэффициентов передаточной функции [15].

2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫХ КОМПОНЕНТ НА СВОЙСТВА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

В качестве компонент тракта обработки и фильтрации рассмотрим широко используемые типовые цифровые фильтры. Известно, что компоненты высокого порядка для простоты перестройки строят на основе частотно-зависимых компонент (ЧЗК) первого и второго порядков [7]. Поэтому, анализ влияния коэффициентов передаточной функции ЧЗК на свойства его характеристик проведен по передаточной функции второго порядка, который имеет вид

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} \quad (1)$$

где a_0, a_1, a_2, b_1, b_2 — действительные коэффициенты числителя и знаменателя.

При подстановке $z^{-1} = e^{-j\varpi}$ или по формуле Эйлера $z^{-1} = \cos(\varpi) - j \sin(\varpi)$, где ϖ — нормированная угловая частота,

$$\varpi = \frac{2\pi f}{f_d}, \quad \varpi \in [0, \pi], \quad f, \quad f_d \quad \text{— соответственно линейная частота и}$$

частота дискретизации, получим комплексный коэффициент передачи, а на его основе амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазочастотную характеристику (ФЧХ): при $a_0 = -a_2$

$$H(\varpi) = \sqrt{a_0^2 \frac{2 + \left(\frac{a_1}{a_0}\right)^2 + 4\left(\frac{a_1}{a_0}\right)\cos(\varpi) + 2\cos(2\varpi)}{1 + b_1^2 + b_2^2 + 2b_1(1 + b_2)\cos(\varpi) + 2b_2\cos(2\varpi)}}, \quad (2)$$

$$\phi(\varpi) = \arctg\left(\frac{(b_2 - 1)\sin(\varpi)}{(b_2 + 1)\cos(\varpi) + b_1}\right) \quad (3)$$

Следует отметить, что подобными уравнениями описываются и цифровые фильтры, и типовые звенья второго порядка систем автоматического управления. Поэтому рассмотрим влияние коэффициентов передаточной функции на ФЧХ цифровых фильтров второго порядка нижних частот (ФНЧ), как наиболее используемый частотно-зависимый компонент компьютерных систем и систем управления.

Для полиномиальных фильтров выполняется соотношение $a_1 = 2a_0$, что дает возможность из формулы (2) получим квадрат АЧХ после определенных преобразований

$$H^2(\varpi) = \frac{4a_0^2(1 + \cos(\varpi))^2}{(1 - b_2)^2 + (b_1 + 2\cos(2\varpi))(b_1 + 2b_2\cos(\varpi))} \quad (4)$$

Из уравнения (3) для фильтра Баттерворта и вида ФЧХ (рис.1) можно указать, что значение фазы на частоте среза $\phi(\varpi_c) = -\frac{\pi}{2}$. Тогда знаменатель ФЧХ будет иметь вид

$$(b_2 + 1)\cos(\varpi) + b_1 = 0$$

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Определим b_1 как

$$b_1 = -(b_2 + 1) \cos(\varpi) \quad (5)$$

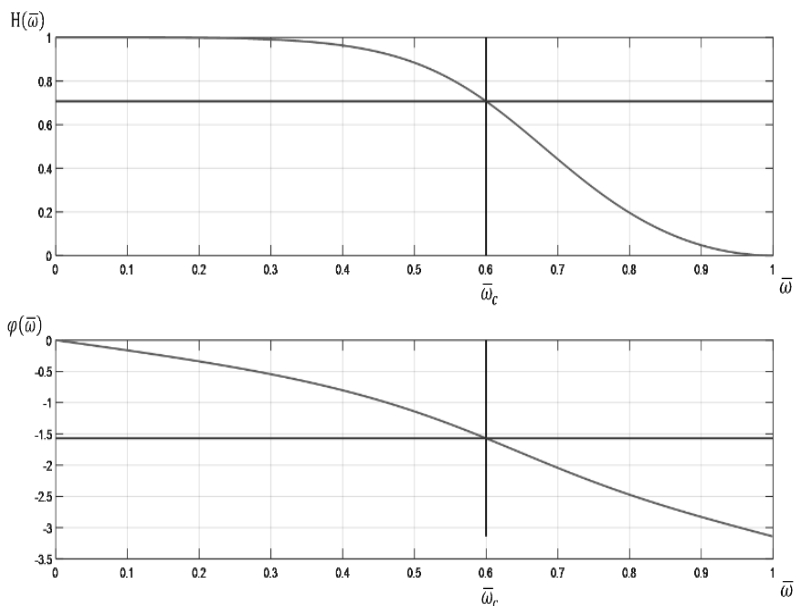


Рис. 1 - АЧХ и ФЧХ фильтра Баттерворта второго порядка

Для фильтра Чебышева-1 такое решение не возможно, т.к. ФЧХ имеет разные значения фазы на частоте среза при уровне c , который задается показателем пульсаций в полосе пропускания ε . Следует отметить, что в большинстве математических пакетов уровень пульсаций задается в децибелах RP , который пересчитывается в c

$$c = \frac{1}{\sqrt{10^{0.1RP}}}$$

Для цифрового фильтра Баттерворта величина RP составляет постоянно -3 дБ ($c = 0.707$), а для других фильтров имеет разное значение, но при этом величина c находится в диапазоне $0 < c < 1$, рис. 2.

Исследования ФЧХ показало, что одной из ее главных особенностей является не зависимость от частоты среза, в то время как имеется зависимость от уровня пульсаций. Это явление проявляется по-разному у разных фильтров.

После всех преобразований на основе уравнений (2) и (3) коэффициенты b_1 и b_2 для фильтра Чебышева-1 будут иметь вид

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

$$b_1 = - \left[(1 + b_2) \cos(\varpi_c) + \frac{1 - b_2}{\phi} \sin(\varpi_c) \right]$$

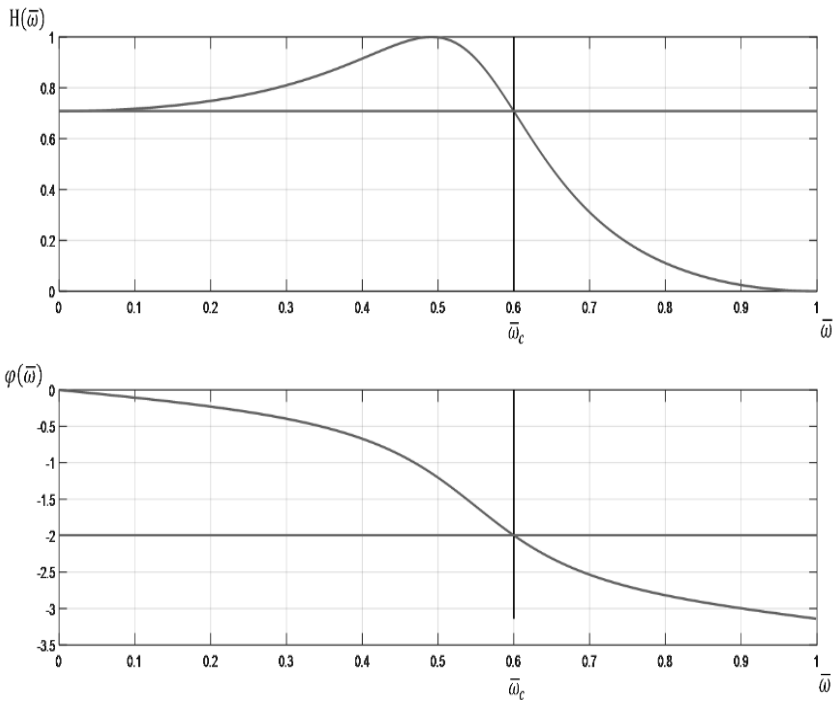


Рис. 2 - АЧХ и ФЧХ фильтра Чебышева-1 второго порядка, при $RP = -3$ dB

$$b_2 = \frac{\left[2\sqrt{1 + \phi^2} + (1 + \cos(\varpi_c)) \right] - \phi \sin(\varpi_c)}{\left[2\sqrt{1 + \phi^2} + (1 + \cos(\varpi_c)) \right] + \phi \sin(\varpi_c)}$$

где $\phi = \tan(\varphi)$ из формулы (3).

Как видно, для расчета коэффициентов b_1 и b_2 необходимо знать значения ФЧХ на частоте среза при разных значениях уровня пульсации в полосе пропускания. Из рис. 2 следует, что значения фазы на частоте среза зависят только от уровня пульсаций в полосе пропускания, рис.3 [12]. Следует отметить, что при постоянном значении уровня пульсаций и при изменении частоты среза — это значение не меняется. Аппроксимация этой зависимости имеет вид

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

$$\varphi = -\pi thx = -\pi \left[\frac{x \left[(1 + 0.1666x^2) + 0.008x^4 (1 + 0.0241x^2) \right]}{(1 + 0.5x^2) + 0.0417x^4 (1 + 0.0335x^2)} \right]$$

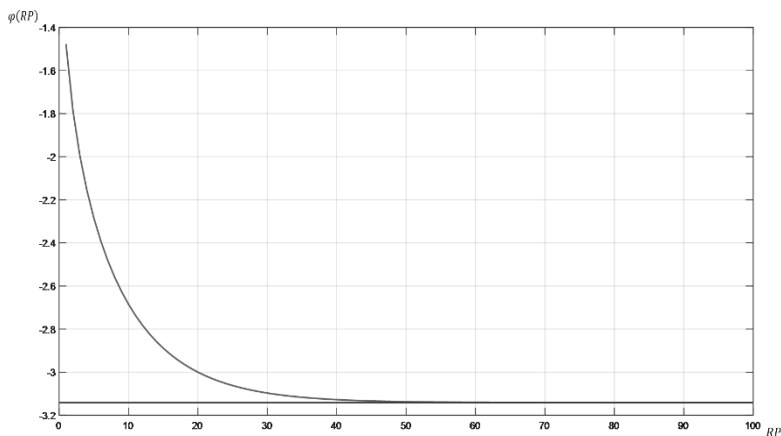


Рис. 3 - Зависимость ФЧХ ЧЗК ФНЧ Чебышева-1 на частоте среза $\omega = 0.5$ от уровня пульсации

Стоит отметить, что это выражение работает при RP до 40 с среднеквадратичной погрешностью 0.06%. Полученное преобразование представлено на рис 4.

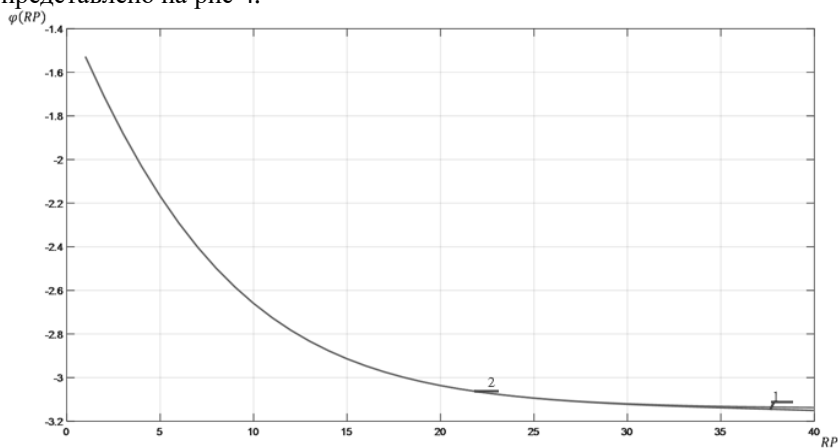


Рис. 4 - Графики табличных значений (1) и аппроксимирующей функции (2)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Если рассматривать значение фазы у фильтра Чебышева-1, как предельное значение, равное $-\pi$, то разложение в ряд дает возможность использовать его только до значения уровня пульсации в полосе пропускания равное 35. Применение такого подхода для нахождения коэффициентов неполиномиального фильтра Чебышева-2 имеет свои особенности. Для фильтра Чебышева-2 такое решение не возможно, т.к. ФЧХ имеет разные значения фазы на частоте среза при уровне cs , который задается показателем пульсаций в полосе задержания ε . В математических пакетах уровень пульсаций задается также в децибелах RS , который пересчитывается в cs также как и c .

Для фильтра Чебышева-2 фаза также имеет разное значение в зависимости от значения величины cs , рис. 6. После всех преобразований на основе уравнений (2) и (3) коэффициенты b_1 и b_2 для фильтра Чебышева-2 будут иметь вид

$$b_1 = -\frac{(1-b_2)\sin(\varpi_c) + (1+b_2)\phi \cos(\varpi_c)}{\phi}$$

$$b_2 = \frac{\left[2cs\sqrt{1+\phi^2} - (1+cs) - (1-cs)\cos(\varpi_c) \right] + \phi(1-cs)\sin(\varpi_c)}{\left[2cs\sqrt{1+\phi^2} - (1+cs) - (1-cs)\cos(\varpi_c) \right] - \phi(1-cs)\sin(\varpi_c)}$$

где $\phi = tg(\varphi)$ из формулы (3).

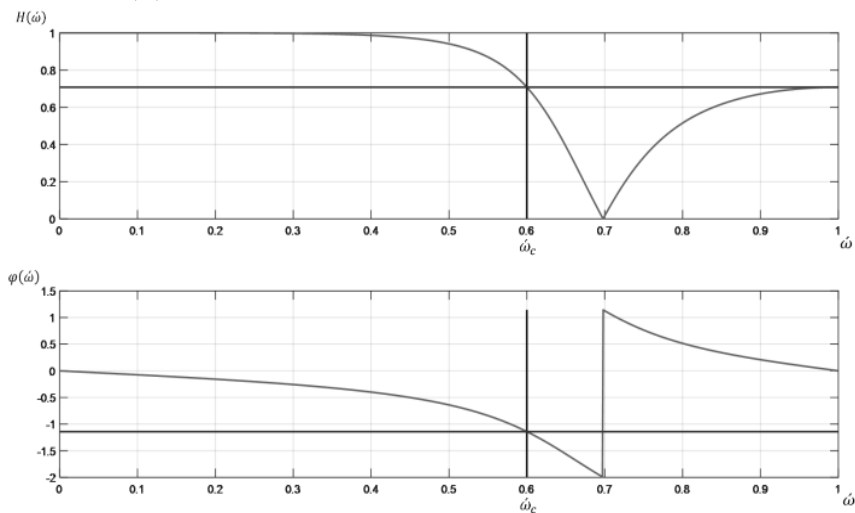


Рис. 5 - АЧХ и ФЧХ фильтра Чебышева-2 второго порядка, при $RS = -3$ dB

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Как видно, для расчета коэффициентов b_1 и b_2 необходимо знать значения ФЧХ на частоте среза при разных значениях уровня пульсации в полосе задержания. При постоянном значении уровня пульсаций и при изменении частоты среза — это значение не меняется. Из рис. 6 следует, что значения фазы на частоте среза зависит только от уровня пульсаций в полосе задержания, рис.6 [15].

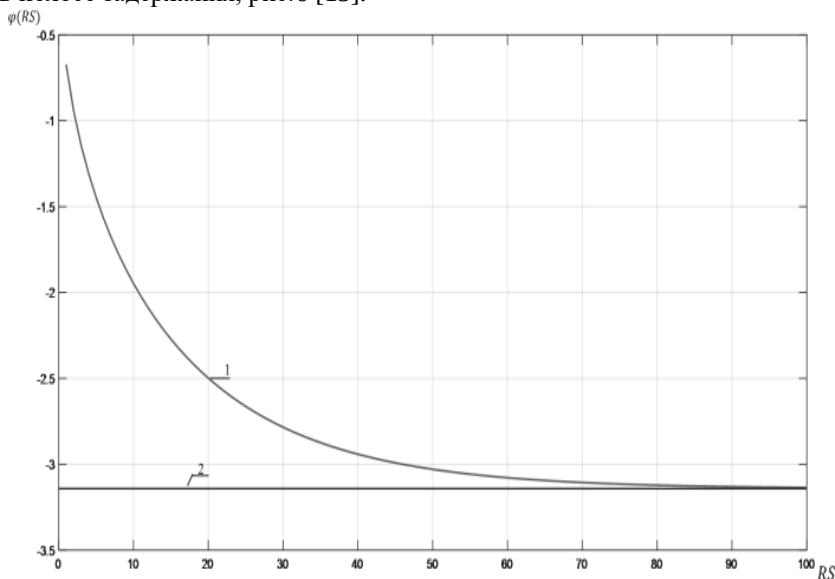


Рис. 6 - Графики табличных значений (1) и граничное значение (2)

Аппроксимация этой зависимости, рис.7.

$$\varphi = -\pi thx = -\pi \left[\frac{x \left[(1 + 0.1666x^2) + 0.008x^4 (1 + 0.0241x^2) \right]}{(1 + 0.5x^2) + 0.0417x^4 (1 + 0.0335x^2)} \right]$$

Среднеквадратическая погрешность в этом случае составляет 0.28%. Переходя к неполиномиальному фильтру Кауэра (эллиптический) после всех преобразований на основе уравнений (2) и (3) коэффициенты b_1 и b_2 будут иметь вид

$$b_1 = - \frac{(1 - b_2) \sin(\varpi_c) + (1 + b_2) \phi \cos(\varpi_c)}{\phi}$$

Как видно, для расчета коэффициентов b_1 и b_2 необходимо знать значения фазы на частоте среза при разных значениях уровня пульсаций

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

c и cs . При постоянном значении уровня пульсаций c и cs при изменении частоты среза это значение не меняется, рис. 8.

Для получения аппроксимации трехмерного графика пойдем следующим путем. Зафиксируем уровень пульсаций cs или RS . При этом значении для каждого c или PR определим значение фазы.

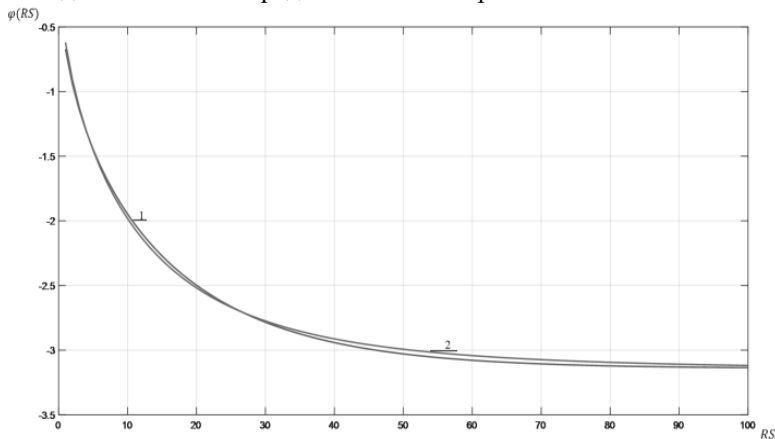


Рис. 7 - Графики табличных значений (1) и аппроксимирующей функции (2)

$$b_2 = \frac{\left[2c\sqrt{1+\phi^2} + (c+cs) + (c-cs)\cos(\varpi_c) \right] - \phi(c-cs)\sin(\varpi_c)}{\left[2c\sqrt{1+\phi^2} + (c+cs) + (c-cs)\cos(\varpi_c) \right] + \phi(1-cs)\sin(\varpi_c)}$$

где $\phi = \operatorname{tg}(\varphi)$ из формулы (3).

Таким образом, проведя сечения для трехмерного графика, рис. 9, можно найти описание аппроксимирующей функции $\varphi = f(RP)$ при заданном RS . Такой функцией будет квадратное уравнение вида

$$\varphi = -\pi(aRP^2 + bRP + c)$$

Для разных значений RS найдены значения коэффициентов a , b и c , табл. 1.

Среднеквадратическое отклонение в каждом случае составило соответственно 0.016%, 0.038% и 3.14%, а аппроксимирующие функции имеют вид

$$\begin{aligned} a &= -0.1305038RS^{-1.533}; \\ b &= 0.2084RS^{-0.271}; \\ c &= 0.1732RS^{0.2986}. \end{aligned}$$

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Тогда, значение фазы будет описываться аппроксимирующей функцией

$$\varphi = -\pi \left[\left(-0.1305RS^{-1.533} \right) RP^2 + \left(0.2084RS^{-0.271} \right) RP + \left(0.1732RS^{0.2986} \right) \right]$$

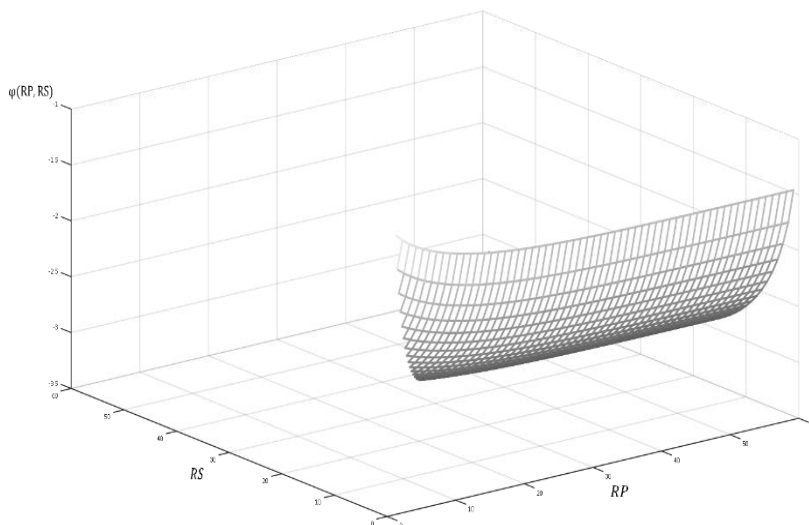


Рис. 8 - График табличных значений

Таблица 1. Значения коэффициентов a, b и c для разных значений RS

RS	a	b	c
5	-0.0097	0.1368	0.2685
7	-0.0063	0.1236	0,3051
10	-0,0040	0,1110	0,3489
15	-0,0022	0,0986	0,4032
20	-0,0015	0,0910	0,4421
30	-0,0008	0,0820	0,4923
40	-0,0005	0,0765	0,5232
50	-0,0003	0,0726	0,5451
60	-0,0002	0,0698	0,5623

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Для экспериментальной проверки теоретических положений использовался ультразвуковой дальномер. Такое устройство установлено на робототехнической системе для определения расстояния до препятствия. Повышение точности дальномера достигается перестройкой частоты излучения и соответственно перестройкой канала

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

обработки отраженного сигнала. В тракте обработки отраженного сигнала используется цифровой перестраиваемый фильтр. На рис. 9 и 10 показана работа фильтра.

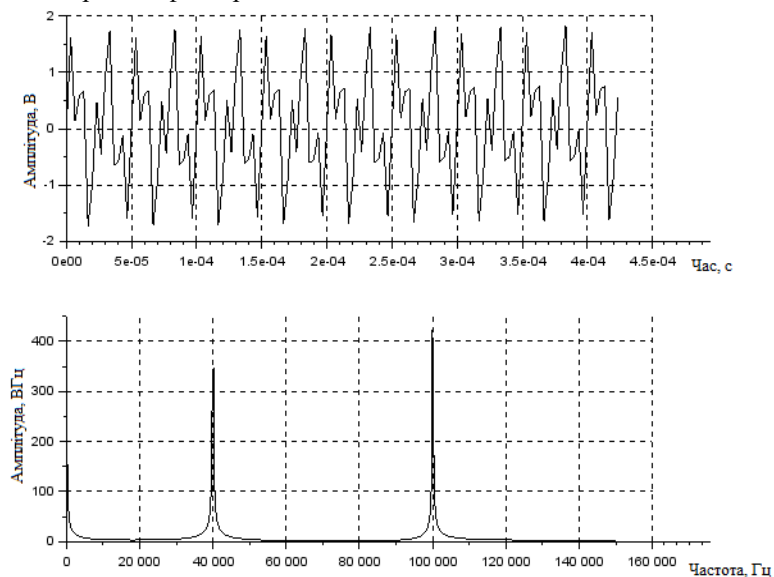


Рис.9 - Входной сигнал на входе полосового фильтра и его спектр

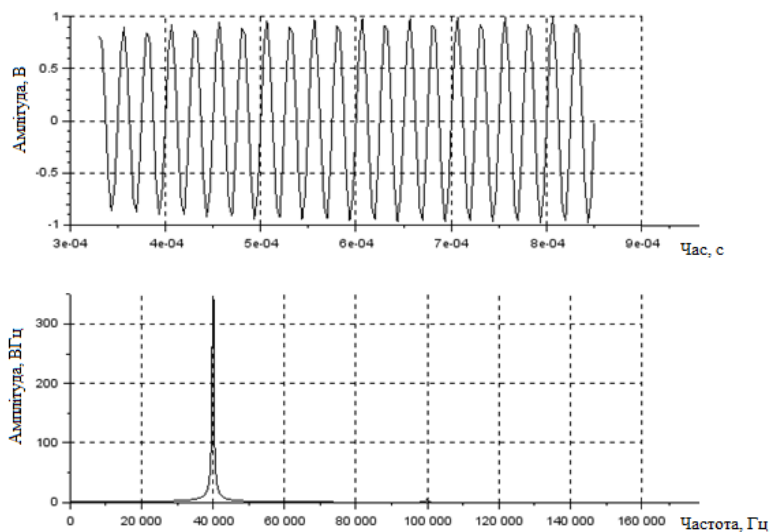


Рис. 10 - Выходной сигнал полосового фильтра и его спектр

4. ВЫВОД

Полученные аппроксимации зависимости ФЧХ от уровня пульсации и уравнения для нахождения коэффициентов знаменателя передаточных функций цифровых фильтров способствует более оперативному использованию их в робототехнических системах. Однако полученные реализации не являются простыми и следует продолжить поиск более удобных реализаций.

Следует иметь в виду, что значения RP и RS не изменяются в больших диапазонах и часто. Обычно они изменяются в узких диапазонах и редко. В таком случае можно заранее просчитать и использовать некоторые заранее заготовленные значения, хранимые в памяти.

В случае же резкого изменения условий работы эти формулы могут пригодиться для оперативного расчета, с целью поддержания наилучшего функционирования робототехнической системы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] The Industry 4.0 Standards Landscape from a Semantic Integration Perspective Conference Paper (PDF Available) · September 2017 with 4,699 Reads DOI: 10.1109/ETFA.2017.8247584 Conference: Conference: 2017 IEEE 22nd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), At Limassol, Cyprus, available: https://www.researchgate.net/publication/318208930_The_Industry_40_Standards_Landscape_from_a_Semantic_Integration_Perspective
- [2] Industry 4.0: an overview. Conference Paper (PDF Available) · July 2018 with 7,147 Reads, available at: https://www.researchgate.net/publication/326352993_Industry_40_an_overview
- [3] Industry 4.0, available: <https://www.cognex.com/ru-ru/what-is/industry-4-0-machine-vision/development>.
- [4] Semenov, S., Voloshyn, D., Ahmed, A.N. Mathematical model of the implementation process of flight task of unmanned aerial vehicle in the conditions of external impact, International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, vol. 8(1), pp. 7-13, 2019.
- [5] Zhuravska, I., Musyienko, M., Tohoiev, O. Development the heat leak detection method for hidden thermal objects by means the information- measuring computer system. CEUR Workshop Proceedings, 2353, pp. 350-364, 2019.
- [6] Musiyenko, M.P., Denysov, O.O., Zhuravska, I.M., Burlachenko, I.S. Development of double median filter for optical navigation problems. Proceedings of the 2016 IEEE 1st International Conference on Data Stream Mining and Processing, DSMP 2016, 7583535, pp. 177-181, 2016.
- [7] Ukhina, H., Sytnikov, V., Streltsov, O., Stupen, P., Yakovlev, D. Transfer Function Coefficients Influence on the Processing Path Bandpass Frequency-Dependent Components' Amplitude-Frequency Characteristics Properties at the NPP TP ACS. Conference Proceedings of 2019 10th International Conference on

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2019, June 2019, Pages 193-196 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2019; Leeds; United Kingdom; 5 June 2019 до 7 June 2019, DOI: 10.1109/DESSERT.2019.8770050

[8] Eliseenko V.V., Information and control systems of NPPs produced by SNPO “Impulse”. State, prospects, Jadernaja i radiatsionnaja bezopasnost, No 4(60), 2013, 61-64 pp. (in Russian)

[9] NishaHaridas, Elizabeth Elias, “Efficient variable bandwidth filters for digital hearing aid using Farrow structure”, Journal of Advanced Research, vol. 7(2), 2016, pp. 255–262.

[10] Sumedh Dhabu, Abhishek Ambede, Smitha K. G., SumitDarak, A. P. Vinod, “Variable Cutoff Frequency FIR Filters: A Survey”, 2018, available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1804/1804.02891.pdf>

[11] Shunsuke Koshita, Masahide Abe and Masayuki Kawamata, Recent Advances in Variable Digital Filters, 2018, available: <https://www.intechopen.com/books/digital-systems/recent-advances-in-variable-digital-filters>

[12] Ukhina H.V., Afanasyev I.V., Sytnikov V.S. The phase-frequency characteristic study of the second order digital frequency-dependent components of mobile platforms, Modern Information Tecnology 2019 (May, 23-24, 2019, Odesa). – Odesa: Ecology, 2019, 19-20pp.

[13] Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scietists and engineers – McGraw Hill Book Company, N.York, 1974 – 832 p.

[14] Ukhina, H., Sytnikov, V., Streltsov, O., Stupen, P., Yakovlev, D. Stability evaluation based on the sustainability triangle application for transfer functions above 2nd order. CSAE 2019: Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Science and Application EngineeringOctober 2019, Article No.: 6, pp 1–5 <https://doi.org/10.1145/3331453.3361305>

[15] Ukhina, H., Sytnikov, V., Streltsov, O., Stupen, P., Yakovlev, D., Specialized computer systems digital bandpass frequency-dependent components rearrangement. Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2019, DOI: 10.1109/IDAACS.2019.8924368

[16] Zhengyou, He. Wavelet Analysis and Transient Signal Processing Applications for Power Systems, Chine Electric Power Press, 252 p., 2016.

[17] SumbalZahoor, ShahzadNaseem, Design and implementation of an efficient FIR digital filter, Electrical & electronic engineering | Research article, vol. 4, i. 1, 2017, pp. 34-46.

[18] Dzhigan, V.A. Adaptivnaja filjtratsija signalov: teorija i praktika [Adaptive signals filtering: theory and algorithms], M.: Tekhnosfera, 528 p., 2013

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

THE PHASE RESPONSE STUDY FOR CALCULATING THE TRANSFER FUNCTION COEFFICIENTS OF A FREQUENCY-DEPENDENT COMPONENT

Ukhina H., Afanasyev I., Dr.Sci. Sytnikov V., Ph.D.Streltsov O., Ph.D.Stupen P.

Abstract. This study deals with the building the robotic computer systems capable for a comprehensive rear-rangement of their characteristics by soft- and hardware tools, depending on the operating conditions to increase the system efficiency. The frequency-dependent component responses do uniquely depend on the transfer function coefficients. Then, while calculating the coefficients, we can take into account the peculiar responses. The obtained approximations of the phase response dependence on the ripple level and equations for finding the denominator coefficients of the digital filters. In the case of a sharp change in working conditions, these formulas can be useful for operational calculation, in order to maintain the best robotic system functioning.

Keywords: Industry 4.0, robotic systems, calculating transfer function coefficients, approximation

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТІВ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ЧАСТОТНО-ЗАЛЕЖНОГО КОМПОНЕНТУ

Ухіна А.В., Афанасьєв І.А., д.т.н. Ситников В.С., к.т.н. Стрільців О.В., к.т.н. Ступінь П.В.

Анотація. У роботі розглядається побудова компонентів комп'ютерних робототехнічних систем, які можуть комплексно перебудовувати свої характеристики програмно-апаратними засобами в залежності від умов функціонування для підвищення ефективності системи. Характеристики ЧЗК однозначно залежать від коефіцієнтів передавальної функції. Тому при розрахунку коефіцієнтів необхідно враховувати особливості характеристик. У зв'язку з цим було розглянуто застосування значень фазочастотної характеристики перебудовуються цифрових ЧЗК другого порядку при обчисленні коефіцієнтів передавальної функції. Отримано апроксимації залежності ФЧХ від рівня пульсації і рівняння для знаходження коефіцієнтів знаменника передавальних функцій цифрових фільтрів. Була проведена експериментальна перевірка теоретичних положень. Виявлено, що в разі різкої зміни умов роботи, формули можуть стати в нагоді для оперативного розрахунку, з метою підтримки найкращого функціонування робототехнічної системи.

Ключові слова: Індустрія 4.0, роботизовані системи, розрахунок коефіцієнтів передавальної функції, апроксимація

Интеллектуальные системы и анализ данных

УДК 004.032

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНТЕРАКТИВНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА
БОЛЬШИХ ДАННЫХ НА БАЗЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО
ОБУЧЕНИЯ**

**К.т.н. Рудниченко Н.Д., д.т.н. Вычужанин В.В., к.т.н. Шibaева Н.О.,
Шibaев Д.С., к.т.н. Отрадская Т.В., к.т.н. Петров И.М.**

Аннотация. В статье приведены результаты разработки и исследования возможностей программного обеспечения интерактивного интеллектуального анализа больших данных на базе метода машинного обучения «Случайный лес». Обоснована актуальность использования методов машинного обучения для обработки больших данных, в частности, в задачах поиска аномалий в автоматизированных информационных системах. Формализован проект программного обеспечения и описана структура системы, диаграммы ключевых классов и вариантов использования, сформирован прототип графического интерфейса пользователя на базе использования возможностей, технологий и средств языка программирования Python. Приведены результаты проведенного численного эксперимента для сравнения значимости признаков выбранного набора данных и выявления особенностей влияния значений гиперпараметров модели машинного обучения на адекватность решения задачи классификации.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ данных, искусственный интеллект, большие данные, методы машинного обучения, деревья решений, случайный лес

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция в увеличении объемов передаваемых данных в сети Интернет и в локальных сетях средних и крупных организаций и предприятий. Это во многом связано с повышением общего числа используемых сотрудниками для производственных и операционных нужд онлайн сервисов, систем, веб-сайтов и приложений, основанных на распределенной, в частности, клиент-серверной архитектуре [1]. В связи с одновременным использованием десятков и сотен программных служб, приложений в рабочем окружении каждого хоста в сетевой инфраструктуре организации для работы сотрудника, возрастает необходимость качественного и целевого автоматизированного мониторинга передаваемых данных как в рамках локальной сети, так и в сеть Интернет. В первую очередь это необходимо для обеспечения безопасности операционных, технических, финансовых и других данных,

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

хранимых в организации и представляющих собой ценность для ее работы. При этом наиболее критичным и уязвимым звеном становятся автоматизированные информационные системы (АИС) и их компоненты (базы данных, формы обработки информации, отчеты), доступ и передача данных, в которых, должны быть обеспечены в защищенном режиме [2].

Современная АИС характеризуется широкой разноплановостью функционала, ключевыми функциями которой могут быть как учетные, вычислительные и верификационные операции, так и управление процессами, элементами и другими удаленными системами, в том числе с возможностями мониторинга данных. При этом не всегда генерируемые в ходе функционирования и эксплуатации таких систем пользователями данные и процессы корректно интегрируются в экосистему операционной системы, что усложняет процессы анализа корректности ее поведения. В связи со спецификой каждой конкретной организацией не всегда является возможным интеграция и использование комплексных программных продуктов и систем, осуществляющих превентивный анализ и мониторинг сетевого трафика, т.к. характер, частотность, объем и другие показатели передаваемых данных могут сильно зависеть от рабочего окружения, операционной системы, развернутых программных приложений и продуктов. В ручном режиме подобные операции также не могут быть эффективно выполнены [3]. Наиболее приоритетным из возможных путей автоматизации процессов мониторинга и анализа передаваемых данных является поиск аномалий, т.к. статистически выделяющихся из общей выборки пакетов, запросов или файлов, которые обрабатываются и пересылаются в локальной сети между хостами и сервером или отправляются в глобальную сеть на удаленные сетевые адреса. Обнаружение аномалий в сетевой трафике или в процессе работы АИС является типовой задачей интеллектуального анализа данных (ИАД), требует максимальной интерактивности и основано на предположении, что любое аномальное поведение сопровождается отклонением от некоторого типового профиля (порядка работы) нормального поведения. Т.е. необходимым является наличие унифицированной базы данных, которая содержит информацию о типовых профилях передачи сетевых данных или работы отдельных приложений, систем и АИС [4].

К сложностям решения данной задачи относятся [5-7]:

- отсутствие четко формализованных профилей сетевого трафика для конкретной рабочей станции с заданными диапазонами;
- необходимость оценки степени доверия устанавливаемых программных приложений, которые могут вносить изменения в работу сетевых устройств или АИС;

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- интеграция и корректное взаимодействие с антивирусным программным обеспечением;
- большие объемы передаваемой информации в режиме реального времени на в разных направлениях через различные порты;
- невозможность проведения операций в ручном режиме; необходимость определения граничных значений ключевых характеристик сетевого трафика и АИС для снижения вероятности ошибок;
- последовательности передачи данных разными приложениями могут иметь значение, что отражается на процессе поиска.

В связи с этим предлагается решение задачи поиска аномалий в данных может с помощью использования методов ИАД, в частности, путем разработок моделей машинного обучения (МО), основанных на различных алгоритмах и их сочетаниях [8]. Не смотря на наличие различных сетевых мониторов, программно-аппаратных средств и систем мониторинга сетевой активности, задача выявления аномалий с их помощью решается недостаточно быстро, точно и достоверно, т.к. многие из подобных систем используют в своей основе типовые статистические и математические методы, не позволяющие создавать самообучающиеся гибкие интеллектуальные модели анализа данных на базе МО, а также их функционирование не всегда является достаточно быстрым. Все это снижает возможности их практического использования для крупных компаний и организаций, где точность отслеживания процессов работы сетевой и программной инфраструктуры является критичной с точки зрения безопасности. Все это также обуславливает актуальность применения методов МО для описанных задач в рамках комплексного программного приложения.

Теория МО появилась одновременно с возникновением одних из первых персональных компьютеров (ПК) и с тех пор является активно развивающимся направлением науки.

Актуальность данного направления во много связана с постоянным ростом вычислительных возможностей и производительностью современных ПК, а также со стремительным увеличением объемов собираемых и обрабатываемых данных, используемых для проведения процессов анализа.

Дополнительной причиной популярности МО является постоянное расширение прикладных областей использования существующих и совершенствуемых методов для автоматизации задач анализа и обработки данных [9]. МО акцентируется на процессах построения и оценки качества математических моделей, предназначенных для задач комплексного исследования данных различных типов и структур. Задачи обучения выражаются в подборе и настройке параметров созданных

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

моделей, которые могут меняться динамически для адаптации качества отражения и визуализации данных. Фактически, создаваемая структура получает возможность приобретения элементов искусственного интеллекта, обучаясь на подаваемых ей данных. По завершению процессов обучения созданных моделей на имеющихся данных результирующие модели можно применять для прогнозирования, классификации и формализации различных аспектов новых данных [10]. МО оперирует объектами, представляющими собой элементарные единицы данных в предметных задачах, характеризуемые наблюдаемыми (явными) переменными x , а также не явными (скрытыми) переменными t , которые могут принимать возможные значения из ряда известных множеств.

Одной из главных задач МО является автоматическая идентификация активных взаимозависимостей между явными и скрытыми переменными объекта исследования. Это требуется для осуществления оценки или прогнозирования возможных значений скрытых компонент заданного объекта по его явным компонентам [11].

В настоящее время разработано большое количество алгоритмов машинного обучения для решения задач классификации текстов, к наиболее популярным из которых относят: k -ближайших соседей; построения деревьев решений (ДР); машин опорных векторов; байесовский классификатор; классификатор Роше; искусственные нейронные сети и другие [12]. ДР является наиболее удобным для решения описанной выше задачи и представляет собой отдельный метод МО, предназначенный для представления наборов решающих правил в иерархической форме, которая представляет собой своеобразный граф, состоящий из элементов типа узел и лист. В первых из этих элементов находятся составленные решающие правила, на основе чего производится проверка соответствия подаваемых на вход примеров этому правилу по соответствующему атрибуту обучающего множества данных. В наиболее простом случае в процессе проведения логической проверки множество примеров данных, которые попали в конкретный узел, разделяется на два отдельных подмножества [13]. В первое попадает набор примеров, полностью удовлетворяющих логическому правилу, а во второе – остальные, т.е. не удовлетворяющие. После этого к каждому из сформированных подмножеств снова применяется правило и описанная выше процедура рекурсивно повторяется до тех пор, пока не будет соблюдено заданное условие остановки алгоритма.

В результате построения и обучения модели ДР в ее заключительном узле не производится проверка и последующее разбиение, в связи с чем он объявляется листом. Каждый лист определяет конкретное решение для каждого попавшего в него примера данных. У недостаточно гибкой

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

модели ДР будет высокий уровень погрешности, поскольку она делает предположения относительно тренировочных данных. Алгоритм ДР переобучается, если не ограничить его максимальную глубину. Он обладает неограниченной гибкостью и может разрастаться, пока не достигнет состояния идеальной классификации, в которой каждому образцу из набора данных будет соответствовать один лист.

В качестве альтернативы ограничению глубины, которое ведёт к уменьшению вариативности и увеличению погрешности целесообразно собрание множества деревьев в единую модель. Это и будет классификатор на основе комитета ДР или просто «случайный лес». Данный метод МО и будет выбран для дальнейшей реализации.

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы заключается в исследовании возможностей применения метода машинного обучения "случайный лес" для интеллектуального анализа больших данных при поиске аномалий в сетевом трафике на базе разработанного интерактивного программного обеспечения.

3. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЯ

Алгоритм случайного леса (Random Forest или RF) является одним из разновидностей методов ДР. Фактически, RF состоит из множества решающих деревьев. Эта модель МО использует две ключевые концепции, которые и делают этот лес случайным: формирование случайной выборки образцов из набора данных при построении деревьев и выбор случайных наборов параметров модели при разделении узлов [14]. RF позволяет существенно уменьшить проблему переобучения моделей, а также повысить уровень точности классификации в сравнении единичным деревом.

Итоговый результат формируется на базе агрегирования наборов полученных ответов всех входящих в состав RF моделей ДР. Тренировка моделей происходит независимо друг от друга, т.е. используются разные подмножества данных, что позволяет решить проблему построения идентичных моделей ДР на одном наборе данных [15].

В случае использования данного метода для задачи регрессии ответы моделей RF последовательно усредняются, при решении задаче классификации итоговое решение по выходному значению формируется путем голосования по большинству. Все деревья в RF формируются по такому принципу [14,16]:

1. Выбирается отдельная подвыборка из всей обучающей выборки размера *size*, которая является основной для построения модели дерева, причем для каждого ДР формируется отдельная подвыборка данных.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

2. Для создания каждого последующего расщепления в ДР просматривается максимальное число ($\max_features$) всех случайных признаков, причем каждое расщепление модели оперирует собственным набором случайных признаков.

3. Происходит выбор наилучшего признака, после чего по нему производится расщепление согласно заданному критерию. Чаще всего на практике модель ДР формируется до момента исчерпания поданной выборки данных, однако некоторые программные реализации поддерживают возможности указания параметров ограничения высоты ДР, число объектов в его листьях и количество объектов в подвыборке для расщепления. При построении моделей ДР, в частности, RF часто используются следующие индексы неоднородности:

1. Информационная энтропия (IG). Рассчитывается энтропия всех атрибутов модели (C) по выборке данных (X) и выбирается атрибут с наименьшим значением энтропии для формирования дальнейших ветвей.

$$IG(C) = - \sum_{c \in X} p(X) \log p(X), \quad (1)$$

где, $p(X)$ - доля примеров в заданном классе модели ДПР, C – число атрибутов модели.

2. Индекс Джини (GI). Мера неравенства между распределениями характеристик набора данных. Разделение по выбранному атрибуту модели приводит к уменьшению среднего индекса Джини в результирующих подмножествах. Если набор данных X содержит данные n классов, тогда индекс Gini определяется следующим образом

$$Gini(X) = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2, \quad (2)$$

где p_i – вероятность (относительная частота) класса i в X .

Наилучшим считается то разбиение, для которого $Gini(X)'$ минимально. Если N – число примеров в узле – предке, L, R – число примеров соответственно в левом и правом потомке, l_i и r_i – число экземпляров i -го класса в левом/правом потомке. Тогда качество разбиения оценивается по следующей формуле

$$Gini(X)' = N - \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^n l_i^2 + \frac{1}{R} \sum_{i=1}^n r_i^2 \right) \rightarrow \min \quad (3)$$

С целью проектирования функциональных возможностей приложения целесообразно использовать язык UML и средства визуального макетирования интерфейса пользователя для разработки проекта прототипа (Qt Designer). Диаграмма основных вариантов использования приложения приведена на рис.1.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Пользователь имеет возможности: импорта данных в программу из файла; просмотра импортированных данных в виде таблицы; конфигурации параметров модели FR путем задания выходного признака из импортированного набора данных, а также выбора числовых значений для гиперпараметров модели; обучения модели согласно выбранному параметру разбития импортированных данных на обучающую и тестовую выборки; просмотра результатов работы модели путем отображения точности модели на тестовых и обучающих выборках данных, результатов классификации в табличном виде и матрицы ошибок; просмотра визуальной структуры модели в виде графа с указанием ключевых параметров каждого узла дерева; генерации, отображения и сохранения логов по выбранным моделям деревьев или по всем деревьям ансамбля RF.

Основными используемыми классами реализации интерфейса (рис. 2) являются:

- QPaintDevice, предназначен для поддержки визуализации графических объектов на форме, их перерисовки, расположения и отображения;
- QMainWindow, предназначен для обеспечения создания главного контейнера для расположения дочерних элементов интерфейса пользователя;
- QWidget, необходим для вывода и отображения вложенных элементов интерфейса для обработки событий взаимодействия с пользователем;
- QObject, реализует основной функционал манипуляции с объектами на форме.

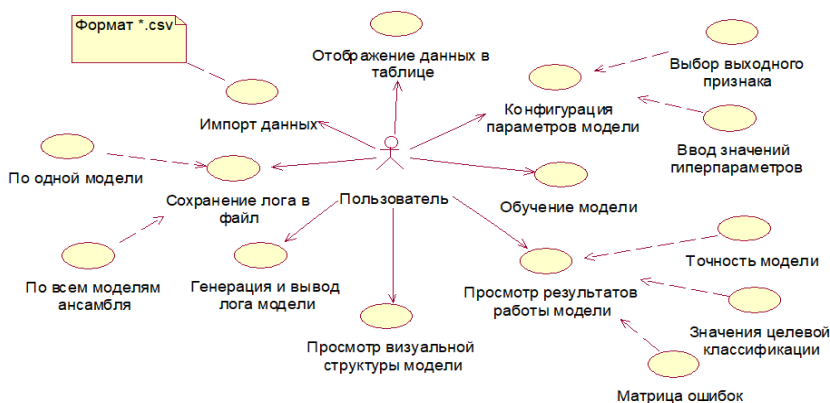


Рис.1 - Диаграмма основных вариантов использования разработанного программного обеспечения

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Дополнительными классами реализации логики проведения вычислений для реализации модели RF МО являются:

- PndasModel, предназначен для реализации функционала по обработке данных для их корректного перевода из импортированной строки файла-источника к пригодному для анализа виду в соответствующих программных структурах данных;
- TableLoader, предназначен для реализации функционала по созданию объекта таблицы, вставки и отображения значений подписей заголовков таблицы, строк и столбцов;
- Models, предназначен для реализации функционала создания модели и проведения вычислительных операций;
- Main, необходим в качестве главной точки входа в программное приложение и связки используемых модулей;
- App, предназначен для реализации ключевого функционала по обработке пользовательских действий, передаче и преобразованию данных в процессе построения модели и обеспечения ключевых функциональных возможностей согласно разработанной диаграмме вариантов использования, содержит все приоритетные зависимости.

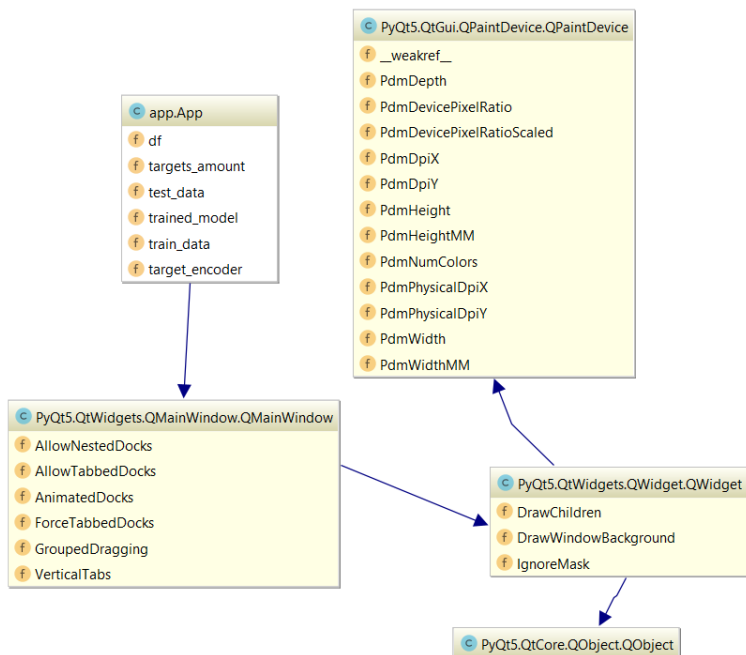


Рис.2 - Диаграмма классов реализации интерфейса приложения

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

На основании проекта и методов реализации функционала разработанное программное обеспечение необходимо описать в динамике его целевого использования. Интерфейс главной формы приложения при запуске приведен на рис. 3. Все элементы интерфейса активны при запуске окна, пользователь может переключаться между вкладками и просматривать надписи для каждого элемента.

Для ввода набора данных необходимо нажать на кнопку «Select file», после чего будет открыто диалоговое окно для выбора соответствующего файла, поддерживается формат *.csv. После выбора нужного файла необходимо нажать на кнопку «Открыть».

Справа от данного компонента расположены поля ввода гиперпараметров для построения модели RF, пользователь должен ввести соответствующие числовые значения целого типа.

В правом нижнем углу формы расположен элемент выбора разбития набора данных на обучающий и тестовый, а также кнопка запуска процесса обучения.

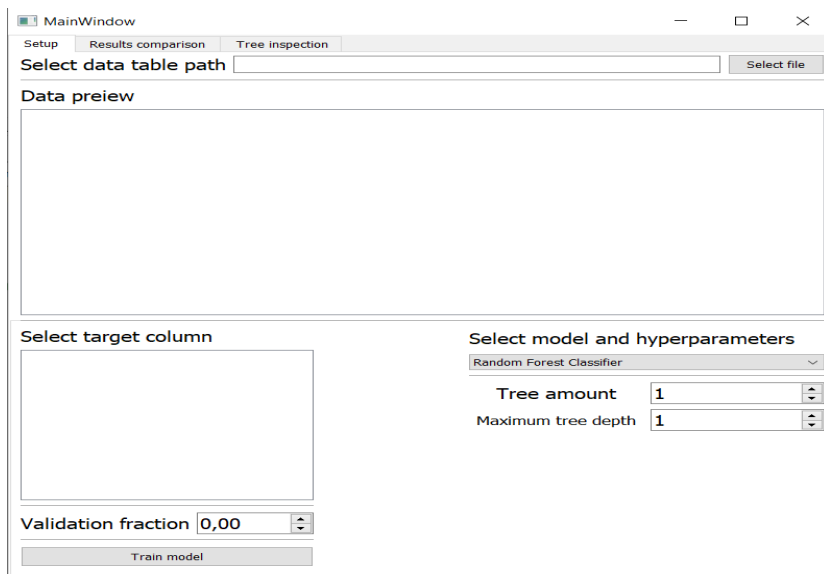


Рис. 3 - Интерфейс главной формы приложения при запуске

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения численных экспериментов была взята выборка на 200000 записей из открытого набора данных PUF Dataset.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

В процессе исследования было проведено построение моделей в различных комбинациях с итеративным изменением гиперпараметров, путем использования разработанного скрипта их последовательного перебора. Всего проведено более 10000 экспериментов.

Обобщенные результаты анализа работы полученных моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты анализа работы полученных моделей

Объем обучающей выборки	Объем тестовой выборки	Число деревьев	Максимальная глубина дерева	Точность модели
100000	100000	90	9	0,67
110000	90000	85	8	0,69
120000	80000	80	8	0,75
130000	70000	75	7	0,79
140000	60000	70	7	0,84
150000	50000	65	6	0,88
160000	40000	60	6	0,82
170000	30000	55	5	0,66
180000	20000	50	5	0,44

Зависимости влияния гиперпараметров на точность моделей приведены на рис.4.

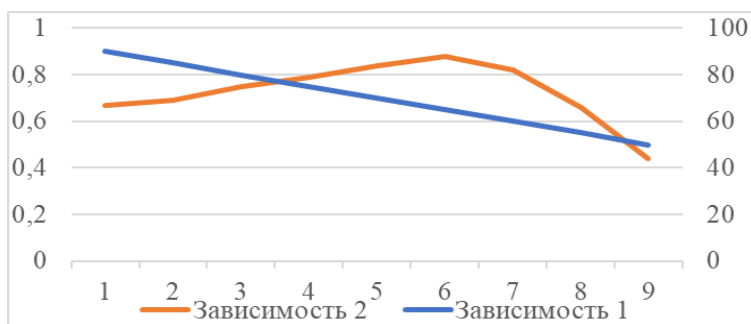


Рис. 4 - Зависимости влияния гиперпараметров на точность модели

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Зависимости 1 и 2 отражают влияние числа деревьев и их глубину на точность соответственно.

Как следует из рисунка большее влияние на точность моделей RF оказывает гиперпараметр числа деревьев. Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет проводить построение и исследование модели MO RF для ИАД больших данных с целью обнаружения аномалий в данных.

Исследование работы полученных моделей показало точность около 88% для наиболее точного подбора гиперпараметров (число деревьев около 65, максимальная глубина дерева 6 при соотношении обучающей и тестовой выборок около 75% к 25%).

5. ВЫВОДЫ

Разработанное программное обеспечение для интеллектуального анализа больших данных при поиске аномалий в сетевом трафике является интерактивным и кроссплатформенным, обеспечивает достаточно высокую точность классификации, около 88%, что свидетельствует о достоверности решения задачи.

Дальнейшим развитием разработанного программного обеспечения может стать дополнение функционала программы интерактивными элементами и компонентами, поддержка большего числа форматов данных и алгоритмов анализа, что возможно благодаря гибкости и модульности созданного программного решения и используемого языка программирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Вычужанин В.В. Методы информационных технологий в диагностике состояния сложных технических систем. Монография / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко. – Одесса: Экология, 2019. – 178 с.
- [2]. Коротеев М.В. Обзор некоторых современных тенденций в технологии машинного обучения / М.В. Коротеев // E-Management. – 2018. – №.1. – С. 26-35.
- [3]. Шкодырев В.П. Обзор методов обнаружения аномалий в потоках данных / В.П. Шкодырев, К.И. Ягафаров, В.А. Баштовенко, Е.Э. Ильина // Proc. of the Second Conference on Software Engineering and Information Management, СанктПетербург, Россия. – 2017. – Vol. 1864. – С.7.
- [4]. Кузовлев В.И. Выявление аномалий при прогнозном анализе данных / В.И. Кузовлев, А.О. Орлов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2016. – №5(110). – С. 75-85.
- [5]. Rudnichenko N., Vychuzhanin V., Petrov I., Shibaev D. Decision Support System for the Machine Learning Methods Selection in Big Data Mining // Proceedings Of The Third International Workshop on Computer Modeling and

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Intelligent Systems (CMIS-2020): session 6 “Intelligent Information Technologies” April 27-May 1, 2020. – Zaporizhzhia: NU “Zaporizhzhia Polytechnic” (edited by S. Subbotin), 2020. – P. 872-885.

[6]. Vychuzhanin V. V. Analysis and structuring diagnostic large volume data of technical condition of complex equipment in transport / V.V. Vychuzhanin, N.R. Rudnichenko, Z. Sagova, M. Smieszek, V.V. Cherniavskyi, A.I. Golovan, M.V. Volodarets // 24th Slovak-Polish International Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations - MMS 2019, 3-6 September 2019, Liptovský Ján, Slovakia.

[7]. Vychuzhanin V.V. Big data mapping in the geopositioning systems for fishing industry / V.V. Vychuzhanin, D.S. Shibaev, V.D. Boyko, N.O. Shibaeva, N.D. Rudnichenko // International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). – 2017. – PP. 28-31.

[8]. Щербина А.Д. Порівняльний аналіз існуючих напрямів у інтелектуальному аналізі даних / А.Д. Щербина, Д.С. Шибасєв, М.Д. Рудніченко, Н.О. Шибасєва // Project, Program, Portfolio Management The Third International Scientific-practical Conference, Odesa, ONPU 07–08 Dec 2018. – С.88-90

[9]. Гифт Н. Прагматичный ИИ. Машинное обучение и облачные технологии / Н. Гифт. – СПб.: Питер, 2019. – 304 с.

[10]. Воронина В.В. Теория и практика машинного обучения / В.В. Воронина, А. В. Михеев, Н. Г. Ярушкина, К. В. Святков. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 290 с.

[11]. Бринк Х. Машинное обучение / Х. Бринк, Дж. Ричардс, М. Феверолф. – СПб.: Питер, 2017. – 336 с.

[12]. Мюллер А. Введение в машинное обучение с помощью Python / А. Мюллер, С. Гидо. - М.: O'Reilly Media, 2017. – 392 с.

[13]. Рудніченко Н.Д. Розробка моделі розв'язуючого дерева для когнітивного представлення метаданих о великих об'ємах інформації / Н.Д. Рудніченко, В.В. Вичужанин, Д.С. Шибасєв, Н.О. Шибасєва // Сборник материалов XXVI Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии - 2020», Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2020. – С.684-670.

[14]. Чистяков С.П. Случайные леса: обзор / С.П. Чистяков // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2013. – №1. – С. 117-136.

[15]. Черкасов Д.Ю. Машинное обучение / Д.Ю. Черкасов, В.В. Иванов // Наука, техника и образование. – 2018. – №5 (46). – С. 85-87.

[16]. Элбон К. Машинное обучение с использованием Python. Сборник рецептов / К. Элбон. – СПб.: БХВ-Петербург, 2019. – 300 с.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR INTERACTIVE INTELLECTUAL BIG DATA ANALYSIS BASED ON MACHINE LEARNING METHODS

Ph.D. Rudnichenko N., Dr.Sci.Vychuzhanin V., Ph.D. Shibaeva N., Shibaev D.,
Ph.D. Otradsкая T.V., Ph.D. Petrov I.M.

Abstract. The article presents the results of the development and study of the capabilities of software for interactive mining of big data based on the "Random Forest" machine learning method. The urgency of using machine learning methods for processing big data is substantiated, in particular, in the problems of searching for anomalies in automated information systems. The software project is formalized and the structure of the system, diagrams of key classes and use cases are described, a prototype of the graphical user interface is formed based on the use of the capabilities, technologies and tools of the Python programming language. The results of the performed numerical experiment are presented to compare the significance of the features of the selected data set and to identify the features of the influence of the values of the hyperparameters of the machine learning model on the adequacy of the solution to the classification problem..

Keywords: data mining, artificial intelligence, big data, machine learning methods, decision trees, random forest

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕРАКТИВНОГО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВЕЛИКИХ ДАНИХ НА БАЗІ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

К.т.н. Рудніченко Н.Д., д.т.н. Вичужанін В.В., к.т.н. Шибасєва Н.О.,
Шибасєв Д.С., к.т.н. Отрадская Т.В., к.т.н.Петров І.М.

Анотація. У статті наведені результати розробки і дослідження можливостей програмного забезпечення інтерактивного інтелектуального аналізу великих даних на базі методу машинного навчання «Випадковий ліс». Обґрунтовано актуальність використання методів машинного навчання для обробки великих даних, зокрема, в задачах пошуку аномалій в автоматизованих інформаційних системах. Формалізований проект програмного забезпечення і описана структура системи, схеми ключових класів і варіантів використання, сформований прототип графічного інтерфейсу користувача на базі використання можливостей, технологій і засобів мови програмування Python. Наведено результати проведеного чисельного експерименту для порівняння значущості ознак обраного набору даних і виявлення особливостей впливу значень гіперпараметрів моделі машинного навчання на адекватність рішення задачі класифікації.

Ключові слова: інтелектуальний аналіз даних, штучний інтелект, великі дані, методи машинного навчання, дерева рішень, випадковий ліс

**РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ЗОБРАЖЕННІ ЗА ДОПОМОГОЮ
CNN І НЕЙРО-НЕЧІТКОГО КЛАСИФІКАТОРА З ІМУННИМ
НАВЧАННЯМ**

**Д.т.н. Корабльов М.М., д.т.н. Аксак Н.Г., к.т.н. Фомічов О.О.,
Чуприна А.О.**

Анотація. Сучасні системи обробки і аналізу зображень характеризуються активним використанням штучних нейронних мереж (ШНМ), для навчання яких використовуються, як правило, градієнтні методи, основним обмеженням на реалізацію яких є великі обчислювальні витрати. Побудова гібридних нейронних мереж дозволяє підвищити ефективність їх функціонування. У роботі пропонується гібридна нейромережева нечітка модель розпізнавання об'єктів на зображенні, що складається з двох модулів: згорткового модуля (Convolutional Neural Network – CNN) і модуля нейромережевого нечіткого класифікатора (ННК), побудованого на основі модифікованої мережі ANFIS. Модуль CNN, який навчається методом зворотного поширення помилки, виступає в ролі своєрідної експертної системи для модуля ННК. Навчання ННК пропонується виконувати на основі використання штучних імунних систем (ШИС) шляхом подання всіх параметрів, що настроюються, у вигляді структурованого адаптивного мультимедіа, і складається з налаштування параметрів і структури ННК. Проведено експериментальні дослідження на тестових наборах, що підтверджують ефективність запропонованої гібридної моделі розпізнавання об'єктів на зображенні.

Ключові слова: розпізнавання об'єктів, гібридна модель, згортковий модуль, нейро-нечіткий класифікатор, імунне навчання, мультимедіа.

1. ВВЕДЕННЯ

На сьогодні одним з наукових і технологічних напрямків, що інтенсивно розвиваються, є обробка і аналіз зображень. За останні роки було представлено ряд методів, моделей та алгоритмів, що застосовуються для вирішення цих завдань [1], серед яких одними з найбільш ефективних є штучні нейронні мережі (ШНМ) [2]. Існує велика кількість архітектур побудови ШНМ, при цьому використання різних типів ШНМ виявилося досить ефективним при вирішенні широкого кола завдань. Новий поштовх в даній області досліджень дала поява нового типу ШНМ – згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Network – CNN) [3, 4], які широко використовуються в різних областях, включаючи розпізнавання зображень і образів, розпізнавання мови, обробка природної мови, відео аналіз тощо [5-8]. При вирішенні прикладних задач з метою підвищення точності та зниження складності виникають завдання пошуку оптимальної топології нейронної мережі (НМ) та відповідно до неї структурної (визначення кількості скритих шарів та

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

нейронів в них, між нейронних зв'язків) і параметричної (налаштування вагових коефіцієнтів НМ) оптимізації. Для навчання НМ застосовуються, як правило, методи, що вимагають обчислення градієнта обраного функціоналу [2, 9]. Відомим обмеженням розвитку нейромережових технологій слід визнати високі обчислювальні витрати на реалізацію таких методів. До способів вирішення даної проблеми відносять використання різних підходів, зокрема організацію паралельних і розподілених обчислень, застосування яких дозволяє значно підвищити продуктивність при вирішенні багатьох практичних завдань, а також використання еволюційних підходів до навчання ШНМ, зокрема штучних імунних систем (ШИС). Побудова гібридних НМ, які складаються з різних типів НМ, кожна з яких навчається за певним алгоритмом, в багатьох випадках дозволяє значно підвищити ефективність їх функціонування. Застосування принципів гібридизації НМ, нечіткої логіки та еволюційних алгоритмів дозволяє створювати нові типи моделей, які мають більш високу якість розпізнавання при одночасному зниженні обчислювальних витрат на навчання [10]. Одним з таких підходів є запропонована гібридна нейро-нечітка модель розпізнавання об'єктів на зображенні на основі згорткового модуля, який навчається методом зворотного поширення помилки, та модуля ННК, який навчається за допомогою ШИС.

2. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ЗОБРАЖЕННІ

Метою процедури розпізнавання об'єктів на зображенні є відповідь на питання: чи відноситься об'єкт, описаний заданими характеристиками, до угруповання об'єктів, що нас цікавить, і якщо відноситься, то до якого саме. Це є фундаментальною проблемою в комп'ютерному зорі і формує основу для вирішення інших завдань, таких як виявлення, локалізація і сегментація об'єктів на зображенні [11]. Будь-яка система розпізнавання включає як процес синтезу образів, тобто формування описів об'єктів розпізнавання і їх класів, так і процес аналізу образів, тобто сам процес прийняття рішень. Сучасний рівень розвитку обчислювальних систем дозволяє комбінувати в системах розпізнавання як різні підходи до опису образів, так і методи, що використовуються в процесі розпізнавання. На розвиток методів виявлення і класифікації об'єктів на зображенні вплинуло використання CNN, особливо моделей глибокого навчання (deep learning) [8]. Моделі глибокого навчання, які використовують кілька рівнів нелінійної обробки інформації для вилучення і перетворення ознак, а також для аналізу та класифікації шаблонів, стали провідною архітектурою для більшості завдань розпізнавання, класифікації та виявлення зображень

[12]. У глибокі CNN (DCNN), в яких для глибокого навчання використовувалися графічні процесори і великі набори даних, були впроваджені технології, пов'язані з різними аспектами їх поліпшення [13, 14]: 1) мережева архітектура; 2) нелінійні функції активації; 3) механізми регуляризації; 4) методи оптимізації тощо. Однак одержувані при цьому моделі часто були великими і повільними для обчислень. Основні обмеження відомих методів і технологій, які використовуються на даний час, обумовлені недостатньою ефективністю розв'язання проблеми навчання ШНМ, налаштування і адаптації до проблемної області, обробки неповної та неточної вхідної інформації, інтерпретації даних і накопичення знань експертів тощо. Тому однією із провідних тенденцій є розвиток інтегрованих гібридних систем на основі глибокого навчання [5, 10], які складаються з різних елементів (компонентів), об'єднаних в інтересах досягнення поставлених цілей. Інтеграція і гібридизація різних методів і технологій дозволяє вирішувати складні завдання, які неможливо вирішити на основі окремих методів або технологій. На сьогоднішній день спостерігається тенденція до гібридизації нейромережових моделей та моделей нечіткого логічного висновку, які поєднують в собі можливості подання та обробки нечітких знань у вигляді бази нечітких правил, і можливості навчання на обмеженій множині прикладів з подальшим узагальненням отриманих знань. В даній роботі ставиться завдання розробки та дослідження моделі, що поєднує у собі технології ШНМ, нечіткої логіки та ШПС для ефективного розпізнавання об'єктів на зображенні. Результатом досліджень є створення системи розпізнавання, яка використовуючи розроблені моделі в якості базової архітектури буде виконувати завдання розпізнавання об'єктів на зображенні.

3. РЕАЛІЗАЦІЯ ГІБРИДНОЇ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ РОЗПІЗНАВАННЯ

Для створення гібридної нейро-нечіткої моделі розпізнавання було запропоновано комбінацію із двох модулів: згорткового модуля CNN та модуля ННК на основі мережі ANFIS. Загальна структура згорткової нейро-нечіткої мережі представлена на рис. 1.

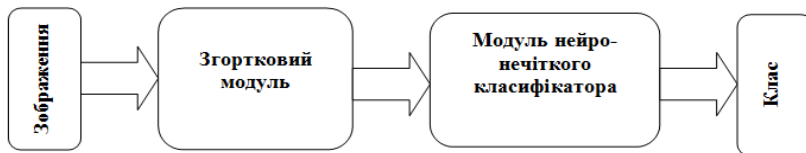


Рис. 1 - Структура згорткової нейро-нечіткої мережі

Згортковий модуль складається з двох видів шарів: згорткові

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІОННИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

(convolutional) шари та підвибіркові (subsampling) шари. Чергуючись між собою, вони формують вхідний вектор ознак для ННК. Незважаючи на великий розмір, ці мережі мають невелику кількість параметрів, які легко налаштовуються. В такій гібридній моделі згортковий модуль CNN виступає в ролі своєрідної експертної системи для модуля ННК. Під кожен вхідний сигнал в ННК створюються три нечітких функції належності (ФН), які характеризують ступінь насиченості сигналу (low, middle, high). На основі активації продукційних правил із бази знань ННК вибираються значення сигналів з найбільш високим (активним) значенням, після чого формується остаточний результат роботи системи.

3.1. Згортковий модуль

Для гібридної моделі розпізнавання образів було взято архітектуру 4-х рівневого згорткового модуля CNN з одним вхідним 3-канальним RGB шаром (рис. 2). Для згортки на всіх шарах мережі використовувалися ядра ознак розміром 3×3 і підвибіркові карти, величина яких дорівнює 2×2 елемента. На свої входи CNN отримує три каналне зображення RGB розмірністю 174×174 пікселів. Після цього воно проходить чотири етапи по черговій згортки вхідної матриці з використанням ядра згортки 3×3 та процесу підвибірки максимальних значень з використанням робочої матриці 2×2 . В результаті на кожному із 4 шарів, після проходження повного робочого циклу, будуть виділені певні ознаки об'єктів зображення, що в результаті ототожнень будуть представлені як карти ознак на вихідному шарі CNN розмірністю $9 \times 9 \times 128$.

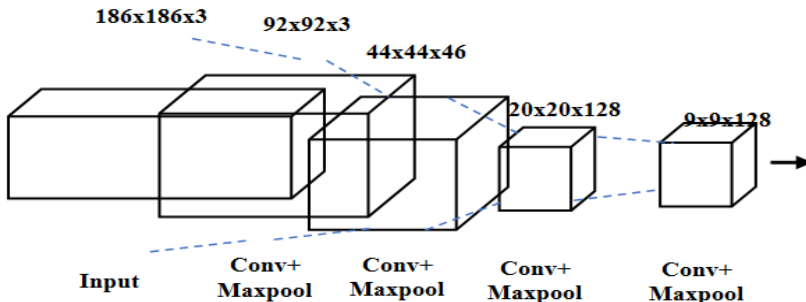


Рис. 2 - Структура згорткового модуля

Згортковий шар є основним будівельним блоком CNN. Параметри шару складаються з набору фільтрів (ядер) для навчання, що мають невелике рецептивне поле. При прямому проході кожен фільтр здійснює згортку за шириною та висотою вхідної матриці, обчислюючи скалярний добуток даних фільтру та входу, формуючи 2-вимірну карту збудження

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІОННИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

цього фільтру. В результаті мережа навчається, при цьому фільтри активуються, коли мережа виявляє певний конкретний тип ознаки у певному просторовому положенні на вході. Розмір у всіх карт згорткового шару однаковий і визначається за формулою:

$$(r, c) = f(mC - kC + 1, nR - hR + 1), \quad (1)$$

де (r, c) – обчислюваний розмір згорткової карти; mC – ширина попередньої карти; nR – висота попередньої карти; kC – ширина ядра; hR – висота ядра.

Ядро являє собою фільтр або вікно, яке ковзає по всій області вхідної карти даних і знаходить певні ознаки об'єктів. Ядро переміщується по вхідній карті і виконує операцію згортки, що використовується для обробки зображень:

$$(f * g)[m, n] = \sum_{k, l} f(m - k, n - l) * g[k, l], \quad (2)$$

де f – базова матриця зображення; g – ядро згортки. Вікно розміру ядра g проходить з заданим кроком все зображення f , на кожному кроці поелементно перемножує вміст вікна на ядро g , результат підсумовується і записується в вихідну матрицю результату. У спрощеному вигляді згортковий шар можна описати виразом:

$$x^l = f(x^{l-1} * k^l + b^l), \quad (3)$$

де x^l – вихід шару l ; $f()$ – функція активації; b^l – коефіцієнт зсуву шару l ; $*$ – операція згортки входу x з ядром k . При цьому за рахунок крайових ефектів розмір вихідних матриць зменшується:

$$x_j^l = f(\sum_i x_i^{l-1} * k_i^l + b_i^l), \quad (4)$$

де x_j^l – карта ознак j -ї карти (вихід шару l); $f()$ – функція активації; b^l – коефіцієнт зсуву шару l ; k_j^l – ядро згортки j -ї карти шару l ; $*$ – операція згортки входу x з ядром k . Для того щоб нейронна мережа володіла хорошими адаптаційними властивостями, вона повинна мати нелінійні компоненти або виконувати нелінійні перетворення.

Враховуючи це, в рамках CNN, зважена сума входів (результат операції згортки) проходить через функцію ReLU [6], тобто, кожен елемент матриці вихідної згортки являє собою штучний нейрон з даним типом активаційної функції.

Таким чином, значення в остаточних картах об'єктів насправді не суми добутку значень ядр ознак і вхідних матриць, а результат роботи активаційної функції, застосованої до них. Шар підвибірki також, як і шар субдескриптезації, має карти, але їх кількість співпадає з попереднім, зв'язаним з ним, згортковим шаром.

Мета шару – зменшення розмірності вихідної матриці попереднього

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІОННИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

шару. Якщо на попередній операції згортки вже були виявлені деякі ознаки, то для подальшої обробки настільки докладне зображення вже не потрібне, і воно ущільнюється до менш детального. У процесі сканування ядром підвибіркового шару (фільтром) карти попереднього шару, виділені області роботи скануючого ядра не перетинаються на відміну від згорткового шару.

В кожній із них виконується робота, пов'язана лише з даними своєї зони. Кожна карта має ядро розміром 2×2 , що дозволяє зменшити попередні матриці субдискретизації в 2 рази.

Вся карта ознак поділяється на області розмірністю 2×2 елемента, з яких вибираються максимальні за значенням елементи. Робота підвибіркового шару описується формулою:

$$x^l = f(a^l * \text{subsample}(x^{l-1}) + b^l), \quad (5)$$

де x^l – вихід з шару l ; $f()$ – функція активації; a^l , b^l – коефіцієнти зсуву шару l ; $\text{subsample}()$ – операція вибірки локальних максимальних значень.

Як і всі НМ прямого розповсюдження сигналу, CNN добре навчаються за допомогою алгоритму зворотного розповсюдження помилки [2, 4].

3.2. Модуль нейро-нечіткого класифікатора з імунним навчанням

Структура ННК побудована на основі модифікованої мережі ANFIS, яка представляє собою багатошарову мережу з прямим розповсюдженням сигналу, що реалізує алгоритм нечіткого виведення Такагі-Сугено першого порядку для n вхідних змінних, описаних m нечіткими множинами [15, 16]:

$$\begin{aligned} R_i: & \text{IF } x_i \text{ is } A_{i1} \text{ AND } \dots \text{AND } x_j \text{ is } A_{ij} \text{ AND } \dots \text{AND } x_m \text{ is } A_{im}, \\ \text{THEN } & y = k_{i1}x_1 + \dots + k_{ij}x_j + \dots + k_{im}x_m + k_{i0}, i = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (6)$$

де $x_j, j = \overline{1, m}$ – вхідні змінні, $y_i, i = \overline{1, n}$ – вихідні змінні, A_{ij} – лінгвістичні терми, що представляють собою нечіткі множини; k_{ij} – коефіцієнти аргументів функції; k_{i0} – зміщення. Мережа складається із 5-и структурних шарів і представлена на рис. 3. Перший шар – це вхідний рівень. Він складається з m вузлів, де m – кількість входів в систему. Елементи даного шару поєднуються з вхідними даними, отриманими в результаті роботи згорткового модуля. Таким чином устаноується зв'язок між двома модулями – з кожного елемента матриці ознак виділяється окремий канал входу в ННК. Другий шар виконує функцію введення нечіткості (фазифікація).

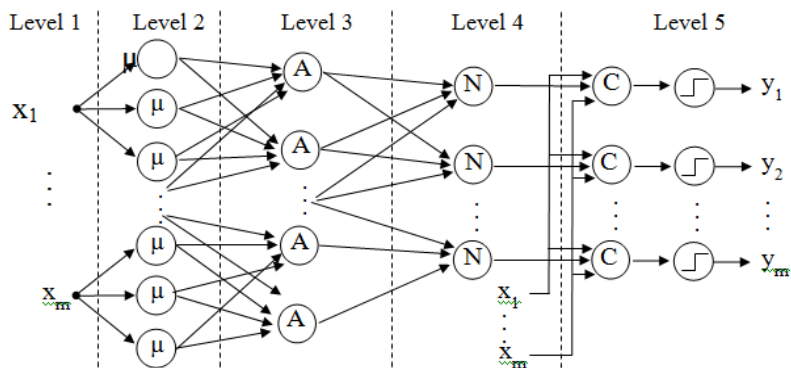


Рис. 3 - Структура нейро-нечіткого класифікатора

Виходи нейронів цього шару є значення ФН $\mu_{A_j}(x_j)$ для входніх змінних $x_j, j = \overline{1, m}$. Використовуються гаусові ФН, які описуються виразом:

$$\mu(x) = \exp \left[- \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (7)$$

де параметр c позначає центр нечіткої множини; параметр σ - коефіцієнт розтягування функції. Вибір гаусової ФН обумовлений її достатньою гнучкістю і простотою, що скорочує розмірність задачі оптимізації при виконанні навчання нечіткої моделі. У цьому шарі знаходиться $m * p$ елементів, де m - кількість входніх змінних, а p - кількість функцій належності. Для фазифікації входніх змінних застосовуються три функції належності (low, middle, high), котрі описують ступінь насиченості сигналу. Такий вибір зумовлений природою входніх значень (інтенсивність каналу кольору), і може варіюватися в рамках від 0 до 255.

У третьому шарі виконується множення входніх сигналів і формуються ваги правила (агрегація):

$$w_i = \prod_{j=1}^m \mu_{A_{ij}}(x_j), i = \overline{1, p^n}, \quad (8)$$

де p^m - кількість нечітких правил.

Кожен i -й нейрон у четвертому шарі служить для обчислення відношення ваги i -го правила до суми ваг всіх правил (нормалізація):

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

$$\overline{w_i} = \frac{w_i}{\sum_{i=0}^m w_i}, i = \overline{1, p^n}. \quad (9)$$

П'ятий шар реалізує функцію активації нейронів (консеквенція), кожен нейрон в ньому описується виразом:

$$\overline{w_i}f = \overline{w_i}(k_{i0} + k_{i1}x_1 + k_{i2}x_2 + \dots + k_{im}x_m) = y_i = \begin{cases} 1, & \text{if } y_i > 0, \\ 0 & \text{if } y_i \leq 0, \end{cases} \quad (10)$$

де $k_{ij}, i = \overline{1, p^n}, j = \overline{1, m}$ – параметри i -го правила. Виходи цього шару є виходами з мережі, кожен результат яких є значенням відношення результату до конкретного класу, які задаються відповідно до умов поставлених задачею розпізнавання.

Другий і п'ятий шари є адаптивними, настройка параметрів яких здійснюється в процесі навчання мережі. У другому шарі налаштовуються параметри ФН (центри нечітких множин c і коефіцієнти розтягування σ для ФН), а в п'ятому – параметри нечітких правил $k_{ij}, i = \overline{1, p^n}, j = \overline{1, m}$. Частина нейронів в ННК є адаптивними і вихід кожного з них залежить від параметрів, що відносяться до цього нейрона. Правило навчання визначає, як змінюються ці параметри для мінімізації помилки нечіткого виведення.

Навчання ННК є наступне завдання оптимізації:

$$\sqrt{\frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [y_i(x_j, P) - y_i^r]^2} \Rightarrow \min, \quad (11)$$

де y_i^r - необхідні значення виходів ННК; P - вектор параметрів ННК, в якості яких використовуються параметри c_{ij} , σ_{ij} та $k_{ij}, i = \overline{1, p^n}, j = \overline{1, m}$, $y_i(y_i, P)$ – i -е вихідне значення ННК при значеннях входів x_j , залежне від параметрів P .

Навчання ННК будемо виконувати на основі ШС [17] з метою налаштування параметрів ФН вхідних змінних і коефіцієнтів нечітких правил, а також для синтезу ННК – видалення надлишкових правил і відповідної зміни структури мережі. Основною ідеєю навчання ННК з використанням ШС є представлення розв'язуваної задачі у вигляді антигену, а можливі її рішення – у вигляді антитіл [18]. Сформуємо популяцію антигенів із прикладів навчальної вибірки $Ag = \{Ag_1, Ag_2, \dots, Ag_M\}$, де M - розмір популяції антигенів, що

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

відповідає кількості прикладів у навчальній вибірці. Кожен антиген представимо вектором фіксованої довжини: $Ag_i = \langle x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i, y_1^i, y_2^i, \dots, y_k^i \rangle$, $i = \overline{1, M}$, де $x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i$ – вхідні змінні, а $y_1^i, y_2^i, \dots, y_k^i$ – вихідні змінні ННК для i -го прикладу навчальної вибірки. В якості антитіл використовуються вектори параметрів, що настраюються. В одному антитілі кодуються всі параметри ННС: c_{ij} , σ_{ij} та k_{ij} , $i = \overline{1, p^n}$, $j = \overline{1, m}$. Для навчання ННК пропонується модель представлення всіх параметрів, що настраюються, у вигляді структурованого адаптивного мультиантитіла [19], представленого на рис. 4, де c_{ij} , σ_{ij} , $i = \overline{1, p^n}$, $j = \overline{1, m}$ – параметри гаусових ФН для n вхідних змінних, кожна з яких має m термів; k_{sv} , $s = \overline{1, n}$, $v = \overline{0, m}$ – коефіцієнти n нечітких правил виду (6).

$c_{11}, \dots, c_{1m}, \dots, c_{n1}, \dots, c_{nm}; \sigma_{11}, \dots, \sigma_{1m}, \dots, \sigma_{n1}, \dots, \sigma_{nm}$	$k_{10}, \dots, k_{1n}$	...	$k_{v0}, \dots, k_{vn}$
Ab_0	Ab_1	...	Ab_{L-1}
Частина 1	Частина 2		

Рис. 4 - Структура мультиантитіла

Популяцію мультиантитіл представимо у вигляді $mAb = \{mAb_1, mAb_2, \dots, mAb_N\}$, де $mAb_i = \{Ab_0, Ab_1, \dots, Ab_{L-1}\}$, $i = \overline{1, N}$ – i -е мультиантитіло, що представляє собою структурований вектор, довжина якого L змінюється в процесі виконання імунного алгоритму; N – розмір популяції мультиантитіл. Кожне мультиантитіло mAb_i , $i = \overline{1, N}$ популяції характеризується повною множиною параметрів ННК, що настраюються. У структурі мультиантитіла, наведеної на рис. 4, використовується поділ параметрів, що настраюються, на дві незалежні частини: частина 1 з параметрами ФН c_{ij} , σ_{ij} , $i = \overline{1, p^m}$, $j = \overline{1, m}$, і частина 2 з параметрами нечітких правил k_{sv} , $s = \overline{1, n}$, $v = \overline{0, m}$.

Частина 1 мультиантитіла є єдине антитіло Ab_0 , довжина якого є фіксованою, тому що число ФН для вхідних змінних є постійним. Частина 2 мультиантитіла складається з $(L - 1)$ незалежних антитіл $Ab_1, \dots, Ab_{L-1}$, кожне з яких містить коефіцієнти k_{sv} , $s = \overline{1, n}$, $v = \overline{0, m}$ для одного правила нечіткого виведення. Частина 2 мультиантитіла є адаптивною, тому що в процесі навчання

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

крім оптимізації коефіцієнтів нечітких правил, що містяться в цій частині, змінюється і їх загальна кількість, тобто виконується структурний синтез. Структурний синтез, в свою чергу, призводить до зміни кількості нейронів в прихованих шарах ННК (рис. 3).

Структурований спосіб формування мультиантитіла дозволяє підвищити ефективність імунного алгоритму за рахунок роздільного застосування імунних операторів до кожної з частин антитіла – імунні оператори застосовуються до параметрів ФН і коефіцієнтів нечітких правил окремо. Обчислення афінності виконується для мультиантитіла в цілому, оперуючи обома частинами. Початкова популяція мультиантитіл генерується випадковим чином. Розмір популяції мультиантитіл вибирається невеликим, тому що використання великої кількості мультиантитіл в популяції веде до великих обчислювальних витрат.

Імунний алгоритм, який реалізує навчання ННК, заснований на принципі клонального відбору та теорії імунної мережі [17, 18]. За принципом клонального відбору реалізується настройка параметрів ННК. Алгоритм клонального відбору забезпечує підтримку різноманітності мультиантитіл в популяції шляхом глобального перегляду простору параметрів, що настраюються, уникаючи локальних мінімумів. Застосування положень теорії імунної мережі дозволяє оцінити взаємодію антитіл між собою і провести супресію, усуваючи, таким чином, надлишковість правил нечіткого виводу.

Алгоритм навчання ННК є ітераційною процедурою послідовної ідентифікації спостережень з навчальної вибірки. Алгоритм навчання ННК представляє собою наступну послідовність кроків: 1. Ініціалізація початкової популяції мультиантитіл mAb – виконується випадковим чином; 2. Обчислення афінності Aff_{mAb-Ag} кожного мультиантитіла до антигену:

$$Aff_{mAb-Ag} = (1 + d_{mAb-Ag})^{-1}, \quad (12)$$

де d_{mAb-Ag} – відстань Хеммінга між отриманими значеннями виходів ННК $y_i, i = \overline{1, n}$ і бажаними y_i^r для всіх S антигенів Ag популяції:

$$d_{mAb-Ag} = \sum_{i=1}^n y_i, \text{ where } y_i = \begin{cases} 1, & \text{if } y_i \neq y_i^r \\ 0, & \text{if } y_i = y_i^r \end{cases}. \quad (13)$$

Таким чином, афінність кожного мультиантитіла mAb_i обчислюється по відношенню до всієї популяції антигенів Ag .

3. Клонування мультиантитіл пропорційно до їх афінності та формування популяції клонів Cl . Параметрами оператора клонування є кількість антитіл для клонування n_{Cl} і кратність клонування

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

мультиантитіла N_{Cl} . Використовується фіксоване значення параметра n_{Cl} . Кратність клонування мультиантитіла N_{Cl} регулюється в процесі роботи імунної алгоритму в залежності від афінності мультиантитіла по співвідношенню:

$$N_{Cl} = \alpha * N_{Cl_min} + (1 - \alpha) * N_{Cl_max}, \quad (14)$$

де $\alpha = \frac{Aff_{best} - Aff_{mAb} - Ag}{Aff_{best}}$; N_{Cl_min} і N_{Cl_max} – мінімальна і максимальна кратність клонування; Aff_{best} – краще значення афінності в поточному поколінні.

4. Мутація клонів (виконується обернено пропорційно до афінності мультиантитіла) і формування популяції мutowаних клонів MC . Мутація обраних параметрів мультиантитіла виконується шляхом додавання гаусового шуму:

$$mAb_{i+1} = mAb_i + N(0, \sigma_i). \quad (15)$$

Для зміни дисперсії випадкової величини σ_i використовується співвідношення $\sigma_i = \sigma_i \frac{Aff_{best} - Aff_{mAb} - Ag}{Aff_{best} - Aff_{worst}}$, де Aff_{worst} – найгірше значення афінності в поточному поколінні.

5. Обчислення афінності популяції мutowаних клонів MC відповідно до (12). Якщо в результаті мутації афінність покращилася, заміна клонами відповідних мультиантитіл в популяції.

6. Обчислення афінності антитіл всередині частини 2 мультиантитіла. Супресія антитіл, афінність яких більше заданого порогу δ_{net} . Обчислення афінності виконується відповідно до виразу:

$$Aff_{Ab-Ab} = (1 + \|Ab_1 - Ab_2\|)^{-1} = \left(1 + \sqrt{\sum_{j=0}^n (k_{1j} - k_{2j})^2}\right)^{-1}. \quad (16)$$

Виконання супресії шляхом видалення антитіл з афінністю, більше заданого порогу δ_{net} , дозволяє зменшити кількість нейронів і зв'язків між ними в прихованому шарі і усунути їх надлишковість.

7. Перевірка критерію зупинки. В якості критерію зупинки використовується або досягнення заданого порогу афінності, або досягнення заданої кількості поколінь роботи алгоритму. Результатом роботи алгоритму буде мультиантитіло з кращою по популяції афінністю, що визначає структуру ННК і містить налаштовані її параметри. Кроки 1-5 алгоритму відповідають принципу клонального відбору. Алгоритм на даних етапах працює з обома частинами мультиантитіла. Крок 6 відповідає принципу мережевої взаємодії. Якщо на кроках 1-5 мультиантитіло оброблялося як звичайне антитіло, то на кроці 6 робота виконується тільки з частиною 2 мультиантитіла, яка

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

складається з окремих антитіл, що представляють собою параметри правил нечіткого виводу k_{ij} , $i = \overline{1, p^n}$, $j = \overline{1, m}$. Структура ННК (кількість нейронів в прихованих шарах) встановлюється відповідно до кількості нечітких правил, закодованих в антитілі.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Для побудови моделей були використані готові архітектурні рішення (бібліотеки) відносно створення кожного окремого модуля. Генерація модуля CNN виконувалася на основі бібліотеки для генерації глибоких нейронних мереж keras-sharp. В свою чергу модуль ННК базувався на програмному пакеті fuzzy-class-net. Але його навчання виконувалося з використанням ШІС. Для об'єктивного аналізу результатів отримані дані досліджуваної гібридної нейро-нечіткої моделі порівнювалися з аналогічними вихідними значеннями, отриманими при використанні стандартної CNN мережі. Такий підхід дає можливість оцінити переваги та недоліки запропонованої моделі. Для виконання навчання було обрано набір зображень розміром 174 x 174 пікселів. На кожному з них зображений один цільовий об'єкт, який потрібно було розпізнати в ході тестових експериментів. Вся вибірка зображень була поділена на два класи: клас 1 – це зображення котів, і клас 2 – це зображення собак. Кожна множина зображень тестових даних складається із 1000 екземплярів. Для навчання мереж були обрані випадковим чином по 750 екземплярів із кожної множини тестових даних. А для тестування моделі – по 250 екземплярів, що лишилися в кожній із множин, плюс 250 обиралися з обох класів випадковим чином з тих, що уже використовувалися для навчання. Результати навчання наведені на рис. 5, де по шкалі Y знаходяться значення помилки, а по шкалі X – кількість епох. Як видно із рис 5, в процесі проходження 1500 навчальних епох загальне значення помилки, що видає гібридна ННМ, зупинилося на значенні 0.2. Для отримання більш точних показників потрібно збільшити кількість навчальної вибірки та кількість епох навчання. Починаючи з 350-ї епохи на виході ННК почали формуватися відносно правильні відповіді з точністю результату в діапазоні 65 %– 80 %. В свою чергу, для стандартної CNN більш точні вихідні значення починали з'являтися з 300-ї епохи, а їх значення коливалося в діапазоні 64 % – 79 %. На останній 1500 епосі значення помилки в мережах було приблизно однакове. В результаті навчання мереж була помічена одна особливість. Час на виконання кожної навчальної ітерації епохи для гібридної ННМ був, приблизно, на 5 % більший, ніж у звичайної CNN мережі. Це зумовлено тим, що при навчанні гібридної ННМ під час навчання в ННК виконуються додаткові операції налаштування структури і параметрів продукційних правил.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

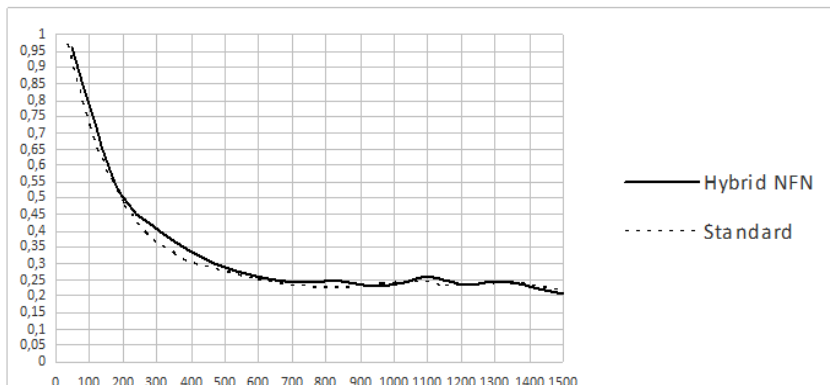


Рис. 5 - Графіки навчання гібридної ННМ і стандартної CNN

Наступним етапом експериментів була перевірка навчених систем на те як вони будуть розпізнавати набір тестових даних, що склалися як з нових зображень, не задіяних в навчанні, так і з використаних. На входи кожної із моделей було подано по 500 зображень із кожного класу. В результаті тесту були отримані наступні результати. Точність розпізнавання об'єктів на зображенні для гібридної ННМ склала 80 %, а в CNN мережі цей показник був зафіксований на значенні в 78 %. Детальна інформація по даному параметру для кожного із тестових класів наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння точності розпізнавання класів

Клас зображень	Клас 1		Клас 2	
Модель розпізнавання	Стандартна CNN	Гібридна ННМ	Стандартна CNN	Гібридна ННМ
Точність розпізнавання (в %)	77.27%	80.12%	78.49%	79.84%
Кількість розпізнаних зображень	372	398	374	388

Не менш важливим показником являється кількість зображень, на яких були розпізнані правильно класи об'єктів. Для того щоб об'єкт вважався розпізнаним, система повинна видати в даному тесті значення точності більше або рівне 65 %. В результаті експерименту було встановлено, що цей показник для гібридної ННМ склав 786 точно знайдених об'єктів, а для CNN цей показник дорівнював 746 об'єктів.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Фінальна різниця показників складає 40 образів.

З результатів проведених експериментів слідує, що під час навчання розроблений алгоритм гібридної ННМ дещо повільніший ніж алгоритм CNN. Оскільки при виконанні навчальної ітерації виконуються додаткові розрахунки на налаштування продукційних правил, що займає до 5 % часу. Але запропонована модель показала більш кращі показники в розпізнаванні об'єктів на зображенні. Було встановлено, що результат точності розпізнавання зображень більший ніж в CNN на 1,5 % , а кількість правильно розпізнаних зображень більша на 40 елементів, що складає 8 % від загальної вибірки тестових даних.

5. ВИСНОВКИ

Побудова гібридних НМ, які складаються з різних типів НМ, кожна з яких навчається за певним алгоритмом, дозволяє підвищити точність і знизити складність вирішення практичних завдань, зокрема задачі розпізнавання об'єктів на зображенні. Використання принципів гібридизації НМ, нечіткої логіки та еволюційних обчислень дозволяє створювати нові типи моделей, які мають більш високу якість розпізнавання при одночасному зниженні обчислювальних витрат на навчання. Для вирішення задачі розпізнавання об'єктів на зображенні запропоновано використання гібридної нейро-нечіткої моделі, яка складається з двох модулів: згорткового модуля та модуля нейро-нечіткого класифікатора. Згортковий модуль реалізовано на основі CNN, який навчається за допомогою алгоритму зворотного розповсюдження помилки. Модуль нейро-нечіткого класифікатора реалізовано на основі модифікованої мережі ANFIS. Навчання нейро-нечіткого класифікатора пропонується виконувати на основі імунного підходу шляхом настройки його параметрів і структури. Пропонується модель представлення всіх параметрів мережі, що настраюються, у вигляді структурованого адаптивного мультиантитіла, яке складається з двох частин. Структурований спосіб формування мультиантитіла дозволяє підвищити ефективність імунних алгоритмів за рахунок роздільного застосування імунних операторів до кожної з частин мультиантитіла і вирішити, таким чином, завдання структурного синтезу нейро-нечіткого класифікатора.

Проведені експериментальні дослідження показали, що запропонована гібридна нейромережева нечітка модель показала більш кращі показники в розпізнаванні об'єктів на зображенні ніж стандартна CNN.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Duda R.O. Pattern classification / R.O. Duda, P.E. Hart, D.G. Stork. – Wiley & Sons, 2010. – 738 p.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- [2] Khaikin S. Neural networks. Full course: A Comprehensive Foundation, 2nd edn, Williams, Moscow, 2006. – 1104 p.
- [3] LeCun, Y. Convolutional networks for images, speech, and timeseries /Y. LeCun, Y. Bengio. – The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. 1995. – pp. 255-258.
- [4] Goodfellow I. Deep learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville: –The MIT Press, 2016. – 800 p.
- [5] Waseem Rawat, Zenghui Wang. Deep Convolutional Neural Networks for Image Classification: A Comprehensive Review / Neural Computation 29, 2017. – pp. 2352–2449.
- [6] Jason Brownlee. Convolutional Neural Network Model Innovations for Image Classification / Deep Learning for Computer Vision, 2019.
- [7] Venkatesan R., Baixin Li. Convolutional Neural Networks in Visual Computing, CRC Press, 2017.
- [8] Mingyuan Xin, Yong Wang. Research on image classification model based on deep convolution neural network /EURASIP Journal on Image and Video Processing, Article number: 40, 2019.
- [9] LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-based learning applied to document recognition / Proceedings of the IEEE, Vol: 86, Iss: 11, 1998. – pp. 2278 – 2324.
- [10] Castillo O. Melin P. Hybrid Intelligent Systems in Control, Pattern Recognition and Medicine / Studies in Computational Intelligence. Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 381 p.
- [11] Karpathy A., Fei-Fei L. Deep visual-semantic alignments for generating image descriptions / In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Red Hook, NY: Curran. 2016. – pp. 3128–3137.
- [12] Boukaye BoubacarTraore^{ab}BernardKamsu-Foguem^aFanaTangara Deep convolution neural network for image recognition / Ecological Informatics // Vol. 48, 2018. – pp. 257-268.
- [13] Li Deng, Dong Yu. Deep Learning: Methods and Applications / MSR-TR-2014-21, 2014.
- [14] Matthew D. Zeiler, Rob Fergus. Visualizing and Understanding Convolutional Networks / Computer Vision – ECCV 2014, pp 818-833.
- [15] Zadeh, Lotfi A. A Theory of Approximate Reasoning. In: Hayes, Jean E. Michie, Donald and L. I. Mikulich (eds.): Machine Intelligence, vol. 9 (based on the International Machine Intelligence Workshop), New York: Elsevier, 1979, pp. 149–194.
- [16] Kasabov N. The Evolution of the Evolving Neuro-Fuzzy Systems: From Expert Systems to Spiking, Neurogenetic and Quantum Inspired / A Bradford Book The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 2013, pp. 165-175.
- [17] Dasgupta D. Immunological computation, Theory and applications / D. Dasgupta, L.F. Nino – Taylor & Francis Group, 2009. – 278 p.
- [18] Dasgupta D. Recent Advanced in Artificial Immune Systems: Models and Applications / D. Dasgupta, S. Yu, F. Nino // Applied Soft Computing. Elsevier, 2011. – P. 1574-1587.
- [19] Korablev N. Immune Approach for Neuro-Fuzzy Systems Learning Using Multiantibody Model / N. Korablev, I. Sorokina // ICARIS 2011, Springer Lecture Notes in Computer Science. – 2011. – Vol. 6825. – P. 395–405.

**RECOGNITION OF OBJECTS IN AN IMAGE USING CNN AND NEURO-
FUZZY CLASSIFIER WITH IMMUNE LEARNING**

Dr.Sci. Korablyov M., Dr.Sci. Axak N., Ph.D. Fomichov O., Chuprina A.

Abstract. Modern systems for image processing and analysis are characterized by the active use of artificial neural networks, for training of which, as a rule, gradient methods are used, but their main limitation of the implementation is high computational cost. The use of the principles of hybridization of neural networks, fuzzy logic and evolutionary algorithms allows you to create new types of models that have a higher recognition quality while reducing the computational cost of training. A hybrid neuro-fuzzy recognition model is proposed, which consists of two modules: a convolutional module (CNN) and a neuro-fuzzy classifier module (NFC) built on the basis of a modified ANFIS network. The CNN module, which is trained by the method of back propagation error, acts as a kind of expert system for the NFC module. It is proposed to perform NFC training based on the use of artificial immune systems by presenting all adjustable parameters in the form of a structured adaptive multi-antibody, and consists in adjusting the NFC parameters and structure. Experimental studies have been carried out on test samples, confirming the effectiveness of the proposed model for recognizing objects in an image.

Keywords: object recognition, hybrid model, convolutional module, neuro-fuzzy classifier, immune learning, multi-antibody.

**РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ С
ПОМОЩЬЮ CNN И НЕЙРО-НЕЧЕТКОГО КЛАССИФИКАТОРА
С ИММУННЫМ ОБУЧЕНИЕМ**

**Д.т.н. Кораблев Н.Н., д.т.н. Аксак Н.Г., к.т.н. Фомичев А.А.,
Чуприна А.А.**

Аннотация. Современные системы обработки и анализа изображений характеризуются активным использованием искусственных нейронных сетей, для обучения которых используются, как правило, градиентные методы, основным ограничением на реализацию которых большие вычислительные затраты. Построение гибридных нейронных сетей позволяет повысить эффективность их функционирования. В работе предлагается гибридная нейросетевая нечеткая модель распознавания объектов на изображении, состоящая из двух модулей: сверточного модуля (CNN) и модуля нейромережевого нечеткого классификатора (ННК), построенного на основе модифицированной сети ANFIS. Модуль CNN учится методом обратного распространения ошибки, выступает в роли экспертной системы для модуля ННК. Обучение ННК предлагается выполнять на основе использования искусственных иммунных систем путем представления всех настраиваемых параметров в виде структурированного адаптивного мультиантитела, и состоит из настройки параметров и структуры ННК. Проведены экспериментальные исследования на тестовых наборах, подтверждающие эффективность предложенной гибридной модели распознавания объектов на изображении.

Ключевые слова: распознавание объектов, гибридная модель, нейро-нечеткий классификатор, иммунное обучение, мультиантитело

САМООРГАНИЗАЦИЯ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ МОДЕЛИ С ЛИНЕЙНЫМИ ЧАСТНЫМИ ОПИСАНИЯМИ

Д.т.н., Поворознюк А.И., к.т.н. Поворознюк О.А.

Аннотация. В работе рассматривается метод группового учета аргументов (МГУА), который эффективно используется для построения регрессионных моделей многомерных объектов по ограниченной выборке данных. Индуктивные алгоритмы МГУА используют итерационную процедуру самоорганизации математических моделей, при которой объект описывается множеством частных описаний (регрессия от 1 – 2-х аргументов степени не выше 2), селективный отбор лучших моделей и рекурсивное усложнение модели на каждом шаге итерации. Проанализированы достоинства, недостатки и области применения известных алгоритмов МГУА. Показано, что увеличение размерности модели в результате итерационной процедуры автоматически приводит к соответствующему увеличению степени результирующего полинома, поэтому применение известных алгоритмов самоорганизации для построения нелинейных моделей многомерных объектов невысокой степени мало эффективно. Разработан метод самоорганизации для синтеза мультипликативной модели с линейными частными описаниями, который лишен отмеченного недостатка: степень результирующего уравнения регрессии увеличивается минимальным образом (на единицу) при переходе на следующий шаг итерации, а размерность модели (число факторов) может быть максимальным уже на первом шаге. Проверена эффективность метода на тестовых примерах.

Ключевые слова: Регрессия, Метод МГУА, Самоорганизация, Частное описание, Итерация, Мультипликативная модель, Тестирование

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ.

Рассматривается задача идентификации многомерных нелинейных объектов, представленных в виде «черного ящика» по измеренным значениям вектора входных воздействий $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ и выходного значения Y . Модель объекта строится в виде некоторой аналитической функции $Y' = f(X)$, которая наилучшим образом (в смысле минимума среднеквадратичных отклонений) аппроксимирует выход Y .

В качестве $Y' = f(X)$ обычно используют регрессионную зависимость [1] в виде полинома Колмогорова - Габора вида:

$$y = P(x_1, \dots, x_n) = a_0 + \sum_i a_i x_i + \sum_i \sum_j a_{ij} x_i x_j + \sum_i \sum_j \sum_k a_{ijk} x_i x_j x_k \dots \quad (1)$$

При применении классического регрессионного анализа структура модели (количество факторов и максимальная степень полинома) задается исследователем, а оценка коэффициентов модели по экспериментальным данным обучающей выборки выполняется методом наименьших квадратов (МНК) [1]. Вычислительная процедура МНК

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

сводится к решению нормальной системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов полинома.

При увеличении входных факторов и степени полинома число коэффициентов в (1) растет лавинообразно, что предъявляет повышенные требования к объему обучающей выборки (для реализации МНК число точек обучающей выборки должно быть существенно больше суммарного числа коэффициентов). Кроме того, реальные данные, как правило, содержат группы сильно коррелированных факторов, в результате чего возникает явление мультиколлинеарности [2], что приводит к плохой обусловленности и, в предельном случае, вырожденности ковариационной матрицы. При этом решение нормальной системы линейных уравнений становится не устойчивым или решение получить нельзя. Поэтому на практике обычно ограничиваются линейными регрессионными моделями, хотя они неточны и используются для "грубой" оценки с целью отбора множества влияющих факторов модели. Для синтеза регрессионных моделей многомерных объектов по небольшому числу экспериментальных данных эффективно используются индуктивные методы самоорганизации (МГУА) [3, 4], разработанные академиком НАНУ Ивахненко А.Г. В методах самоорганизации одновременно определяется структура регрессионной модели и ее коэффициенты путем применения итерационной процедуры последовательного усложнения модели с выбором лучших решений на каждом шаге итерации.

Индуктивные алгоритмы МГУА известны также как полиномиальные нейронные сети глубокого обучения [5-6], и используются в таких областях, как интеллектуальный анализ данных и обнаружение знаний [7], прогнозирование [6,8], моделирование и оптимизация сложных систем [9], распознавание образов [10] при решении различных прикладных задач [11-15].

2. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Методы самоорганизации основаны на следующих принципах теории эвристической самоорганизации: принцип внешнего критерия и принцип неокончателности решения [3,16]. Принцип внешнего критерия заключается в том, что оценка качества модели (точности приближения экспериментальных данных уравнением регрессии) выполняется с помощью критерия, который является внешним по отношению к критерию, с помощью которого выполняется оценка коэффициентов модели. Одним из вариантов внешнего критерия может быть разбивка всех экспериментальных точек на две части, где первая из них – обучающая выборка, которая служит для определения коэффициентов по МНК, а вторая часть экспериментальных точек - проверочная (внешняя)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

выборка служит для оценки точности уравнения регрессии. Применение внешнего критерия позволяет получать модель оптимальной сложности.

Принцип неокончателности решения заключается в том, что на каждом шаге итерации остается не одно, а группа лучших решений, то есть отсекаются бесперспективные решения, и только на последнем шаге из всех лучших решений выбирается единственное лучшее (оптимальное) среди всех равных. Суть алгоритмов самоорганизации заключается в том, что полное описание объекта вида (1) заменяется множеством частных описаний [3], в качестве которых используются двухфакторные полиномиальные модели степени не выше второй (групповой учет аргументов). Линейное частное описание

$$Y_i(x_k, x_l) = a_{0i} + a_{1i}x_k + a_{2i}x_l. \quad (2)$$

Частное описание с ковариацией

$$Y_i(x_k, x_l) = a_{0i} + a_{1i}x_k + a_{2i}x_l + a_{3i}x_kx_l. \quad (3)$$

Квадратичное частное описание

$$Y_i(x_k, x_l) = a_{0i} + a_{1i}x_k + a_{2i}x_l + a_{3i}x_kx_l + a_{4i}x_k^2 + a_{5i}x_l^2, \quad (4)$$

где: x_k, x_l – факторы, которые включены в i -ю модель $i = \overline{1, N_p}$.

N_p – количество частных описаний.

Если входной вектор $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ содержит n факторов, то число частных описаний равно числу возможных сочетаний факторов по 2, т.е. $N_p = C_n^2$. На первом шаге итерации генерируется N_p структур частных описаний. Для каждого частного описания выполняется оценка коэффициентов по МНК на точках обучающей последовательности и точность относительно внешнего критерия. Согласно принципа неокончателности решений, на следующий шаг итераций отбираются n лучших моделей, для которых рассчитываются их выходные значения Y (отклики). Усложнение модели (увеличение числа переменных и степени полинома) выполняется при переходе к следующему шагу итерации, причем отклики лучших моделей предыдущего шага являются исходными факторами следующего шага итерации – рекурсивная подстановка результатов $i - 1$ -го шага в i -й. Критерием останова является правило «левого угла» – увеличение или стабилизация внешнего критерия [3]. Множество алгоритмов МГУА отличаются структурой частных описаний, внешним критерием (точность модели на точках проверочной последовательности, баланс коэффициентов), способом получения результирующей модели и др. [3].

Таким образом, из рассмотренных особенностей алгоритмов самоорганизации можно сделать вывод, что каждый алгоритм имеет свою область применения, но у всех алгоритмов увеличение размерности

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

модели в результате итерационной процедуры автоматически приводит к соответствующему увеличению степени результирующего полинома. Исключением являются комбинаторные алгоритмы с линейными частными описаниями, но они позволяют построить только линейную многомерную модель. Поэтому применение известных алгоритмов самоорганизации для построения нелинейных моделей многомерных объектов невысокой степени мало эффективны. Так как практически все типы частных описаний используются в известных алгоритмах, то перспективным является подход, основанный на изменении итерационной процедуры усложнения модели. При этом используются линейные частные описания на каждом шаге итерации, а результирующая модель (вместо рекурсивной подстановки) синтезируется в виде мультипликативной модели линейных частных описаний предыдущего $i - 1$ -го и текущего i -го шагов итерации.

Объект исследования – процесс идентификации многофакторных нелинейных объектов по измеренным значениям входных и выходных значений. *Предмет исследования* – методы синтеза регрессионных моделей в алгоритмах самоорганизации.

Целью работы является разработка метода самоорганизации, в котором число факторов не зависит от шага итерации и может быть максимальным уже на первом шаге, а степень результирующего уравнения регрессии увеличивается минимальным образом (на единицу) при переходе к следующему шагу итерации. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: разработать метод самоорганизации для синтеза мультипликативной модели с линейными частными описаниями; разработать вычислительные процедуры реализации метода; оценить эффективность метода на тестовых примерах.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА САМООГРАНИЗАЦИИ ДЛЯ СИНТЕЗА МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ МОДЕЛИ С ЛИНЕЙНЫМИ ЧАСТНЫМИ ОПИСАНИЯМИ

Предлагаемый в работе метод основан на базовых принципах индуктивных алгоритмов МГУА, поэтому при его разработке необходимо formalизовать следующие этапы преобразования информации: генерация структур линейных частных описаний; вычисление коэффициентов частных описаний заданной структуры по МНК на экспериментальных точках обучающей выборки; вычисление точности частных описаний на точках проверочной выборки и селективный отбор наилучших решений; разработка процедуры усложнения модели при переходе на следующий шаг итерации; формирования критерия останова и выбор оптимального решения.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

3.1 Генерация структур линейных частных описаний

В соответствии с поставленной задачей, в качестве частных описаний на каждом шаге итерации используются линейные полиномы от i переменных $i = \overline{1, n}$, где n – размерность объекта, с различным сочетанием неповторяющихся аргументов. Число возможных полиномов равно

$$N_p = \sum_{j=1}^n C_n^j = 2^n - 1, \quad (5)$$

что существенно больше числа частных описаний в известных алгоритмах. При программной реализации генерации структур используется целочисленный массив длиной n , каждый элемент которого содержит 0 или 1, который используется в качестве маски структуры (1-данный фактор присутствует в описании; 0-отсутствует). Для каждого значения $i \ i = \overline{1, n-1}$ в начало массива записывается i единиц, после чего последняя единица сдвигается на одну позицию вправо, формируя новую маску и так далее до конца массива.

3.2 Вычисление коэффициентов частного описания заданной структуры и реализация процедуры усложнения модели

Вычисление коэффициентов частного описания заданной структуры на первом шаге итерации не представляет никаких проблем и выполняется стандартной процедурой МНК на точках входных воздействий $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ и выходных Y обучающей выборки. При большой размерности частных описаний ($n > 20$) коэффициенты полинома могут быть получены комбинаторным алгоритмом. Вычисление откликов частных описаний на точках проверочной выборки и отбор наилучших решений согласно принципа внешнего дополнения также проводится известными методами. Для простоты алгоритмической реализации, число наилучших решений выбирается равным количеству входных факторов n . Для того, чтобы при переходе к следующему шагу итерации степень результирующего уравнения регрессии увеличивалась на единицу, уравнение регрессии строится в виде мультипликативной модели вида

$$P_s^k(X) = \prod_{i=1}^k P^i(X), \quad (6)$$

где $P^i(X)$ – линейный полином i -го шага итерации.

Отличительной особенностью данного метода является то, что полиномы любого шага итерации используют в качестве аргументов вектор входных факторов X , тогда как в известных методах вектор X

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

используется только на первом шаге итерации, на всех остальных шагах входными данными являются отклики наилучших решений предыдущего шага (рекурсивная подстановка). В процессе усложнения модели согласно выражения (6), над каждым из лучших решений предыдущего $k-1$ -го шага «надстраиваются» N_p (определяется по (5)) полиномов текущего k -го шага итерации. Решения предыдущего шага являются «родителями» решений текущего шага – «потомки». Таким образом, на каждом шаге итерации (кроме первого) число частных описаний равно произведению n на N_p . Из всего этого множества частных описаний только n наилучших пропускаются на следующий шаг. Критерием останова является принятое в методах самоорганизации правило «левого угла» – увеличение или стабилизация погрешности наилучших частных описаний на точках проверочной выборки. На последнем шаге итерации из наилучших выбирается единственная модель, которая является результатом работы метода. После раскрытия скобок в (6) получается полином в виде (1). *Вычисление коэффициентов частного описания заданной структуры на k -м шаге итерации ($k > 1$)*. Согласно выражению (6) аргументами полиномов k -го шага является вектор входных факторов. Тогда при классическом применении МНК коэффициенты этих полиномов будут определяться из условия минимизации среднеквадратичных отклонений между откликами аналитической функции $P^k(X)$ и выходным значением Y . При этом $P^k(X)$ текущего k -го шага итерации аппроксимирует Y независимо от результатов аппроксимации своего «родителя» на предыдущем $k - 1$ -м шаге. А мультипликативная свертка «родителя» и «потомка» не выполняет поставленную задачу увеличения точности модели при ее усложнении и дает непредсказуемый результат. Поэтому необходимо разработать систему линейных алгебраических уравнений для вычисления коэффициентов полиномов по МНК с учетом того, что в выражении (6) коэффициенты мультипликативных моделей «родителей» предыдущего $k - 1$ -го шага итерации уже определены и известны их отклики Y_{k-1}^* (в дальнейшем индекс $k - 1$ опускается). С учетом выше изложенного, запишем выражение (6) в виде:

$$P_s^k(X) = Y_{k-1}^* P^k(X) \quad (7)$$

Таким образом необходимо определить коэффициенты последнего сомножителя в (7). Запишем функционал МНК

$$F = \sum_{i=1}^{N_{ог}} (Y_i - P_s^k(X_i))^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

где X_i , Y_i – значения входных и выходных воздействий в i -й точке соответственно;

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

$P_s^k(X_i)$ отклик мультипликативной модели текущего шага итерации, которая определяется по (7), суммирование ведется по точкам обучающей последовательности объемом $N_{об}$.

Запишем линейные полиномы текущего шага в развернутом виде

$$P^k(X_i) = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j x_{ji}, \quad (9)$$

где m – размерность текущего частного описания.

С учетом (7) и (9) функционал (8) записывается в виде (здесь и далее в Y_{k-1}^* индекс $k-1$ опускается):

$$F = \sum_{i=1}^{N_{\phi\delta}} (Y_i - Y_i^* (a_0 + \sum_{j=1}^m a_j x_{ji}))^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

Данный функционал в пространстве параметров (коэффициентов $a_j, j = \overline{0, m}$) является выпуклой функцией и имеет один глобальный минимум, для нахождения которого необходимо взять частные производные по каждому коэффициенту и приравнять их нулю. В результате получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial a_0} &= 2 \sum_i ((Y_i - Y_i^*(a_0 + a_1 x_{1i} + \dots + a_m x_{mi})) Y_i^*) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial a_1} &= 2 \sum_i ((Y_i - Y_i^*(a_0 + a_1 x_{1i} + \dots + a_m x_{mi})) Y_i^* x_{1i}) = 0 \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{\partial F}{\partial a_m} &= 2 \sum_i ((Y_i - Y_i^*(a_0 + a_1 x_{1i} + \dots + a_m x_{mi})) Y_i^* x_{mi}) = 0 \end{aligned}$$

Раскрыв скобки и выполнив несложные арифметические операции, получим систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов $a_j, j = \overline{0, m}$ вида:

[illegible]

Решив систему уравнений (11) любым известным методом, получим коэффициенты полинома, который дает минимум функционала (10).

Следует заметить, что на первом шаге итерации предыдущие решения отсутствуют, поэтому $Y^* \equiv 1$ и система уравнений (11)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

превращается в классическую систему уравнений метода МНК для линейной многофакторной регрессии, что подтверждает корректность наведенных выше преобразований.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнено исследование эффективности разработанного метода путем тестовых расчетов с помощью математического пакета MATLAB [17]. Созданы программы реализации известного метода МГУА с квадратичными частными описаниями вида (4) – Алгоритм 1 и разработанного метода – Алгоритм 2. Для сравнительного анализа взяты три типа уравнений:

- 1 – большая размерность, малая степень;
- 2 – малая размерность, малая степень;
- 3 – большая размерность, большая степень.

Уравнения приведены в табл.1

По каждому из заданных уравнений сгенерирована таблица исходных данных. В качестве значений входного вектора, а также в качестве значений коэффициентов уравнений взяты равномерно распределенные на интервале $[-2, 2]$ псевдослучайные числа, полученные с помощью стандартной функции RAND.

Объем выборки равен 100 точек (50 – обучающая последовательность; 50 – проверочная).

Таблица1. Исходные функциональные зависимости

Тип	№	Уравнения
1	1	$Y = 1,42 - 1,61x_1 + 0,221x_2 - 0,714x_3 + 0,443x_1x_3 + 0,176x_4 + 0,358x_2x_5$
	2	$Y = -1,33 + 1,25x_1 - 1,83x_2 + 1,42x_3 - 1,61x_4 + 0,225x_5x_1 - 0,714x_5$
2	3	$Y = 1,42 - 1,61x_3^2 + 0,221x_4^3$
	4	$Y = 1,25 - 1,83x_5^2 + 1,45x_5^4$
3	5	$Y = -0,714 + 0,174x_1^3 + 0,443x_2^4 + 0,358x_3^2 - 1,33x_4^3 + 1,25x_5$
	6	$Y = 0,358 - 1,33x_1^3 + 1,25x_2^3 - 1,83x_3^2 + 1,42x_4^3$

Внешний критерий для отбора лучших решений – погрешность на точках проверочной последовательности, которая определяется по выражению

$$\varepsilon_{np} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{np}} (Y_i - P_s^k(X_i))^2}{\sum_{i=1}^{N_{np}} Y_i} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

где: Y_i – значение выходной величины;

$P_s^k(X_i)$ – прогнозируемое моделью значение выходной величины.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

По таблице экспериментальных данных выполнено восстановление исходной функциональной зависимости с помощью Алгоритма 1 и Алгоритма 2. Сравнительный анализ расчетов приведен в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение эффективности

Тип уравнения	№ уравнения	Степень уравнения n	Размерность уравнения N	Алгоритм 1				Алгоритм 2			
				Число шагов $г$	Степень уравнения n	Размерность уравнения N	Погрешность $\varepsilon_{\text{пр}}$ (%)	Число шагов $г$	Степень уравнения n	Размерность уравнения N	Погрешность $\varepsilon_{\text{пр}}$ (%)
1	1	2	5	3	8	4	6,603	2	2	5	1,34
	2	2	5	3	8	5	7,703	2	2	5	0,377
2	3	3	2	1	2	2	0,148	2	2	2	3,34
	4	4	1	2	4	3	0,964	3	3	2	2,89
3	5	4	5	3	8	4	4,234	2	2	5	6,44
	6	3	4	3	8	4	0,366	2	2	4	7,87

Из сравнительного анализа данных табл. 2 по критерию (12) видно предпочтительное применение Алгоритма 2 для первого типа уравнений (уравнения большой размерности невысокой степени). Изменение средней погрешности $\varepsilon_{\text{пр}}$ наилучших частных описаний при усложнении модели для рассмотренных ранее функциональных зависимостей приведены в табл. 3.

Анализ результатов табл. 3 показывает:

- по сравнению с Алгоритмом 1 в Алгоритме 2 существенный вклад в уменьшении погрешности $\varepsilon_{\text{пр}}$ вносит уже первый шаг итерации, так как уже на первом шаге алгоритм отбирает наиболее значимые факторы.

- для получения результирующего уравнения регрессии Алгоритм 2 требует не больше шагов итераций, чем Алгоритм 1 практически для всех типов уравнений.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Таблица 3. Изменение средней погрешности наилучших частных описаний

№ уравнения	Средняя погрешность $\varepsilon_{\text{пр}}$ наилучших частных описаний (%)							
	Алгоритм 1				Алгоритм 2			
	Шаг итерации				Шаг итерации			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	29,02	8,43	6,84	6,8	5,25	1,38	1,32	-
2	17,9	11,4	8,6	8,51	4,17	0,345	0,336	-
3	14,08	1,805	0,139	0,138	7,82	3,41	3,23	3,24
4	19,14	1,191	1,175	1,2	34,2	4,65	2,91	2,76
5	39,4	7,8	5,31	5,34	20,8	6,71	6,43	6,41
6	45,5	17,3	9,89	9,51	16,0	8,91	8,66	9,61

Кроме того следует отметить простоту получения результирующего уравнения регрессии, полученного по Алгоритму 2. Результирующее уравнение регрессии в Алгоритме 2 является произведением линейных частных описаний различных шагов итерации, тогда как для получения результирующего уравнения в Алгоритме 1 следует выполнять операцию поэтапной подстановки частных описаний предыдущих шагов итерации в последующие до тех пор, пока не получим зависимость выходной функции Y от входного вектора X .

Для примера покажем вид наилучшего решения при аппроксимации выходных значений Y исходного уравнения 1, вид которого наведен в табл.1.

В соответствии с данными табл. 2, результаты работы следующие:

- Алгоритм 1:
- погрешность $\varepsilon_{\text{пр}}=6,603\%$
- числа шагов итерации $r=3$;
- вид аналитических выражений (в наведенных выражениях результаты предыдущих шагов итераций обозначены новыми переменными)
- 3-й шаг итерации:
- $Y(z) = -0,0407+0,53z_4+0,481z_7-1,26z_4z_7+0,649z_4^2+0,616z_7^2$
- 2-й шаг итерации:
- $z_4(v) = 0,0349+0,938v_1+0,16v_6+0,283v_1v_6-0,077v_1^2-0,288v_6^2$
- $z_7(v) = -0,017+0,885v_2+0,558v_6+0,298v_2v_6-0,168v_2^2-0,175v_6^2$
- 1-й шаг итерации:
- $v_1(x) = 1,19-1,79x_1+0,57x_2+0,014x_1x_2+0,242x_1^2+0,024x_2^2$
- $v_2(x) = 2,91-2,79x_1-0,92x_3+0,78x_1x_3+0,369x_1^2-0,09x_3^2$
- $v_6(x) = -0,98+0,69x_2-0,08x_4-0,573x_2x_4+0,38x_2^2+0,34x_4^2$
- Алгоритм 2:

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- погрешность $\varepsilon_{\text{пр}}=1,34\%$
- числа шагов итерации $r=2$;
- вид аналитических выражений
- 1-й шаг итерации:
 $Y(x) = 0,49 - 1,24x_1 + 0,67x_2 - 0,19x_3 + 0,23x_4 + 0,33x_5$
- 2-й шаг итерации:
 $Y(x) = 1,12 - 0,01x_1 - 0,25x_3 - 0,04x_4 + 0,11x_5$.

5.ВЫВОДЫ

В работе проанализированы достоинства, недостатки и области применения известных алгоритмов МГУА. Показано, что увеличение размерности модели в результате итерационной процедуры автоматически приводит к соответствующему увеличению степени результирующего полинома. Разработан метод самоорганизации для синтеза мультипликативной модели с линейными частными описаниями, в котором число факторов не зависит от шага итерации и может быть максимальным уже на первом шаге, а степень результирующего уравнения регрессии увеличивалась минимальным образом (на единицу) при переходе к следующему шагу итерации. Это отличительное свойство метода невозможно реализовать известными алгоритмами МГУА, оно определяет область эффективного использования метода для построения регрессионных нелинейных многофакторных моделей многомерных объектов невысокого порядка. Формализованы этапы преобразования информации при синтезе мультипликативной модели и разработаны вычислительные процедуры реализации отмеченных этапов.

Рассмотрены особенности итерационной процедуры синтеза мультипликативной модели и впервые получены аналитические выражение для расчета коэффициентов линейных полиномов текущего шага итерации по МНК с учетом отмеченных особенностей.

Выполнена программная реализация метода с помощью пакета MATLAB и проверка разработанной программы на тестовых примерах, которая подтвердила ее работоспособность, определила эффективность и область применения. Перспективой дальнейшей работы является разработка полноценного программного продукта и обработка реальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Радченко С. Г. Методология регрессионного анализа: Монография / С. Г. Радченко – К.: «Корнийчук», 2011 – 376 с.
- [2] Светушков С. Г. Построение многофакторных моделей в условиях мультиколлинеарности [Электронный ресурс] / С. Г. Светушков. – URL: <http://sergey.svetunkov.ru/science/multicolinear.phtml>.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[3] Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко – К: Наукова думка, 1981 – 296 с.

[4] Ivakhnenko A. G. Parametric and nonparametric selection procedures. *Experimental Systems Analysis* / A. G. Ivakhnenko, J. A. Müller // *Systems Analysis, Modelling and Simulation (SAMS)* – 1992 – Vol. 9 – P. 157-175.

[5] Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview / J. Schmidhuber // *Neural Networks*. – 2015. – Vol. 61 – P. 85–117.

[6] Lytvynenko V. Hybrid Methods of GMDH-Neural Networks Synthesis and Training for Solving Problems of Time Series Forecasting/ V. Lytvynenko, W. Wojcik, A. Fefelov, and etc. // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, – 2020 – Vol. 1020 – P. 513-531.

[7] Onwubolu, G. Hybrid self-organizing modeling systems / G. Onwubolu – Springer, Ontario – 2009 – Vol. 211 – 231p.

[8] Srinivasan D. Energy demand prediction using GMDH networks / D. Srinivasan // *Neurocomputing* – 2008 – Vol.72 – P. 625–629.

[9] Teng G. Use of Group Method of Data Handling for Transport Energy Demand Modeling / G. Teng, J. Xiao, Y. He, T. Zheng, & C. He // *Energy Science and Engineering* – 2017 – Vol. 5 – P. 302–317.

[10] Takao S. Deep feedback GMDH-type neural network and its application to medical image analysis of MRI brain images / S. Takao, S. Kondo, J. Ueno, T. Kondo // *Artificial Life and Robotics* – 2017 – № 23 (2) – P. 161–172.

[11] Zosimov V. V. Calculation the Measure of Expert Opinions Consistency Based on Social Profile Using Inductive Algorithms / V. V. Zosimov, O. S. Bulgakova // *ISDMCI 2019* – P. 622-636.

[12] Zosimov V. V. Inductive Building of Search Results Ranking Models to Enhance the Relevance of Text Information Retrieval / V. V. Zosimov, V.S. Stepashko, O. S. Bulgakova // *DEXA Workshops 2015* – P. 291-295.

[13] Стрижов В.В. Методы выбора регрессионных моделей / В. В. Стрижов, Е. А. Крымова – М.: ВЦ РАН, 2010 – 60 с.

[14] Hiassat M. Using Genetic Programming to Improve the Group Method of Data Handling in Time Series Prediction / M. Hiassat, M. F. Abbod, and N. Mort // *Hamparsum Bozdogan (ed.) Statistical Data Mining and Knowledge Discovery – Chapman&Hall CRC*, 2004 – P. 282-293.

[15] Файнзильберг Л. С. Об алгоритмах самоорганизации в задаче синтеза информационных технологий обработки сигналов / Л. С. Файнзильберг – *Управляющие системы и машины* – 2003 – № 2 – С. 112-118.

[16] Степашко В. С. Обобщенный итерационный алгоритм метода группового учета аргументов / В. С. Степашко, А. С. Булгакова // *Управляющие системы и машины* – 2013 – № 2 – С. 5-17.

[17] Дьяконов В. П. MATLAB. Полный Самоучитель / В. П. Дьяконов – М.: «ДМК-Пресс», 2012 – 768 с.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

SELF-ORGANIZATION OF MULTIPLICATIVE MODEL WITH LINEAR PARTIAL DESCRIPTIONS

Dr.Sci. Povoroznyuk A., Ph.D. Povoroznyuk O.

Abstract. The paper considers the group method of data handling (GMDH), which is effectively used to build regression models of multidimensional objects based on a limited sample of data. Inductive algorithms of GMDH use an iterative procedure for self-organization of mathematical models, in which an object is described by a set of partial descriptions (regression from 1 to 2 arguments of degree not higher than 2), selective selection of the best models and recursive complication of the model at each iteration step. The advantages, disadvantages and areas of application of the well-known GMDH algorithms are analyzed. It is shown that an increase in the model dimension as a result of an iterative procedure automatically leads to a corresponding increase in the degree of the resulting polynomial; therefore, the use of well-known self-organization algorithms for constructing nonlinear models of multidimensional objects of low-degree is not very effective. A self-organization method for synthesizing a multiplicative model with linear partial descriptions has been developed. This method is devoid of the noted disadvantage: the degree of the resulting regression equation increases in a minimal way (by one) when passing to the next iteration step, and the model dimension (number of factors) can be maximum already at the first step. The effectiveness of the method has been checked on test examples.

Keywords: Regression, GMDH method, Self-organization, Partial description, Iteration, Multiplicative model, Testing.

САМООРГАНІЗАЦІЯ МУЛЬТИПЛІКАТИВНИЙ МОДЕЛІ З ЛІНІЙНИМИ ЧАСТНИМИ ОПИСАМИ

Д.т.н. Поворознюк А.І., к.т.н. Поворознюк О.А.

Анотація. В роботі розглядається метод групового урахування аргументів (МГУА), який ефективно використовуються для побудови регресійних моделей багатовимірних об'єктів по обмеженій вибірці даних. Індуктивні алгоритми МГУА використовують ітераційну процедуру самоорганізації математичних моделей, при якій об'єкт описується безліччю приватних описів (регресія від 1 - 2-х аргументів ступеня не вище 2), селективний відбір кращих моделей і рекурсивне ускладнення моделі на кожному кроці ітерації. Проаналізовано переваги, недоліки і області застосування відомих алгоритмів МГУА. Показано, що збільшення розмірності моделі в результаті ітераційної процедури автоматично призводить до відповідного збільшення ступеня результуючого полінома, тому застосування відомих алгоритмів самоорганізації для побудови нелінійних моделей багатовимірних об'єктів невисокого ступеня мало ефективно. Розроблено метод самоорганізації для синтезу мультиплікативної моделі з лінійними приватними описами, який позбавлений зазначеного недоліку: ступінь результуючого рівняння регресії збільшується мінімальним чином (на одиницю) при переході на наступний крок ітерації, а розмірність моделі (число факторів) може бути максимальним вже на першому кроці. Перевірено ефективність методу на тестових прикладах.

Ключові слова: Регресія, Метод МГУА, Самоорганізація, Приватне опис, Ітерація, Мультиплікативна модель, Тестування.

УДК 004.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В
ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОЛОГИЧЕСКОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Д.т.н. Филатова А.Е., Фахс М.

Аннотация. В работе рассматривается оценка эффективности принятия решений в процессе электрокардиологического исследования без использования и с использованием кардиологических систем поддержки принятия решений. Для оценки эффективности используются полученные аналитические выражения вероятностно-временных характеристик разработанной структурной модели процесса электрокардиологического исследования. Анализ временных характеристик модели выполнен при различных начальных условиях для трех разных типов электрокардиологического исследования: исследование проводится впервые; исследование проводится повторно в результате скрининга; исследование проводится повторно после лечения. В работе показано, что использование кардиологических систем поддержки принятия решений, основанных на разработанных методах морфологического анализа биомедицинских сигналов с локально сосредоточенными признаками, сократило среднее время, необходимое для электрокардиологического исследования каждого из рассматриваемых типов.

Ключевые слова: электрокардиологическое исследование; кардиологические системы поддержки принятия решений; вероятностно-временные характеристики; морфологический анализ; биомедицинские сигналы с локально сосредоточенными признаками.

1. ВВЕДЕНИЕ И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

Процесс электрокардиологического (ЭКГ) исследования основан на морфологическом анализе биомедицинских сигналов (БМС) с локально сосредоточенными признаками (ЛСП), связанных с циклической работой сердца и сердечно-сосудистой системы [1]. Для автоматизации процесса сбора и обработки такой информации служат различные медицинские информационные системы (МИС), в том числе и кардиологические системы поддержки принятия решений (СППР) [2-4]. Разработанная авторами структурная модель процесса ЭКГ исследования в виде вероятностно-временного графа позволила получить аналитические выражения для анализа рассматриваемого процесса при заданных начальных условиях (исследование проводится впервые, повторно в результате скрининга или после лечения), а также определить критерии эффективности проведения ЭКГ исследования [0].

Обзор литературных источников показал, что чаще всего внимание уделяется анализу отдельных этапов процесса ЭКГ исследования, среди которых можно выделить следующие: определение показаний для

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

обследования; регистрация и оцифровка БМС с ЛСП; предварительная обработка БМС с ЛСП; морфологический анализ БМС с ЛСП; определение диагностических показателей; диагностика и выдача диагностического заключения. От качества зарегистрированных БМС с ЛСП зависит дальнейшее качество и эффективность ЭКГ исследования. В результате предварительной обработки БМС с ЛСП чаще всего выполняется очистка сигналов от артефактов методами, основанными на использовании различного вида фильтров [6, 0] и вейвлет-преобразовании [0-0], компенсация дрейфа изонуглевой линии методами, основанными на интерполяции изоэлектрической линии ЭКГ [11,12]. Одним из сложных и ответственных этапов является этап морфологического анализа БМС с ЛСП, для которого используются различные методы: анализ БМС с ЛСП во временной области с применением современных методов классификации, таких как кластерный анализ и распознавание образов [0, 0], вероятностная классификация [0], нейронные сети [16**Error! Reference source not found.**], нечеткая кластеризация [0, 0]; анализ БМС с ЛСП в частотно-временной области, например, локальное (оконое) преобразование Фурье (спектрально-временное картирование) и вейвлет-преобразование [19,20], а также в фазовой плоскости [4]; морфологическая фильтрация БМС с ЛСП с помощью предложенного авторами многоканального согласованного морфологического фильтра [0]. На основе морфологического анализа БМС с ЛСП формируются диагностические признаки в виде параметров найденных структурных элементов [0, 0]. Таким образом, ошибки на этапе морфологического анализа БМС с ЛСП могут привести к выработке неправильных диагностических решений, поэтому качество проведения ЭКГ исследования напрямую зависит от качества выполнения морфологического анализа БМС с ЛСП. На каждом из перечисленных этапов с различной степенью эффективности используются различные МИС. Однако системный анализ эффективности принятия решений в процессе ЭКГ исследования без использования и с использованием кардиологических СППР не встречается в литературных источниках.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является анализ эффективности принятия решений в процессе ЭКГ исследования без использования и с использованием кардиологических СППР, основанных на морфологическом анализе БМС с ЛСП. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: проанализировать среднее время прохождения исследования при различных начальных условиях; оценить эффективность ЭКГ исследования без использования и с использованием кардиологических СППР.

3. СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ЭКГ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим разработанную в [0] структурную модель процесса ЭКГ исследования, изображенную на рис. 1. В структурной модели M_S отсутствует состояние, связанное с непосредственной регистрацией ЭКГ сигнала, т.к. время регистрации сигнала строго регламентируется протоколом вида ЭКГ исследования и может быть оптимизировано, при этом длительность процесса регистрации не влияет на эффективность ЭКГ исследования [0]. Для описания прохождения процесса ЭКГ исследования из начального состояния S_0 в конечное S_8 (или S_9) для вероятностно-временного графа определена функция дуги $f(p_{ij}, t_{ij}) = f_{ij}(z)$:

$$f_{ij}(z) = p_{ij} z^{t_{ij}}, \quad (6)$$

где p_{ij} – вероятность перехода из i -го в j -е состояние; t_{ij} – время перехода из i -го в j -е состояние; z – параметр функции дуги, степень которого характеризует время перехода из одного состояния в другое ($|z| \leq 1$).

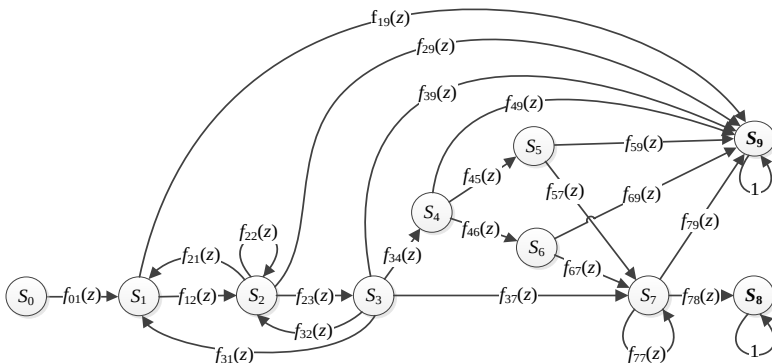


Рис. 1 - Структурная модель M_S ЭКГ исследования: S_0 – начало исследования; S_1 – определены показания; S_2 – выполнен морфологический анализ БМС с ЛСП; S_3 – определены патологические изменения; S_4 – выполнено сравнение с предыдущими ЭКГ исследованиями; S_5 – выполнена оценка динамики; S_6 – выполнена оценка эффективности лечения; S_7 – принято диагностическое решение; S_8 – выданы рекомендации (конец ЭКГ исследования); S_9 – множество состояний, не ведущих к цели (состояние неопределенности)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Производящая функция графа (рис. 1) имеет следующий вид:

$$F(z) = F_{08}(z) + F_{09}(z), \quad (7)$$

где

$$F_{08}(z) = \frac{p_{01}p_{12}p_{23}p_{78} \left(p_{34}z^{t_{34}} \left(p_{45}p_{57}z^{t_{45}+t_{57}} + p_{46}p_{67}z^{t_{46}+t_{67}} \right) + p_{37}z^{t_{37}} \right) z^{t_{01}+t_{12}+t_{23}+t_{78}}}{\left(1 - p_{77}z^{t_{77}} \right)} \Bigg/ \\ \Bigg/ \left(1 - p_{12} \left(p_{21} \left(1 + p_{23}p_{32}z^{t_{23}+t_{32}} \right) z^{t_{21}} + p_{23}p_{31}z^{t_{23}+t_{31}} \right) z^{t_{12}} - p_{23}p_{32}z^{t_{23}+t_{32}} - p_{22}z^{t_{22}} \right); \\ F_{09}(z) = p_{01} \left((1 - p_{12})z^{t_{19}} + p_{12} \left((1 - p_{21} - p_{22} - p_{23})z^{t_{29}} + \right. \right. \\ \left. \left. + p_{23} \left((1 - p_{31} - p_{32} - p_{34} - p_{37})z^{t_{39}} + p_{34} \left((1 - p_{45} - p_{46})z^{t_{49}} + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + p_{45} \left((1 - p_{57})z^{t_{59}} + p_{57} \left(1 - p_{77} - p_{78} \right) z^{t_{57}+t_{79}} \right) z^{t_{45}} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + p_{46} \left((1 - p_{67})z^{t_{69}} + p_{67} \left(1 - p_{77} - p_{78} \right) z^{t_{67}+t_{79}} \right) z^{t_{46}} \right) z^{t_{34}} + \right. \right. \\ \left. \left. \left. + p_{37} \left(1 - p_{77} - p_{78} \right) z^{t_{37}+t_{79}} \right) z^{t_{23}} \right) z^{t_{12}} \right) z^{t_{01}} / \left(1 - p_{77}z^{t_{77}} \right) \Bigg/ \\ \Bigg/ \left(1 - p_{12} \left(p_{21} \left(1 + p_{23}p_{32}z^{t_{23}+t_{32}} \right) z^{t_{21}} + p_{23}p_{31}z^{t_{23}+t_{31}} \right) z^{t_{12}} - p_{23}p_{32}z^{t_{23}+t_{32}} - p_{22}z^{t_{22}} \right).$$

С помощью производящей функции (2) были определены вероятность и среднее время проведения ЭКГ исследования по следующим выражениям:

$$P_{ECG} = F(z) \Big|_{z=1}; \quad T_{ECG} = \frac{dF(z)}{dz} \Big|_{z=1}.$$

Так как аналитические выражения для P_{ECG} и T_{ECG} слишком громоздкие, то авторами в [0] была разработана программа на языке Matlab, с помощью которой можно получить эти аналитические выражения, а также аналитическое выражение вероятности P_{ECG}^+ успешного проведения ЭКГ исследования. Кроме того в [0] были предложены следующий критерий эффективности процесса ЭКГ исследования по среднему времени прохождения исследования и вероятности успешного его завершения:

$$\begin{cases} T_{ECG} \rightarrow \min; \\ P_{ECG}^+ \rightarrow \max; \\ p_{34}p_{37} = 0; \\ p_{34} + p_{37} \in (0;1]; \\ p_{45}p_{46} = 0; \\ p_{45} + p_{46} \in (0;1]; \end{cases}$$

Воспользуемся полученными аналитическим выражениями, описывающими вероятностно-временные характеристики процесса ЭКГ исследования при заданных начальных условиях (наличие или

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

отсутствие предыдущих обследований и лечения), а также предложенным критерием эффективности для анализа как всего процесса, так и отдельных его этапов.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа вероятностно-временных характеристик процесса ЭКГ исследования необходимо задать начальные условия. Согласно структурной модели M_S ЭКГ исследования (рис. 1) существуют три альтернативных пути перехода из начального состояния S_0 в конечное S_8 (или S_9), которые соответствуют трем разным типам ЭКГ исследования [0]: исследование проводится впервые (тип 1); исследование проводится повторно в результате скрининга (тип 2); исследование проводится повторно после лечения (тип 3). Рассмотрим упрощенную модель M_S^{Simpl} для случая, когда

$$P_{29} = P_{39} = P_{49} = P_{59} = P_{69} = P_{79} = P_{21} = P_{31} = P_{77} = 0 \quad (8)$$

Так как все переходы из текущего состояния S_i образуют полную группу событий, то с учетом (4) и (5) можно записать следующие выражения:

$$P_{01} = P_{57} = P_{67} = P_{78} = 1; \quad (9)$$

$$P_{12} + P_{19} = 1; \quad (10)$$

$$P_{23} + P_{22} = 1; \quad (11)$$

$$P_{34} + P_{37} + P_{32} = 1; \quad (12)$$

$$P_{45} + P_{46} = 1. \quad (13)$$

Обозначим P_{ECG}^- – вероятность перехода в состояние неопределенности S_9 , тогда при любых допустимых значениях вероятностей в выражении (3) с учетом упрощения модели (4) имеем $P_{ECG}^- = p_{19}$, а значит $P_{ECG}^+ = 1 - p_{19}$. При этом среднее время прохождения обследования T_{simpl} будет зависеть не только от времени каждого этапа, но и от соответствующих вероятностей. Таким образом, с учетом выражений (4)-(8) имеем изображенную на рис. 2 упрощенную модель M_S^{Simpl} . Аналитическое выражение для среднего времени T_{simpl} ЭКГ исследования, рассчитанное по упрощенной модели, слишком громоздкое, но его легко получить с помощью приведенной в [0] программы, если с учетом (3) и (4) в конце сделать следующую подстановку:

$$T_{simpl} = \text{subs}(T, [p_{01}, p_{21}, p_{31}, p_{57}, p_{67}, p_{77}, p_{78}], \dots [1, 0, 0, 1, 1, 0, 1]);$$

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

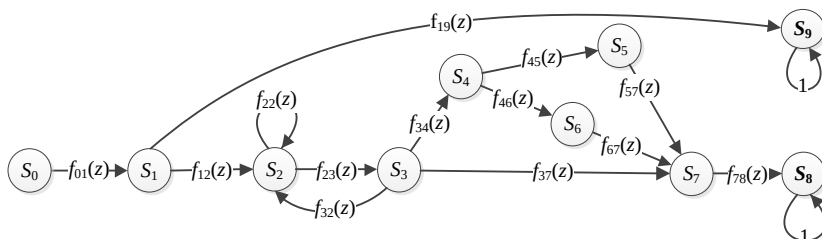


Рис. 2 - Упрощенная структурная модель M_S^{Simpl} ЭКГ исследования

Проанализируем среднее время проведения ЭКГ исследования с помощью модели M_S^{Simpl} отдельно для каждого из случаев при различных начальных условиях. При этом в каждом из случаев будем рассматривать среднее время выполнения каждого этапа для трех вариантов: с использованием кардиологической СППР, в которой внедрен разработанный авторами в [0] модуль морфологического анализа БМС с ЛСП (СППР1); с использованием кардиологической СППР, в которой морфологический анализ БМС с ЛСП выполняется в полуавтоматическом режиме (СППР2); без использования каких-либо МИС (без МИС).

4.1. Анализ вероятностно-временных характеристик модели типа 1

Если ЭКГ исследование проводится впервые, то $p_{34} = 0$, следовательно, согласно (7) $p_{37} = 1 - p_{32}$. Тогда аналитическое выражение для среднего времени T_1 ЭКГ исследования типа 1 можно получить, выполнив в конце программы [0] следующую подстановку:

$T1 = \text{simplify}(\text{subs}(T_{\text{simpl}}, p_{34}, 0));$

Рассмотрим зависимость $T_1(p_{23})$. Начальные условия среднего времени выполнения каждого этапа приведены в табл. 1 (отметим, что только время t_{12} отличается при проведении ЭКГ исследования с СППР1 и СППР 2).

Таблица 1. Среднее время выполнения каждого этапа модели типа1

Вариант ЭКГ исследования	Время (в минутах)							
	t_{01}	t_{12}	t_{23}	t_{37}	t_{78}	t_{22}	t_{32}	t_{19}
СППР1	7	2	2	2	2	$1.1t_{12}$	$1.2t_{37}$	$1.05(t_{12} + t_{23} + t_{37} + t_{78})$
СППР2	7	5	2	2	2			
Без МИС	12	7	3	7	7			

На рис. 3 изображены кривые изменения среднего времени $T_1(p_{23})$, а

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

в табл. 2 приведены минимальные и максимальные значения T_1 ЭКГ исследования типа 1 для трех вариантов при различных начальных значениях p_{19} и p_{32} .

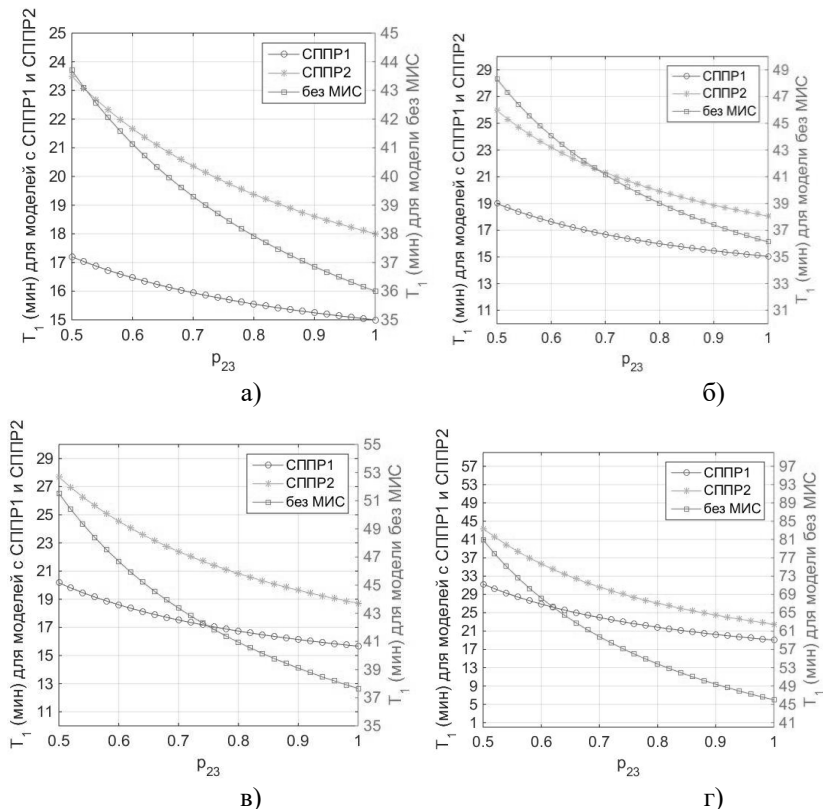


Рис. 3. Графики изменения среднего времени $T_1(p_{23})$ ЭКГ исследования:

а) $p_{19} = 0$ и $p_{32} = 0$ б) $p_{19} = 0.1$ и $p_{32} = 0$ в) $p_{19} = 0.1$ и $p_{32} = 0.1$ г) $p_{19} = 0.3$ и $p_{32} = 0.3$

Из анализа приведенных данных (рис. 3 и табл. 2) можно сделать следующие выводы: $\min T_1^{\text{СППР1}} < \min T_1^{\text{СППР2}}$, $\max T_1^{\text{СППР1}} < \max T_1^{\text{СППР2}} < \min T_1^{\text{без МИС}}$ для всех значений p_{19} и p_{32} ; $\max T_1^{\text{СППР1}} < \min T_1^{\text{СППР2}}$ для значений $p_{19} = 0$ и $p_{32} = 0$.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Таблица 2. Значения T_1 (в формате мм:сс)

Начальные условия	P_{ECG}^+	СППР1		СППР2		без МИС	
		$\min T_1$	$\max T_1$	$\min T_1$	$\max T_1$	$\min T_1$	$\max T_1$
$p_{19} = 0$ и $p_{32} = 0$	1	15:00	17:12	18:00	23:30	36:00	43:42
$p_{19} = 0.1$ и $p_{32} = 0$	0.9	15:03	19:00	18:03	25:57	36:07	48:18
$p_{19} = 0.1$ и $p_{32} = 0.1$	0.9	15:39	20:09	18:42	27:40	37:39	51:30
$p_{19} = 0.3$ и $p_{32} = 0.3$	0.7	19:02	31:15	22:29	43:24	45:58	80:53

4.2. Анализ вероятностно-временных характеристик модели типа 2

Если ЭКГ исследование проводится повторно в результате скрининга, то $p_{37} = 0$ и $p_{46} = 0$, следовательно, согласно (7) и (8) $p_{34} = 1 - p_{32}$ и $p_{45} = 1$. Тогда аналитическое выражение для среднего времени T_2 ЭКГ исследования типа 2 можно получить, выполнив в конце программы [0] следующую подстановку: $T2 = \text{simplify}(\text{subs}(\text{Tsimp1}, [p37, p45, p46], [0, 1, 0]))$; Рассмотрим зависимость $T_2(p_{23})$. Начальные условия среднего времени выполнения каждого этапа приведены в табл. 3. Как и в первом варианте только время t_{12} отличается при проведении ЭКГ исследования с СППР1 и СППР2. В табл. 4 приведены минимальные и максимальные значения T_2 , на рис. 4 изображены кривые изменения среднего времени $T_2(p_{23})$ ЭКГ исследования для трех вариантов при различных начальных значениях p_{19} и p_{32} .

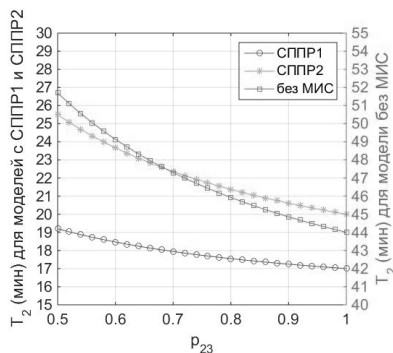
Таблица 3. Среднее время выполнения каждого этапа модели типа 2

Вариант ЭКГ исследования	Время (в минутах)									
	t_{01}	t_{12}	t_{23}	t_{34}	t_{45}	t_{57}	t_{78}	t_{22}	t_{32}	t_{19}
СППР1	7	2	2	2	1	1	2	1.1 t_{12}	1.2 t_{37}	1.05($t_{12} + t_{23} + t_{34} + t_{45} + t_{57} + t_{78}$)
СППР2	7	5	2	2	1	1	2			
Без МИС	12	7	3	10	3	2	7			

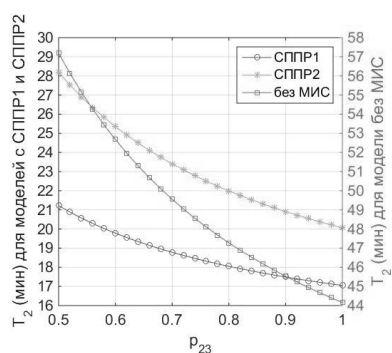
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Таблица 4. Значения T_2 (в формате мм:сс)

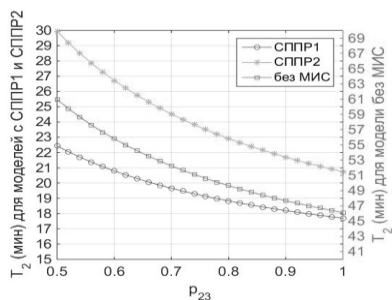
Начальные условия	P_{ECG}^+	СППР1		СППР2		без МИС	
		min T_2	max T_2	min T_2	max T_2	min T_2	max T_2
$p_{19} = 0$ и $p_{32} = 0$	1	17:00	19:12	20:00	25:30	44:00	51:42
$p_{19} = 0.1$ и $p_{32} = 0$	0.9	17:03	21:13	20:03	28:10	44:09	57:11
$p_{19} = 0.1$ и $p_{32} = 0.1$	0.9	17:41	22:25	20:44	29:56	46:07	60:57
$p_{19} = 0.3$ и $p_{32} = 0.3$	0.7	21:20	34:27	24:47	46:36	56:37	95:41



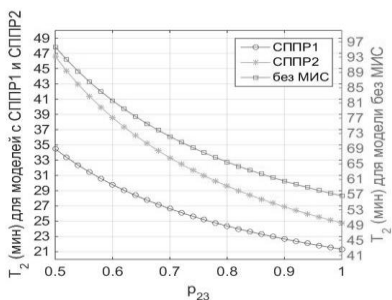
а)



б)



в)



г)

Рис. 4 - Графики изменения среднего времени $T_2(p_{23})$ ЭКГ исследования:

а) $p_{19}=0$ и $p_{32}=0$ б) $p_{19}=0.1$ и $p_{32}=0$ в) $p_{19}=0.1$ и $p_{32}=0.1$ г) $p_{19}=0.3$ и $p_{32}=0.3$

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Из анализа приведенных данных (рис. 4 и табл. 4) можно сделать следующие выводы: $\min T_2^{\text{СППР1}} < \min T_2^{\text{СППР2}}$, $\max T_2^{\text{СППР1}} < \max T_2^{\text{СППР2}} < \min T_2^{\text{без МИС}}$ для всех значений p_{19} и p_{32} ; $\max T_2^{\text{СППР1}} < \min T_2^{\text{СППР2}}$ для значений $p_{19} = 0$ и $p_{32} = 0$.

4.3. АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ ТИПА 3

Если ЭКГ исследование проводится повторно в после лечения, то $p_{37} = 0$ и $p_{45} = 0$, следовательно, согласно (7) и (8) $p_{34} = 1 - p_{32}$ и $p_{46} = 1$. Тогда аналитическое выражение для среднего времени T_3 ЭКГ исследования типа 3 можно получить, выполнив в конце программы [0] следующую подстановку:

$T3 = \text{simplify}(\text{subs}(T\text{simpl}, [p_{37}, p_{45}, p_{46}], [0, 0, 1]));$

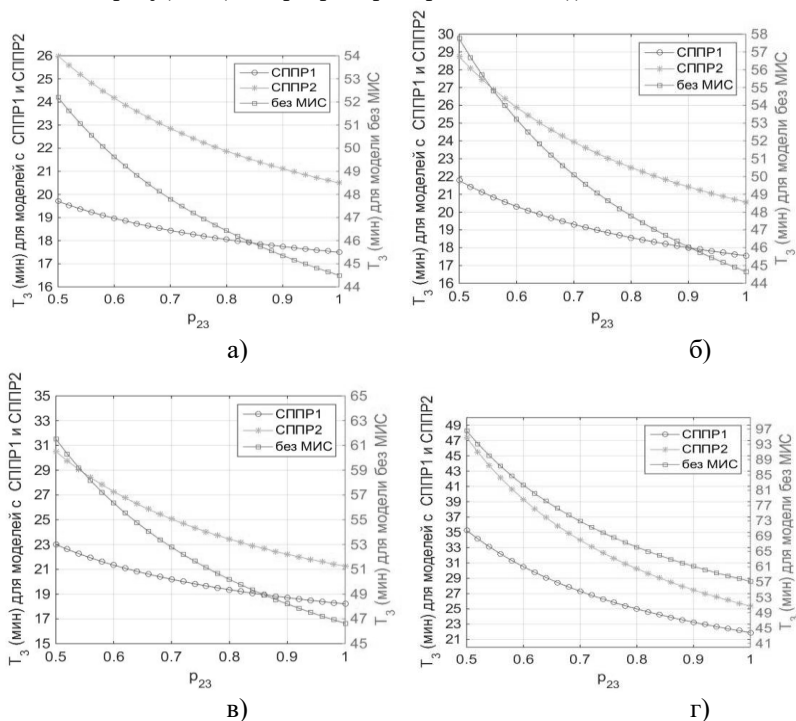


Рис. 5 - Графики изменения среднего времени $T_3(p_{23})$ ЭКГ исследования:

- а) $p_{19} = 0$ и $p_{32} = 0$ б) $p_{19} = 0.1$ и $p_{32} = 0$ в) $p_{19} = 0.1$ и $p_{32} = 0.1$ г) $p_{19} = 0.3$ и $p_{32} = 0.3$

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрим зависимость $T_3(p_{23})$. Начальные условия среднего времени выполнения каждого этапа приведены в табл. 5. Как и в первых двух вариантах только время t_{12} отличается при проведении ЭКГ исследования с СППР1 и СППР2. На рис. 5 изображены кривые изменения среднего времени $T_3(p_{23})$, а в табл. 6 приведены минимальные и максимальные значения T_3 ЭКГ исследования типа 1 для трех вариантов при различных начальных значениях p_{19} и p_{32} .

Таблица 5. Среднее время выполнения каждого этапа модели типа 3

Вариант ЭКГ исследования	Время (в минутах)									
	t_{01}	t_{12}	t_{23}	t_{34}	t_{46}	t_{67}	t_{78}	t_{22}	t_{32}	t_{19}
СППР1	7	2	2	2	1.5	1	2	1.1 t_{12}	1.1 t_{34}	1.05($t_{12} + t_{23} + t_{34} + t_{46} + t_{67} + t_{78}$)
СППР2	7	5	2	2	1.5	1	2			
Без МИС	12	7	3	10	3.5	2	7			

Из анализа приведенных данных (рис. 5 и табл. 6) можно сделать следующие выводы:

$$\min T_3^{\text{СППР1}} < \min T_3^{\text{СППР2}},$$

$$\max T_3^{\text{СППР1}} < \max T_3^{\text{СППР2}} < \min T_3^{\text{без МИС}} \quad \text{для всех значений } p_{19} \text{ и } p_{32};$$

$$\max T_3^{\text{СППР1}} < \min T_3^{\text{СППР2}} \quad \text{для значений } p_{19} = 0 \text{ и } p_{32} = 0.$$

Таблица 6. Значения T_3 (в формате мм:сс)

Начальные условия	P_{ECG}^+	СППР1		СППР2		без МИС	
		$\min T_3$	$\max T_3$	$\min T_3$	$\max T_3$	$\min T_3$	$\max T_3$
$p_{19} = 0$ и $p_{32} = 0$	1	17:30	19:42	20:30	26:00	44:30	52:12
$p_{19} = 0.1$ и $p_{32} = 0$	0.9	17:33	21:46	20:34	28:44	44:39	57:44
$p_{19} = 0.1$ и $p_{32} = 0.1$	0.9	18:12	22:59	21:15	30:30	46:38	61:31
$p_{19} = 0.3$ и $p_{32} = 0.3$	0.7	21:54	35:15	25:21	47:24	57:12	96:29

5. ВЫВОДЫ

В работе с помощью упрощенной структурной модели ЭКГ исследования получены аналитические выражения для расчета среднего времени выполнения данного процесса для трех разных типов исследования: исследование проводится впервые; исследование проводится повторно в результате скрининга; исследование проводится повторно после лечения. С помощью полученных аналитических выражений выполнен анализ временных характеристик ЭКГ исследования без использования и с использованием кардиологических СППР отдельно для каждого из рассматриваемых типов исследования. Приведенные выше данные показывают, что использование любой СППР существенно сокращает время на проведения ЭКГ исследования каждого из рассматриваемых типов, даже если сравнивать наихудший вариант проведения ЭКГ исследования с использованием любой СППР с наилучшим вариантом проведения ЭКГ исследования без использования каких-либо МИС. Дальнейшие исследования направлены на экспериментальную проверку эффективности ЭКГ исследования при различных начальных условиях с помощью полной структурной модели.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Файнзильберг Л.С. Обобщенный метод обработки циклических сигналов сложной формы в многомерном пространстве параметров / Л.С. Файнзильберг // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». – 2015. – № 2. – С. 58–71.
- [2] Тимчик С.В. Класифікація медичних інформаційних систем і технологій за інтегральним сукупним критерієм / С.В. Тимчик, С.М. Злепко, С.В. Костишин // Системи обробки інформації. – 2016. – Випуск 3 (140). – С. 194–198.
- [3] Доан Д.Х. Обзор подходов к проблеме принятия решений в медицинских информационных системах в условиях неопределенности / Д.Х. Доан, А.В. Крошилин, С.В. Крошила // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12 (часть 1). – С. 26–30.
- [4] Гусев А.В. Поддержка принятия врачебных решений в медицинских информационных системах медицинской организации / А.В. Гусев, Т.В. Зарубина // Врачи и информационные технологии. – 2017. – №2. – С. 60–72.
- [5] Filatova A.E. Application of probabilistic-time graphs for evaluating the effectiveness of the electrocardiological study process / A.E. Filatova, A.I. Povoroznyuk, M. Fahs // Scientific Journal Applied Aspects of Information Technology. – 2020. – Vol. 3 (1). – P. 405–417. doi:10.15276/aait.01.2020.3
- [6] Leski J.M. ECG baseline wander and powerline interference reduction using nonlinear filter bank, / J.M. Leski, N. Henzel //Signal Process. – 2004. – Vol. 35 (4). – P. 781–793.
- [7] Iravanian S. A novel algorithm for cardiac biosignal filtering based on filtered residue method / S. Iravanian, L. Tung // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 2002. –Vol. 49 (11). – P. 1310–1317. doi:10.1109/TBME.2002.804589
- [8] Ho C.Y.-F. Fuzzy multiwavelet denoising on ECG signal / C.Y.-F. Ho, B.W.-

K. Ling, T.P.-L. Wong, A.Y.-P. Chan, P.K.-S. Tam // *Electron. Lett.* – 2003. – Vol. 39 (16). – P. 1163–1164. doi:10.1049/el:20030757

[9] Ercelebi E. Electrocardiogram signals de-noising using lifting-based discrete wavelet transform / E. Ercelebi // *Comput. Biol. Med.* – 2004. – Vol. 34 (6). – P. 479–493. doi:10.1016/S0010-4825(03)00090-8

[10] Poornachandra S. Hyper-trim shrinkage for denoising of ECG signal / S. Poornachandra, N. Kumaravel // *Digital Signal Process.* – 2005. – Vol. 15 (3). – P. 317–327. doi:10.1016/j.dsp.2004.12.005

[11] Блинов П.А. Анализ методов компенсации дрейфа изолинии электрокардиосигнала / П.А. Блинов, А.А. Михеев // *Вестник РГРТУ.* – Рязань: РГРТУ, 2009. – № 4 (выпуск 30). – С. 94–97.

[12] Блинов П.А. Алгоритмы устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала на основе преобразования его спектра: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.11.17 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения» / П.А. Блинов. – Рязань, 2011. – 16 с.

[13] Abawajy J.H. Multistage approach for clustering and classification of ECG data / J.H. Abawajy, A.V. Kelarev, M. Chowdhury // *Computer Methods and Programs in Biomedicine.* – 2013. – Vol. 112 (3). – P. 720–730. doi:10.1016/j.cmpb.2013.08.002

[14] Pasollia E. Genetic algorithm-based method for mitigating label noise issue in ECG signal classification / E. Pasollia, F. Melgani // *Biomedical Signal Processing and Control.* – 2015. – Vol. 19. – P. 130–136. doi:10.1016/j.bspc.2014.10.013

[15] Ruvinskaya V.M. Models based on conformal predictors for diagnostic systems in medicine / V.M. Ruvinskaya, I. Shevchuk, N. Michaluk // *Applied Aspects of Information Technology.* – 2019ю – Vol. 2 (2). – P. 127–137. doi:10.15276/aait.02.2019.4

[16] Serbest K. Classification of cardiac arrhythmias with artificial neural networks according to gender differences / K. Serbest, M.R. Bozkurt, O. Eldoğan // *Journal of Engineering Science and Technology.* – 2015. – Vol. 10, № 9. – P. 1144–1149.

[17] Ceylana R. A novel approach for classification of ECG arrhythmias: Type-2 fuzzy clustering neural network / R. Ceylana, Y. Özbaya, B. Karlikb // *Expert Systems with Applications.* – 2009. – Vol. 36 (3). – P. 6721–6726. doi:10.1016/j.eswa.2008.08.028

[18] Doğan B. A new ECG beat clustering method based on kernelized fuzzy c-means and hybrid ant colony optimization for continuous domains / B. Doğan, M. Korürek // *Applied Soft Computing.* – 2012. – Vol. 12(11). – P. 3442–3451.

[19] Дубровин В.И. Автоматизированная система анализа и интерпретации ЭКГ / В.И. Дубровин, Ю.В. Твердохлеб, В.В. Харченко // *Радиоэлектроника, информатика, управління.* – № 1. – 2014. – С. 150–157.

[20] Коломейцева А.В. Применение вейвлет-преобразования и метода Прони для идентификации биогенных сигналов / А.В. Коломейцева, Г.В. Мишугова, А.П. Мул, Г.Ю. Рябых // *Вестник ДГТУ.* – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2010. – Т. 10, №4(47). – С. 455–465.

[21] Povoroznyuk A.I. Development of method of matched morphological filtering of biomedical signals and images / A.I. Povoroznyuk, A.E. Filatova, A.Yu. Zakovorotniy, Kh. Shehna // *Automatic Control and Computer Sciences.* – 2019. – Vol. 53 (3). – P. 253–262. doi:10.3103/S014641161903009X

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[22] Berkaya S.K. A survey on ECG analysis / S.K. Berkaya, A.K. Uysal, E.S. Gunal, S. Ergin, S. Gunal, M.B. Gulmezoglu// Biomedical Signal Processing and Control (2018), 43, pp 216–235. doi:10.1016/j.bspc.2018.03.003

[23] Lyon A. Computational techniques for ECG analysis and interpretation in light of their contribution to medical advances / A. Lyon, A. Mincholé, J.P. Martí nez, P. Laguna, B. Rodríguez // J. R. Soc. Interface. – 2018. – Vol. 15 (138): 20170821.

RESEARCH EFFICIENCY OF DECISION-MAKING DURING ELECTROCARDIOLOGICAL STUDY

Dr.Sci. Filatova A., Fahs M.

Abstract. Evaluation of the efficiency of decision making in the process of electrocardiological research without the use and with the use of cardiac decision support systems is considered in this work. To assess the effectiveness, analytical expressions of the probabilistic-time characteristics of the developed structural model of the electrocardiological study process are used. The analysis of the time characteristics of the model is carried out under different initial conditions for three different types of electrocardiological research: the study is conducted for the first time; the study is repeated as a result of screening; the study is repeated after treatment. The paper shows that the use of cardiological decision support systems based on the developed methods of morphological analysis of biomedical signals with locally concentrated features reduced the average time required for an electrocardiological study of each of the types under consideration.

Keywords: electrocardiological study; cardiological decision support system; probabilistic-time characteristic; biomedical signals with locally concentrated features.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ПРОЦЕСІ ЕЛЕКТРОКАРДІОЛОГІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Д.т.н. Філатова А.Є., Фахс М.

Анотація. В роботі розглядається оцінка ефективності прийняття рішень в процесі електрокардіологічного дослідження без використання і з використанням кардіологічних систем підтримки прийняття рішень. Для оцінки ефективності використовуються отримані аналітичні вирази ймовірно-часових характеристик розробленої структурної моделі процесу електрокардіологічного дослідження. Аналіз тимчасових характеристик моделі виконаний при різних початкових умовах для трьох різних типів електрокардіологічного дослідження: дослідження проводиться вперше; дослідження проводиться повторно в результаті скринінгу; дослідження проводиться повторно після лікування. В роботі показано, що використання кардіологічних систем підтримки прийняття рішень, заснованих на розроблених методах морфологічного аналізу біомедичних сигналів з локально зосередженими ознаками, скоротило середній час, необхідний для електрокардіологічного дослідження кожного з розглянутих типів.

Ключові слова: електрокардіологічний дослідження; кардіологічні системи підтримки прийняття рішень; ймовірно-часові характеристики; морфологічний аналіз; біомедичні сигнали з локально зосередженими ознаками.

УДК 004.315

**МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ FPGA
ПРОЕКТА ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

**Д.т.н. Дрозд А.В., к.т.н. Мартынюк А.Н., к.т.н. Зашелкин К.В,
Кузнецов Н.А., к.т.н. Дрозд Ю.В.**

Аннотация. FPGA проектирование с LUT-ориентированной архитектурой пользуется заслуженным признанием в области критических приложений, где решаются важные задачи по обеспечению функциональной безопасности объектов повышенного риска для предотвращения аварий. Эти задачи возлагаются на системы критического применения, которые являются развитием обычных компьютеров с разделением рабочего режима на нормальный и аварийный, а также повышенными требованиями к функциональной безопасности, обеспечиваемой на основе использования отказоустойчивых решений. В этих условиях, FPGA проектирование сталкивается с проблемой скрытых неисправностей, которые могут накапливаться в битах памяти LUT узлов в нормальном режиме и снижать отказоустойчивость FPGA проекта с началом наиболее ответственного аварийного режима. Эта проблема связана с ограниченной контролепригодностью FPGA проектов, которая проявляется в битах памяти, адресуемых только в аварийном режиме. Предлагается метод повышения контролепригодности FPGA проектов на основе версионной избыточности их программных кодов. Работа FPGA проектов организуется с периодичной сменой версий программного кода для адресации в нормальном режиме ко всем используемым битам памяти. Метод демонстрируется на примере FPGA проекта матричного умножителя, где определяет все версии программного кода и выбирает их минимальное количество для максимального повышения контролепригодности проекта.

Ключевые слова: система критического применения, нормальный и аварийный режимы, FPGA проект, LUT-ориентированная архитектура, проблема скрытых неисправностей, контролепригодность, биты памяти блоков LUT, версия программного кода.

1. ВВЕДЕНИЕ И ОБЗОР СВЯЗАННЫХ РАБОТ

FPGA проектирование является перспективным направлением в разработке цифровых компонентов компьютерных систем. В свою очередь, развитие самих компьютерных систем получает наивысший приоритет в домене критических приложений. Поэтому мы можем наблюдать приоритетное развитие систем критического применения на основе FPGA проектирования [1,2].

Системы критического применения играют важную роль в устойчивом развитии человечества, позволяя наращивать производительные мощности и ограждать от них окружающую среду, включая самого человека. Этот процесс основывается на балансе количественного и качественного роста объектов повышенного риска, с

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

одной стороны, и совершенствования технологий, имплементированных в информационные управляющие системы критического применения, на другой чаще весов. Объекты повышенного риска представлены электростанциями и энергосетями, скоростным наземным и воздушным транспортом с мощной поддерживающей инфраструктурой. Человечество не может отказаться от их развития и наращивает суммарную мощность этих объектов, а также сложность, которая ограничивает наблюдаемость и управляемость протекающих в них процессов. Системы критического применения нацелены на обеспечение функциональной безопасности в комплексе: и собственной, и объектов повышенного риска для упреждения аварий и снижения потерь в случае, если аварию не удастся предотвратить [3, 4]. Риск представляется произведением двух факторов: стоимостью последствий аварии и вероятностью, с которой она может произойти [5, 6]. Первый фактор постоянно растет вместе с мощностью объектов повышенного риска.

Сдерживание риска возможно только за счет второго фактора, снижение которого требует совершенствования систем критического применения. Функциональная безопасность, для которой одним из основных вызовов являются отказы, основывается на использовании отказоустойчивых решений, включая многоверсионные технологии. Они направлены на противодействие отказам по общей причине, в основе которой лежит копирование схемных и программных решений [7,8]. Следует отметить, что атрибуты наблюдаемости и управляемости важны не только для объекта повышенного риска, но и для функциональной безопасности системы управления, которая также может усложняться в процессе ее совершенствования. Эти атрибуты составляют основу тестопригодности и тестопригодного проектирования цифровых компонентов компьютерных систем [9,10]. Тестопригодность оценивает цифровую схему с позиции ее пригодности к тестированию, т.е. обнаружению неисправностей в паузах работы. Эта особенность характеризует тестопригодность как наиболее простую форму контролепригодности, которая полностью определяется структурой схемы, т.е. является структурной контролепригодностью.

В рабочем режиме контролепригодность схемы дополнительно зависит от входных данных, на которых схема функционирует, и потому становится также функциональной. Системы критического применения разделяют рабочий режим на нормальный и аварийный. Для современных систем, такое разделение приводит к различным входным данным в этих режимах и, как следствие, к различной функциональной контролепригодности. Это различие создает проблему скрытых неисправностей, которые могут накапливаться в нормальном режиме вследствие отсутствия входных данных, необходимых для их

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

проявления. Проблема начинается в аварийном режиме на новых входных данных, которые проявляют накопленные неисправности в количестве, превосходящем возможности отказоустойчивых схем [11]. Эта проблема порождает недоверие к отказоустойчивости компонентов, используемых в составе систем критического применения, и заставляет прибегать к применению опасных имитационных режимов, воссоздающих аварийные условия. Такое повышение контролепригодности осуществляется при отключенных аварийных защитах, что стало одной из причин Чернобыльской катастрофы. Опасность имитационных режимов также не раз была доказана их несанкционированным включением по вине человека или вследствие возникшей неисправности [12,13]. Безопасное решение проблемы скрытых неисправностей может быть получено с помощью ресурсного подхода, который изучает интеграцию моделей, методов и средств, составляющих информационные и материальные компьютерные ресурсы, в естественный мир [14-16]. Согласно этому подходу, ресурсы структурируются под особенности естественного мира и в наибольшей степени выделяют две такие особенности: параллелизм и размытость. Объективный процесс структурирования можно проследить в развитии форматов с плавающей точкой, которые преобразовали двоичный код в его представление с использованием двух компонентов: мантиссы и экспоненты в заданной по умолчанию системе счисления [17,18]. Мы можем увидеть этот процесс также на примере совершенствования персональных компьютеров. Они постоянно усиливали распараллеливание схемных решений в обработке приближенных данных и сделали скачок от нескольких конвейеров с плавающей точкой в Pentium процессорах к нескольким тысячам таких конвейеров, параллельно работающих в графическом процессоре [19].

Ресурсный подход выделяет в развитии ресурсов уровни репликации и диверсификации. На уровне репликации, интеграция ресурсов в естественный мир, происходит путем их копирования в условиях открытых для заполнения ресурсных ниш: рыночных, технологических, экологических и других. Этот процесс протекает без ограничений со стороны естественного мира. Стремление ресурсов к интеграции стимулирует повышение производительности в их копировании.

В естественном мире, подобное клонирование преследует цель выживания за счет большей рождаемости по сравнению со смертностью. Процесс копирования завершается, когда ресурсные ниши закрываются. Как правило, закрытие ресурсных ниш происходит на пике производительности. Клоны погибают. Их выживание возможно только за счет проявления особенностей, поднимающих их на следующий уровень в развитии ресурсов – диверсификацию. Интеграция на этом

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

уровне происходит в тесном контакте с естественным миром, который структурирует ресурсы под свои особенности. В этих условиях производительность уступает приоритет адекватности естественному миру, т.е. достоверности.

Развитие ресурсов в современном компьютерном мире в большей степени соответствует уровню репликации и отражает недостатки этого нижнего уровня. Программные продукты копируются для создания новых программ. Такое копирование засоряет программные продукты избыточными данными и функциями, которые не нужны новому программному обеспечению. Однако этот процесс репликации продолжается в условиях открытых ресурсных ниш производительности и объема памяти современных компьютерных систем [20]. Аппаратное обеспечение также в основном находится на уровне репликации, который представлен матричными структурами. Арифметические блоки проектируются на основе конвейерной организации вычислений, которая относится к уровню диверсификации. Однако секции современных конвейеров содержат матричные структуры параллельных сдвигателей и сумматоров, матричных умножителей и делителей, которые выполняют арифметические операции с данными, представленными в параллельных кодах. Эти коды являются параллельными с позиции одновременной доступности всех их разрядов для обработки данных, которая в матричных структурах выполняется и параллельно, и последовательно. Матричный умножитель n -разрядных двоичных кодов выполняет операцию за один такт на матрице из n^2 операционных элементов, каждый из которых из-за последовательных соединений используется только на 1,6% и 0,8% времени для $n=32$ и $n=64$, соответственно [21]. Следующим недостатком матричных структур является большое энергопотребление. Статическая составляющая энергопотребления определяется большими размерами матриц. Динамическая составляющая зависит от количества переключений сигналов, основная часть которых относится к паразитным [22,23]. Основным недостатком матричных структур проявляется в системах критического применения и связан с проблемой скрытых неисправностей, которая присуща только этим системам. Обычные компьютеры свободны от такой проблемы, поскольку неисправность остается скрытой на протяжении всего рабочего режима. Ресурсный подход анализирует проблему скрытых неисправностей как проблему роста. В критических приложениях, системы поднимаются до уровня диверсификации в рабочем режиме, входных данных и контролепригодности схем. Компоненты систем отстают в развитии, поскольку проектируются с использованием матричных структур на уровне репликации [24,25].

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Таким образом, проблема скрытых неисправностей должна решаться как проблема роста совершенствованием компонентов их подтягиванием до уровня системы. Решение целесообразно искать при сохранении матричных структур, которые за несколько десятилетий доминирования подчинили себе ресурсы, включая FPGA проектирование [26,27]. Статья нацелена на развитие метода улучшения контролепригодности FPGA проектов с LUT-ориентированной архитектурой для устранения скрытых неисправностей на основе многоверсионного программирования готового проекта. Основы этого метода были рассмотрены в [28,29] для отдельного LUT узла. В предлагаемой статье раскрываются особенности метода в его применении к FPGA проекту в целом. Секция 2 описывает исходные положения метода и ограничения, вытекающие из его применения к готовому проекту. Секция 3 демонстрирует эти особенности применения метода на примере проекта матричного умножителя.

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА

Метод предлагает организовать работу FPGA проекта на нескольких версиях программного кода, которые меняются с заданной периодичностью, например, каждую неделю. Цель смены версий заключается в перемещении битов, адресуемых в памяти LUT узла только в аварийном режиме, на место битов, используемых в течение нормального режима. Такая организация работы может быть эффективна для компонентов с незначительно изменяющимися входными данными нормального режима и может служить альтернативой ручному регулированию, которое применяется на практике для таких компонентов, чтобы повысить их контролепригодность. Ручное регулирование выполняется для систем безопасности энергоблоков атомных электростанций не чаще одного раза за полгода. Недостатком ручного регулирования является изменение входных данных только в рамках значений, допустимых в нормальном режиме. Таким образом, неисправности, проявляющиеся только в аварийном режиме, не обнаруживаются, т.е. остаются скрытыми. Метод основывается на особенностях FPGA проектов с LUT-ориентированной архитектурой, которая обладает версионной избыточностью программного кода, т.е. готовый проект может быть запрограммирован с использованием различных версий программного кода. Все версии полностью сохраняют функциональность проекта и не вносят изменений в его аппаратную составляющую. LUT узел является генератором логической функции нескольких переменных, которые поступают на его входы. Для четырех переменных, LUT узел содержит 4 входа A, B, C и D. Описание функции заносится в память LUT узла в виде программного кода в процессе

программирования FPGA проекта [30,31]. Версионная избыточность программного кода присуща каждой паре LUT узлов, для которой выход первого узла является входом второго узла. Такая пара обеспечивает две версии программного кода без какого-либо влияния на другие LUT узлы FPGA проекта, если они не подключены к выходу первого LUT узла пары. Версии отличаются прямым или инверсным значением сигнала, который распространяется между LUT узлами пары. Инверсное значение сигнала обеспечивается инвертированием всех битов памяти первого LUT узла. Получаемая таким образом инверсия на входе второго узла компенсируется переменной мест битов в памяти второго LUT узла пары [32]. Исходными данными для этой операции являются номера битов памяти LUT узла и номера версий его программного кода. Для четырех переменных память LUT узла содержит программный код, составленный из шестнадцати битов, которые могут быть пронумерованы от 0 до 15. Все множество версий второго LUT узла пары определяется количеством используемых входов. Для четырех входов, подключенных к выходам первых LUT узлов, второй LUT узел пары может создать 16 версий, которые удобно пронумеровать шестнадцатеричными символами от 0_{16} до F_{16} . Двоичный код этих номеров, содержит 4 бита, которые принимают значения «0» и «1» для прямого и инверсного значения сигнала на входах A, B, C и D LUT узла, соответственно. Младший бит двоичного кода соответствует входу A. Версия 0_{16} является исходным программным кодом LUT узла. Версии 1_{16} , 2_{16} , 4_{16} и 8_{16} , описываются двоичными кодами 0001_2 , 0010_2 , 0100_2 и 1000_2 , которые указывают на инвертирование одного входа A, B, C или D, соответственно. Эти версии разбивают программный код на 2^{4-X} одинаковых непересекающихся фрагментов $1, \dots, 2^{4-X}$, состоящих из 2^X битов, где X принимает значения 0, 1, 2 и 3 для входов A, B, C и D, соответственно. Перемена мест битов выполняется переменной мест каждого нечетного фрагмента со следующим соседним фрагментом. Двоичные коды 0001_2 , 0010_2 , 0100_2 и 1000_2 являются базовыми для получения любого другого ненулевого кода того же размера с использованием операции логического сложения или сложения по модулю два. Операция перемены мест битов также может быть выполнена пошагово последовательностью таких операций по отдельным входам LUT узла. Очередность шагов не имеет значения.

Например, программный код $ABBA_{16} = 1010\ 1011\ 1011\ 1010_2$ исходной версии 0_{16} может быть преобразован к версии $B_{16} = 1011_2$ путем выполнения операций с последовательным использованием версий 1_{16} , 2_{16} и 8_{16} или 8_{16} , 2_{16} и 1_{16} . В первом случае, программный код будет разбит на отдельные биты – фрагменты и будет осуществлен переход на версию 1_{16} переменной мест соседних фрагментов

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

1 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 0₂;
0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1₂.

Версия 2₁₆ требует разбиения полученного программного кода на пары бит и перемены мест соседних пар

01 01 01 11 01 11 01 01₂;
01 01 11 01 11 01 01 01₂.

Версия 4₁₆ требует разбиения программного кода на фрагменты из восьми бит и перемены мест соседних фрагментов

01011101 11010101₂;
11010101 01011101₂.

Во втором случае, программный код проходит следующую последовательность преобразований

10101011 10111010₂;
10111010 10101011₂;
10 11 10 10 10 10 10 11₂;
11 10 10 10 10 10 11 10₂;
1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 0₂;
1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1₂.

В обоих случаях, результат получается одинаковым

1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1₂ = D55D₁₆.

В результате перестановки, биты 0, ..., 15 исходного программного кода поменялись местами со следующими битами: 11, 10, 9, 8, 15, 14, 13, 12, 3, 2, 1, 0, 7, 6, 5, 4. Исходными данными для метода являются данные, которые поступают на входы FPGA проекта в нормальном и аварийном режиме, а также описание цифровой схемы с указанием соединений LUT узлов и их программных кодов. Программная реализация метода выполняет моделирование работы цифровой схемы на входных данных обоих режимов и для каждого LUT узла определяет множество N_U бит памяти, используемых в нормальном режиме, и множество E_A бит, адресуемых только в аварийном режиме. Для каждого бита $Z \in E_A$, метод определяет множество V_Z всех возможных версий $V \in V_Z$ программного кода, обеспечивающих обмен местами с битами множества N_U . Из каждого непустого множества V_Z выбирается одна версия так, чтобы количество различных выбранных версий было минимальным. Полученное множество версий обеспечивает использование в нормальном режиме всех битов памяти LUT узла, адресуемых только в аварийном режиме, при условии непустых множеств V_Z . Пустое множество V_Z указывает на отсутствие версии, которая позволяет поменять местами бит $Z \in E_A$ с битом, адресуемым в нормальном режиме. Такие биты памяти LUT узла могут накапливать скрытые неисправности и представляют потенциальную угрозу функциональной безопасности FPGA проекта в аварийном режиме. Метод определяет все

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

такие биты и относит их ко множеству E_{N-R} . Предлагаемый метод ограничен в возможности повышать контролепригодность FPGA проекта и сокращать множество скрытых неисправностей наличием пустых множеств V_Z . Такие множества присущи LUT узлам, которые не являются вторыми узлами какой-либо пары и потому не могут создавать версии их программного кода. Количество версий может быть недостаточным также для вторых LUT узлов в случае подключения некоторых входов ко входам FPGA проекта. Метод определяет все биты, которые не имеют версий для перемещения во множество N_U . Вторые LUT узлы пары полностью обеспечены версиями программного кода, если все их используемые входы подключены к выходам первых LUT узлов. В случае неиспользуемых входов количество версий уменьшается вдвое для каждого такого входа. Но одновременно вдвое уменьшается используемая память LUT узла, которая обеспечивается полным набором возможных версий с полным устранением скрытых неисправностей.

Возможности метода могут быть расширены в случае, если входы FPGA проекта являются выходами LUT узлов других проектов, т.е. могут получать прямые и инверсные значения сигналов и таким путем создавать дополнительные версии программного кода.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА

Экспериментальная проверка метода была выполнена на примере улучшения контролепригодности FPGA проекта, реализующего матричный умножитель 4-разрядных двоичных кодов. Проектирование матричного умножителя осуществлялось с использованием САПР Quartus Prime 18.1 Lite Edition на микросхеме Intel Max 10 FPGA 10M50DAF672I7G [33,34]. Реализация матричного умножителя потребовала 30 LUT узлов, генерирующих функции четырех переменных. LUT узлы используют 111 входов, 67 из которых подключены ко входам FPGA проекта и снижают количество возможных версий программного кода. Только 2 LUT узла создают полное множество возможных версий. Программная реализация метода, выполненная на Delphi 10 Seattle demo version [35], упорядочивает список LUT узлов в направлении их соединения от входов к выходам FPGA проекта и последовательно выполняет функции LUT узлов в этом порядке на всех значениях входных слов, составленных из разрядов сомножителей. Моделирование выполняет 8 экспериментов для различных значений порога S , который разделяет входные слова на те, которые используются в нормальном и аварийном режиме. Сомножители, не превышающие порог, составляют входные слова, обрабатываемые в нормальном режиме. Множества N_U и E_A бит памяти, формируемые в процессе моделирования для каждого LUT узла, служат

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

для нахождения версий, повышающих контролепригодность FPGA проекта в соответствии с предложенным методом. Кроме того, метод определяет биты памяти, для которых невозможно создать версии, перемещающие их из множества E_A во множество N_U . Результаты моделирования FPGA проекта демонстрируются на основной панели программы (рис. 1). Основная панель содержит клавиши, которые показывают диапазон значений порога S от 2 до 9 и номер 11 LUT узла. Нажатие на эти клавиши позволяют менять значения порога и номер LUT узла с шагом 1 по кругу. Ниже панель показывает матрицы битов памяти и их значения для выбранного LUT узла 11 с указанием значения порога. Этот LUT узел не использует вход B и соответственно правую половину памяти. Вход A является входом схемы FPGA проекта и уменьшает количество возможных версий вдвое.

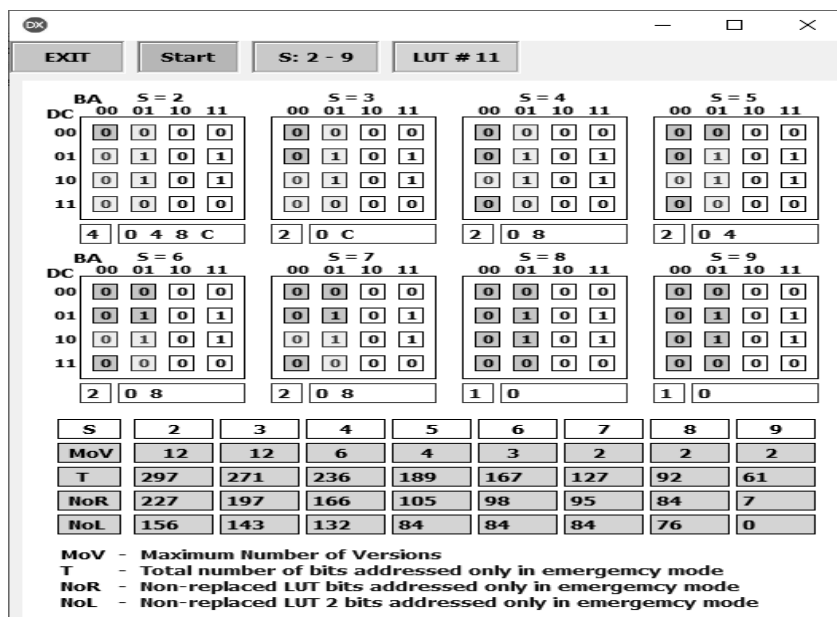


Рис. 1 - Основная панель программы

Входы С и D подключены к выходам предыдущих LUT узлов и позволяют создать 4 версии программного кода. Биты множеств N_U и E_A окрашиваются соответственно в синий и желтый цвет. Значения битов множества E_A показываются красным и синим цветом для случаев, когда существует или отсутствует версия для устранения скрытой неисправности. Ниже матрицы приводится количество используемых

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

версий и их множество, начиная с исходной версии 0_{16} . В случае порога $S = 2$ матрица содержит только один бит 0, используемый в нормальном режиме, и 3 бита 4, 8, 12, которые адресуются только в аварийном режиме. Они могут поменяться местами с битом 0 при помощи версий 4_{HEX} , 8_{HEX} , C_{HEX} для наблюдения в нормальном режиме. Биты 1, 5, 9, 13 следующего столбца матрицы относятся ко множеству E_{N-R} , поскольку они не обеспечены версиями для их перемещения в множество N_U . Повышение порога способствует увеличению множества бит N_U и уменьшению множества E_A . Для порога $S = 3$ и $S = 4$ количество дополнительных версий сокращается до одной C_{16} или 8_{16} . Биты 1, 5, 9, 13, по-прежнему, не имеют версий для наблюдения в нормальном режиме и принадлежат ко множеству E_{N-R} . Значения 5 – 7 порога S обеспечивают перемещение всех битов множества E_A в множество N_U с помощью одной дополнительной версии 4_{16} или 8_{16} . Порог $S = 8$ и $S = 9$ относит все биты памяти ко множеству N_U и не требует использования дополнительных версий программного кода. Ниже матриц памяти, основная панель показывает общие результаты проведенных экспериментов по итогам анализа всех LUT узлов для каждого значения порога S . Строка «MoV» показывает максимальное количество версий, используемых в LUT узлах всей схемы FPGA проекта. Строка «T» содержит общее количество бит E_A , которые могут накопить скрытые неисправности в исходном FPGA проекте. При повышении порога S это количество снижается с 297 до 61. Две последние строки «NoR» и «NoL» показывают общее количество битов E_{N-R} для всех LUT узлов и только для вторых LUT узлов пары. Эти показатели снижаются с 227 до 7 и с 156 до 0, соответственно. Улучшение контролепригодности FPGA проекта можно оценить отношением количества битов $\Delta T = T - \text{NoR}$, для которых устраняется опасность скрытых неисправностей, к общему количеству битов T , адресуемых только в аварийном режиме. Например, в случае $S = 2$, количество $\Delta T = 297 - 227 = 70$, а улучшение контролепригодности $70 / 297 = 24\%$. Для значений 2 – 7 порога S , метод повысил контролепригодность FPGA проекта в среднем на 27,5% от 13% ($S = 3$) до 44% ($S = 5$). В случае возможности инвертирования сигналов на входах FPGA проекта, все биты памяти LUT узлов обеспечиваются версиями для устранения скрытых неисправностей и контролепригодность достигает 100%.

4. ВЫВОДЫ

FPGA проектирование в домене критических применений сталкивается с проблемой скрытых неисправностей, которые могут накопиться в битах памяти LUT узлов на протяжении нормального режима и снизить отказоустойчивость FPGA проекта с LUT-

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ориентированной архитектурой и функциональную безопасность системы критического применения в наиболее ответственном аварийном режиме. Эта проблема показывает недостаточную функциональную контролепригодность FPGA проектов. Дефицит контролепригодности проявляется в LUT узлах, память которых содержит биты, ненаблюдаемые на протяжении нормального режима, поскольку они используются только в аварийном режиме. Отказоустойчивые FPGA компоненты систем критического применения становятся отказобезопасными только, если они являются контролепригодными. Трактовка проблемы скрытых неисправностей как проблемы роста открывает пути для ее решения повышением уровня FPGA компонентов в их контролепригодности до уровня диверсификации систем критического применения с использованием многоверсионных технологий. Предложенный метод использует версию избыточность программного кода, присущую FPGA проектам с LUT-ориентированной архитектурой, для повышения их контролепригодности путем организации работы на нескольких версиях программного кода. Все версии полностью сохраняют функциональность FPGA проекта и его аппаратную реализацию. Метод генерирует и выбирает версии, которые меняют местами биты, адресуемые только в аварийном режиме, с битами, наблюдаемыми на протяжении нормального режима. Метод позволяет полностью устранить неконтролепригодные биты в памяти всех LUT узлов FPGA проекта при подключении его входов к выходам LUT узлов предыдущих схем. Программная реализация метода была апробирована на FPGA проекте матричного умножителя. Результаты моделирования показали повышение контролепригодности FPGA проекта в среднем на 27,5%.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бахмач Е.С., Герасименко А.Д., Головир В.А. и др. Отказобезопасные информационно-управляющие системы на программируемой логике / ред. В.С. Харченко, В.В. Скляр. Харьков: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», Научно-производственное предприятие «Радий», 2008. 380 с.
- [2] Jung J., Ahmed I. Development of FPGA-based reactor trip functions using systems engineering approach. *Nuclear Engineering and Technology*. 2016. P. 2-11.
- [3] IEC 61508-1:2010. Functional Safety of Electrical / Electronic / Programmable Electronic Safety Related Systems – Part 1: General requirements. Geneva: IEC, 2010.
- [4] Smith D., Simpson K. The Safety Critical Systems Handbook, 5th Edition. Butterworth-Heinemann, 2019.
- [5] Choe S., Leite F. Assessing safety risk among different construction trades. Quantitative approach, *Journal of Construction Engineering and Management*. 2017. 143(5), 04016133.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- [6] Ivanchenko O., Kharchenko V., Moroz B. et. al. Risk Assessment of Critical Energy Infrastructure Considering Physical and Cyber Assets: Methodology and Models. [Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: Proc. of the 10th IEEE Int. Conf. Ukraine, Lviv, 2018. P. 225-228.
- [7] Rausand M. Risk Assessment. Common Cause Failures. NTNU, Trondheim, URL: <https://www.ntnu.edu/documents/624876/1277591044/ccf.pdf/f435f724-469d-4492-860a-66eca10e6bd2>
- [8] IEC 62340:2007. Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important to safety – Requirements for coping with common cause failure. Geneva: IEC, 2007
- [9] IEEE Std1500-2005 Standard Testability Method for Embedded Core-based IC, 2005. DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.
- [10] Romankevich V. Self-testing of multiprocessor systems with regular diagnostic connections. Automation and Remote Control. 2017. Vol. 78, No. 2. P. 289–299.
- [11] Drozd M., Drozd A. Safety-Related Instrumentation and Control Systems and a Problem of the Hidden Faults. Digital Technologies: Proc. of the 10th International Conf. Slovak Republic, Zhilina, 2014. P. 137–140. DOI: 10.1109/DT.2014.6868692.
- [12] Gillis D. The Apocalypses that Might Have Been, 2007. URL: <https://www.damninteresting.com/the-apocalypses-that-might-have-been>
- [13] Blakemore E. The Chernobyl disaster: What happened, and the long-term impacts, 2019. URL: <https://www.nationalgeographic.com/culture/topics/reference/chernobyl-disaster>
- [14] Drozd J., Drozd A. Models, Methods and Means as Resources for Solving Challenges in Co-Design and Testing of Computer Systems and their Components. Digital Technologies: Proc. of the 9th International Conference. Slovak Republic, Zhilina, 2013. P. 225-230. DOI: 10.1109/DT.2013.6566307
- [15] Зеленая ИТ-инженерия. В двух томах. Том 1. Принципы, модели, компоненты / ред. В.С. Харченко. Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2014. 594 с.
- [16] Drozd J., Drozd A., Antoshchuk S. Green IT engineering in the view of resource-based approach. Studies in Systems, Decision and Control: Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures. V. Kharchenko, Y. Kondratenko, J. Kacprzyk, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing, 2017. Vol. 74. P. 43-65. DOI: 10.1007/978-3-319-44162-7_3.
- [17] ANSI/IEEE Std 754-1985. IEEE Standard for Binary FloatingPoint Arithmetic, 1985.
- [18] IEEE Std 754™-2008 (Revision of IEEE Std 754-1985) IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. IEEE 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997, USA, 2008.
- [19] NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture. Programming Guide / Version 1.0, NVIDIA Corporation, 2007.
- [20] Hovorushchenko T, Pomorova O. Ontological approach to the assessment of information sufficiency for software quality determination. SEUR-WS. 2016. Vol. 1614. P. 332-348.
- [21] Drozd J., Drozd A., Antoshchuk S. et. al. Effectiveness of Matrix and Pipeline FPGA-Based Arithmetic Components of Safety-Related Systems. IDAACS: Proc. of the

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

8th IEEE International Conference. Poland, Warsaw, 2015. P. 785-789. DOI: 10.1109/IDAACS.2015.7341410

[22] Warren S., Anderson J. FPGA Glitch Power Analysis and Reduction. Low power electronics and design: Proc. of the International Symposium. Japan, Fukuoka, 2011. P. 27-32

[23] Vasantha K., Sharma M., Lal Kishore K. A Technique to Reduce Glitch Power during Physical Design Stage for Low Power and Less IR Drop. International Journal of Computer Applications. 2012. (0975 – 8887). Vol. 39, 18, P. 62-67.

[24] Drozd O., Kharchenko V., Rucinski A. et. al. Development of Models in Resilient Computing. Dependable Systems, Services and Technologies: Proc. of the 10th IEEE International Conference, UK Leeds, 2019. P. 2-7. DOI: 10.1109/DESSERT.2019.8770035.

[25] Neeraja B., Sai Prasad Goud R. Design of an area efficient Braun multiplier using high speed parallel prefix adder in cadence. Electrical, Computer and Communication Technologies: Proc. of the IEEE International Conference. India, Coimbatore, 2019.

[26] Amano H. Principles and Structures of FPGAs. USA, New-York: Springer, 2018.

[27] Vanderbauwhede W., Benkrid K. High-performance computing using FPGAs. USA, New-York: Springer, 2016.

[28] Drozd A., Antoshchuk S., Drozd J. et. al. Checkable FPGA Design: Energy Consumption, Throughput and Trustworthiness. Studies in Systems, Decision and Control: Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications. Switzerland, Cham: Springer International Publishing, 2019. Vol. 171. P. 73 – 94. DOI: 10.1007/978-3-030-00253-4_4.

[29] Drozd O., Kuznietsov M., Martynyuk O., Drozd M. A method of the hidden faults elimination in FPGA projects for the critical applications. DESSERT: Proc. of the 9th IEEE International Conference. Ukraine, Kyiv, 2018. P. 231-234. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409131

[30] Cyclone Architecture. Cyclone Device Handbook, Volume 1. Altera Corporation, 2008. URL: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyc/cyc_c51002.pdf

[31] Intel FPGA Architecture, 2019. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/wp/wp-01003.pdf>

[32] Drozd A., Drozd M., Kuznietsov M. Use of Natural LUT Redundancy to Improve Trustworthiness of FPGA Design. CEUR Workshop Proceedings. 2016. Vol. 1614. P. 322-331.

[33] Intel Quartus Prime Standard Edition User Guide. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/ug/ug-qps-getting-started.pdf>.

[34] Max.10 FPGA Device Architecture, 2017. URL: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hub/max-10/m10_architecture.pdf.

[35] Delphi 10 Seattle: Embarcadero. URL: <https://www.embarcadero.com/docs/datasheet.pdf>

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

A METHOD TO IMPROVE FPGA PROJECT CHECKABILITY FOR SAFETY-RELATED APPLICATIONS

Dr.Sci. Drozd O., Ph.D. Martynyuk O., Ph.D. Zashcholkin K.,
Kuznetsov M., Ph.D. Drozd J.

Abstract. FPGA-designing (Field Programmable Gate Array) with LUT-oriented (Look-Up Table) architecture enjoys well-deserved recognition in the field of safety-related applications, where important tasks are solved to ensure the functional safety of high-risk objects to prevent accidents. These tasks are assigned to safety-related systems, which are the development of ordinary computers with the division of operating mode into normal and emergency ones and increased requirements for functional safety provided through the use of fault-tolerant solutions. Under these conditions, FPGA designing encounters the problem of hidden faults that can accumulate in memory bits of LUT units in normal mode and reduce the fault tolerance of the FPGA project with the beginning of the most responsible emergency mode. This problem is due to the limited checkability of FPGA projects, which is due to memory bits addressed only in emergency mode. The method of improving the checkability of FPGA projects based on the version redundancy of their program codes is proposed. The work of FPGA projects is organized with a periodic change of program code versions for addressing in normal mode to all used memory bits. The method is shown in the example of the FPGA project designed for the iterative array multiplier, where it determines all versions of the program code and selects their minimum number to maximize the checkability of the project.

Keywords: safety-related system, normal and emergency modes, FPGA project, LUT-oriented architecture, problem of hidden faults, checkability, memory bits of LUT unit, program code version.

МЕТОД ПОКРАЩЕНИЯ КОНТРОЛЕПРИГОДНОГО FPGA ПРОЕКТУ ДЛЯ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Д.т.н. Дрозд А.В., к.т.н. Мартинюк О.М., к.т.н. Зашчелкин К.В.,
Кузнецов Н.А., к.т.н. Дрозд Ю.В.

Анотація. FPGA проектування з LUT-орієнтованою архітектурою користується заслуженим визнанням у області критичних додатків, де вирішуються важливі завдання щодо забезпечення функціональної безпеки об'єктів підвищеного ризику для запобігання аварій. Ці завдання покладаються на системи критичного застосування, які є розвитком звичайних комп'ютерів з поділом робочого режиму на нормальний і аварійний, а також підвищеними вимогами до функціональної безпеки, що забезпечується на основі використання стійких до відмов рішень. У цих умовах, FPGA проектування стикається з проблемою прихованих несправностей, які можуть накопичуватися в бітах пам'яті LUT вузлів в нормальному режимі і знижувати відмовостійкість FPGA проекту з початком найбільш відповідального аварійного режиму. Ця проблема пов'язана з обмеженою контролепригодного FPGA проектів, яка проявляється в бітах пам'яті, адресованих тільки в аварійному режимі. Пропонується метод підвищення контролепригодності FPGA проектів на основі версійності надмірності їх програмних кодів. Робота FPGA проектів організовується з періодичної зміною версій програмного коду для адресації в нормальному режимі до всіх використовуваних бітів пам'яті. Метод демонструється на прикладі FPGA проекту матричного помножувача, де визначає всі версії програмного коду і вибирає їх мінімальна кількість для максимального підвищення контролепригодності проекту.

Ключові слова: система критичного застосування, нормальний і аварійний режими, FPGA проект, LUT-орієнтована архітектура, проблема прихованих несправностей, контролепригодність, біти пам'яті блоків LUT, версія програмного коду.

УДК 004.9

**РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ
ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПІДБОРУ ПЕРСОНАЛУ**

К.т.н. Мельник К.В., к.т.н. Борисова Н.В.

Анотація. Розглянуто проблему пошуку потенційних кандидатів на вакантні місця для формування ІТ-команди. Описано роль HR-менеджера в процесі пошуку нових співробітників. Проведено огляд таких систем відстеження кандидатів (Applicant Tracking Systems), які найбільш використовуються великими компаніями в Україні та за кордоном. Формалізована задача автоматизації процесу підбору персоналу на вакантну посаду в ІТ-компанії. Проведено аналітичний огляд методів класифікації потенційних кандидатів. На основі отриманих результатів обрано Байєсовський підхід для вирішення поставленої задачі. Розроблено функціональну модель бізнес-процесу підбору персоналу. Наведено алгоритм розв'язання задачі класифікації ІТ-спеціалістів на вакантну посаду. Представлено специфікацію вимог для Applicant Tracking System у вигляді діаграми вимог з переліком функціональних та нефункціональних вимог. Обґрунтовано використання мікросервісної архітектури для побудови системи відстеження кандидатів та наведено діаграму розміщення.

Ключові слова: HR-менеджер, Applicant Tracking Systems, Байєсовський класифікатор, пошук потенційних кандидатів, підбір персоналу, ІТ-команда.

1. ВСТУП

Сучасний HR-менеджер виконує у компанії багато функцій, зокрема пошук та інтерв'ювання кандидатів, найм та адаптацію нових співробітників, оцінку персоналу, навчання та розвиток персоналу, розробку та корегування системи заробітної платні, бонусів та компенсацій, розвиток корпоративної культури, взаємозв'язок з керівництвом та співробітниками і т.д. Деякі з цих функцій можна автоматизувати, що дозволить HR-менеджеру більше часу витратити на інші види діяльності. Однією з таких функцій є пошук кандидатів на вакантні посади компанії. Для пошуку кандидатів HR-менеджер використовує ресурси мережі Інтернет. Причому інформацію про кандидатів можна знайти як на спеціалізованих професійних сайтах, порталах, форумах, сайтах працевлаштування (наприклад, work.ua, rabota.ua, jobs.ua, hh.ua, rabotaplus.ua), так і у соціальних мережах (LinkedIn, Facebook та ін.). Засоби пошуку та фільтрації даних, які надають ці Інтернет-ресурси, не завжди дають релевантний результат. Отже виникає необхідність у розробці спеціалізованих систем, здатних ефективно вирішувати задачу пошуку кандидатів. Такі системи називаються Applicant Tracking Systems (ATS) або системи відстеження кандидатів. І якщо на початку їх розробки їх основною задачею було

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

прискорення процесів пошуку та підбору персоналу на вакантні посади, зараз їх функціонал значно розширився та включає: автоматичне розміщення об'яв про вакансії як на спеціалізованих сайтах, так і на сайті компанії; формування кадрового резерву компанії; планування інтерв'ю з кандидатами та автоматична розсилка запрошень на нього; планування кар'єри, навчання та розвитку співробітників компанії; управління ефективністю, навичками та компетенціями співробітників компанії; підготовка різноманітних звітів та ін. На ринку програмних продуктів такі системи з'явилися на початку 90-х років XX століття. Зараз на ньому можна знайти велику кількість ATS, як платних, так і безкоштовних, розрахованих на великі корпорації та маленькі підприємства. Про затребуваність таких систем свідчить той факт, що компанії-лідери світової IT-індустрії, такі як SAP, Oracle, IBM, пропонують власні розробки у цій галузі. Розглянемо функціонал деяких ATS більш детально.

2.ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ATS

Розглянемо такі ATS, які є на сьогоднішній день найбільш використовуваними 500 найуспішнішими компаніями США за даними дослідження [1] за 2019 рік, а саме Workday, Oracle Taleo Cloud, SAP SuccessFactors, та українськими компаніями, зокрема CleverStaff, TalentScan, PeopleRecruit. Workday – хмарна платформа, що об'єднує бухгалтерський облік, управління персоналом та планування у єдиній ERP-системі [2]. Окрім базових функцій з рекрутмента та моніторингу процесу навчання нових співробітників, є сервіс Workday Insight Applications, що дозволяє проводити аналіз даних по компанії та вирішувати різні задачі: оцінювати ризики звільнення співробітників, підказувати, яким має бути наступний кар'єрний крок, проводити бенчмаркінг зарплатні та ін. ATS має дружній та інтуїтивно зрозумілий користувацький інтерфейс, отримати до неї доступ можна також з мобільних пристроїв. Компанія Oracle проголошує, що при розробці Oracle Taleo Cloud використано три основні принципи: орієнтація на користувача, мобільні рішення, використання data driven підходів [3]. Безкоштовної пробної версії Oracle Taleo Cloud немає. Цей продукт дозволяє автоматизувати процес підбору кандидатів відповідно до характеристик вакантної посади, у тому числі шляхом інтерв'ювання цих кандидатів безпосередньо в ATS; спілкування з кандидатами може здійснюватися як безпосередньо через ATS, так і у соцмережах LinkedIn та Facebook; є можливість масової розсилки листів потенційним кандидатам, планування інтерв'ю; створення детальної звітності та ін. В ATS SAP SuccessFactors реалізовано повний цикл управління співробітниками (end-to-end): кадрове адміністрування (модуль Employee

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

Central), підбір персоналу (модуль Recruiting), адаптація співробітників (модуль Onboarding), цілепокладання та оцінка ефективності (модуль Performance and Goals), навчання персоналу (модуль Learning), кар'єра та розвиток (модуль Succession & Development), аналітика та планування персоналу (модуль WFA/WFP). Модулі тісно інтегровані у межах комплексної системи, проте можуть використовуватися і окремо. ATS має сучасний інтуїтивно зрозумілий та простий користувацький інтерфейс. Розроблено мобільні застосунки для iOS та Android. ATS надає широкий вибір інструментів для створення детальної звітності та побудови діаграм, що дозволяє проводити автоматичний онлайн аналіз показників ефективності як на персональному рівні, так і всієї кадрової системи в масштабах організації [4]. CleverStaff вважається найпопулярнішою системою підбору персоналу серед рекрутерів України [5]. ATS може бути налаштована в залежності від сфери діяльності клієнта. Наприклад, для державних та фінансових установ пропонується серверна версія, підвищені вимоги до безпеки даних, необмежені оновлення, такі ж як для звичайної версії, стійкість до високих навантажень; для IT-компаній – автоматичний підбір кандидатів на вакантну посаду, як серед нових, так і серед раніше знайдених кандидатів, інтеграція з LinkedIn; для рекрутингових агенцій – трекінг кандидатів та клієнтів, клієнти можуть приймати участь у роботі, проте вони не матимуть доступу до конфіденційної інформації агенції, сумісна робота команди рекрутерів, воронки по вакансіям, аналітика; для компаній, що використовують масовий найм, – налаштування на будь-який тип вакансії, інтеграція з сайтами працевлаштування, аналітика за джерелами пошуку кандидатів. TalentScan – це SaaS платформа (Software as a Service)[6]. Пошукова консоль дозволяє здійснювати одночасний перехресний пошук кандидатів на таких ресурсах, як LinkedIn, GitHub, Stack Overflow, TurboHiring, Work.ua та ін., а також у внутрішній базі компанії, з автоматичним об'єднанням контактів та альтернативних e-mail по кожному кандидату. Для підбору кандидатів використовуються методи штучного інтелекту. ATS дозволяє реалізувати наступні функції: створення вакансій; надання візуальної статистики по кожній вакансії з аналізом пошукових каналів; розміщення об'яв про вакансії та реєстрація заявок кандидатів; збір інформації про кандидатів (CV та інші документи) та фіксація джерел взаємодії з ними; пошук кандидатів на основі переваг кандидатів та в актуальний для них час; збір статистики взаємодії з потенційними кандидатами; планування інтерв'ю та система нагадувань; автоматичне оновлення статусів, рейтингів технічних навичок у картках кандидатів; створення детальних звітів. Як зазначено на сайті [7], функціонал PeopleRecruit дозволяє організувати супровід кандидата на усіх етапах воронки підбору від додавання резюме в базу

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

до офера. ATS проста в освоєнні і в роботі. Вона дозволяє: розміщувати інформацію про вакансії; шукати кандидатів, збирати та редагувати інформацію про них, імпортувати і експортувати резюме і супровідні листи кандидатів; залучати до процесу інтерв'ювання необхідних співробітників компанії; обмежувати доступ до конфіденційної інформації кандидатів; планувати необхідні інтерв'ю; організувати персоналізовану розсилку листів кандидатам. Цікавою функцією є електронне підписання оферу, для чого використовується технологія PeopleSign eSignature. Як показав проведений аналіз, усі розглянуті ATS мають функціонал, який у той чи іншій мірі може задовольнити потреби HR-менеджера щодо автоматизації деяких його функцій. Проте лише одна з розглянутих систем може бути налаштована в залежності від сфери діяльності клієнта, у тому числі може бути використана для підбору персоналу в ІТ-компаніях, що має свою специфіку. Отже, **об'єктом дослідження** в даній роботі є процес підбору персоналу на вакантну посаду в ІТ-компанії.

Предметом дослідження є теоретико-методологічний інструмент оцінки резюме кандидатів відносно професіограми або профіля посади.

Отже, **метою даної роботи** є розробка ATS, що може бути використана для підвищення якості роботи HR-менеджера ІТ-компанії за рахунок вирішення задачі підбору персоналу на вакантну посаду в ІТ-компанії.

Постановка задачі

Задача автоматизації процесу підбору персоналу на вакантну посаду представляє з себе задачу класифікації, через те, що множина кандидатів на посаду після перевірки на відповідність їх резюме до професіограми ділиться на дві підмножини: ті, хто підходять до посади та ті, хто ні.

Якщо позначити через $H = \{h_1, \dots, h_n\}$ – це сукупність характеристик з резюме кандидата, а $V = \{v_1, \dots, v_m\}$ – це набір класів відповідності вакантній посаді, то задача підбору кандидатів на вакантну посаду полягає у знаходженні відображення, а саме $f: H \rightarrow V$ [8].

Для вирішення задачі підбору персоналу на вакантну посаду необхідно:

- розробити професіограми або профілі компетенцій для кожної вакантної посади, що включали б як вимоги до професійних знань, умінь та навичок кандидата, так і вимоги до особистих його якостей;

- обрати метод класифікації, що дозволить оцінити резюме щодо посади;

- визначити клас відповідності потенційного кандидата вакантній посаді.

3. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ПІДБОРУ ПЕРСОНАЛУ

Розглянемо найбільш вживані методи підбору персоналу з точки зору вирішення задачі класифікації резюме кандидата відносно профілю вакантної посади.

1. Експертні методи [9]. Основа цього підходу полягає в використанні досвіду HR-менеджера, тому що не існує одного оптимального методу відбору кандидатів на вакантні місця. HR-менеджер повинен не тільки просіяти сукупність резюме можливих кандидатів, а й провести попередні співбесіди та скласти особисте враження від кожного кандидата. Тому при прийнятті менеджерських рішень присутній людський фактор, бо необхідно не тільки обробити велику кількість інформації по вакантній посаді, щоб скласти професіограму, а й обрати достойного кандидата на подальші співбесіди для формування IT-команди.

2. Компараторна ідентифікація [10]. Вирішити задачу підбору персоналу можна за допомогою алгебри скінчених предикатів, а саме методу компараторної ідентифікації. Цей підхід дозволяє змоделювати міркування менеджера по персоналу на основі предиката впізнавання. В якості вхідних даних можна використовувати якісні, кількісні та категоріальні, що є безумовно перевагою цього методу. Недоліком цього підходу можна вважати процес попередньої обробки професіограм, бо експерту необхідно розписати всю сукупність можливих варіантів характеристик кандидата у вигляді системи предикатних рівнянь.

3. Метод аналізу ієрархій (MAI) [11, 12]. Суть MAI полягає в виборі кандидатів на вакантну посаду на основі парних порівнянь резюме. Метод парного порівняння – один із часто використовуваних інструментів для прийняття рішень через його простоту та ефективність. Він дозволяє описати якісні, кількісні та бінарні дані, порівняти їх між собою та обчислити кількісне значення відповідності резюме професіограмі. Для цього задача підбору персоналу декомпонується у вигляді графу з цілями задачі, критеріями та альтернативами вибору (резюме). Потім визначається відносна важливість кожного резюме за допомогою процедури парних порівнянь. На заключному етапі аналізу виконується лінійна згортка кількісних значень кожного критерія для кожного резюме. Обирається те резюме, у якого максимальне значення пріоритету. В якості недоліка є обмеження використання цього підходу, бо за один раз можна обробити до десяти резюме. Також складність полягає в виборі граничного значення, що дозволить відсіяти кандидатів з недостатніми знаннями.

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІОННИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

4. Кластерний аналіз [8, 13, 14]. Даний підхід поєднує велику кількість методів класифікації, що обчислюють схожість об'єктів. Для задачі підбору персоналу в якості порівнюваних об'єктів-кластерів виступають резюме та професіограма на вакантну посаду. Інформація в резюме та профілях вакантних посад може бути в якісній формі, кількісній, дихотомічній чи мати порядковий номер з запропонованої шкали. Тому для знаходження відповідності між даними кандидата та профілю посади необхідно використовувати метрику, яка може обробляти дані змішаного характеру: метрика Журавльова, коефіцієнт Гауєра, міра схожості Вороніна, метрика Міркіна. Основним недоліком цього підходу – є проблема вибору підходящої метрики. А перевагами цього підходу є можливість класифікувати багатовимірні спостереження та можливість роботи на невеликих об'ємах інформації.

5. Байєсовський підхід [15, 16]. Не зважаючи на простоту ідеї використання Байєсовського підходу для вирішення задачі класифікації резюме щодо відповідності вакантній посаді, можна отримати досить гарні результати класифікації при наявності достатньої статистичної інформації для навчання. Для кожної професіограми вакантної посади ІТ-компанії класифікатор навчається за рахунок використання статистичних даних, а вже потім його можна використовувати при оцінці резюме. Основними недоліками цього методу: наявність статистичної інформації та знань щодо зв'язку вхідних даних.

Аналітичний огляд методів вирішення задачі підбору персоналу на вакантну посаду показав, що для даної доменної області, а саме ІТ-компанії, в рамках даного дослідження було обрано Байєсовський класифікатор.

4. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Задача підбору персоналу на вакантну посаду в ІТ-компанії представляє з себе комплексну задачу, основною ціллю якої є підвищення якості процесу роботи HR-менеджеру. Розглянемо функціональну модель в нотації IDEF0 процесу просіювання потенційних кандидатів на вакантну посаду (рис. 1). Як видно з представленої моделі, існує три основних етапи підбору кандидатів.

Ціллю першого етапу є формування множини вимог, яка пред'являється до якісного і кількісного складу ІТ-команди. Специфікою роботи в ІТ-компанії є те, що майже кожен працівник повинен бути в складі певного ІТ-проекту. Тому процес формування вимог до кожного члена команди певного ІТ-проекту повинен враховувати методологію розробки програмного забезпечення. Останнім часом для розробки програмних продуктів все більше використовують Agile-методології, а саме Scrum [17]. Це модель гнучкого циклу розробки, що дозволяє

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

розробникам використовувати вже існуючі практики кодування, та дає клієнтові можливість робити зміни у вимогах в будь-який момент часу. Згідно методології Scrum, входними даними для списку вимог є не тільки устав та обсяг проекту (Project Scope), а й потреби клієнта (Product Owner) та існуючі умови роботи в ІТ-компанії. Таким чином, список вимог до ІТ-команди формує не тільки HR-відділ, а й Product Owner.

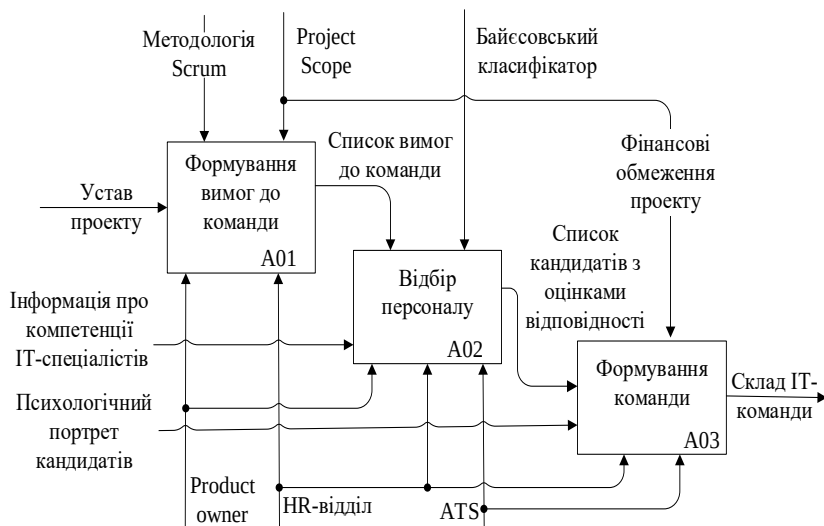


Рис. 1 – IDEF0-діаграма підбору персоналу для ІТ-команди

Другим етапом є процес відбору потенційного персоналу. HR-менеджер спочатку перевіряє резюме тих співробітників, які на даний час не відносяться до будь-якого проекту, за який ІТ-компанія отримує плату від клієнтів, тобто ці співробітники знаходяться в кадровому резерві.

Співробітники, які не включені до проектів від клієнтів, є витратною статтею, тому HR-відділу необхідно, перш за все, знайти підходящий ІТ-проект таким спеціалістам.

Якщо в кадровому резерві не знайшлося підходящої кандидатури, HR-менеджер шукає потенційних кандидатів на просторах глобальної мережі.

Для перевірки резюме можливих співробітників відповідності професіограмі вакантної посади використовується модель оцінки, що створена на основі використання Байєсовського класифікатора. В результаті цього етапу відбувається просювання потенційних кандидатів.

Етап формування команди включає перелік технічних співбесід, які

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

дозволять обрати кандидата на вакантну посаду для існуючого проекту, або скласти цілу команду для нового ІТ-проекту.

Розглянемо задачу відбору персоналу більш детально. Дана задача представляє собою задачу класифікації, де класами виступають дві групи кандидатів: потенційних кандидатів з резюме, що підходить на посаду, та тих, хто не відповідає вимогам до посади.

В якості алгоритму класифікації в роботі запропоновано використати байєсовський класифікатор. Введемо наступні позначення:

- I – множина показників, яка описує кандидата;
- $J_i, i \in I$ – множина значень i -го показника;
- K – множина кандидатів;
- f_{ij} – j -те значення i -го показника, $i \in I, j \in J_i$;
- f_{ij}^K – j -те значення i -го показника у k - кандидата, $j \in J_i, i \in I, k \in K$.

Кожного кандидата треба віднести певної групи відповідності, тому введемо позначення Q – вихідний клас, $Q = \{q_l\}$, $l = \overline{1, 2}$, де q_l – l -те значення класу Q .

Множину кандидатів розподіляють на дві множини, тому $K = \bigcup_{l=1}^2 K_l$, де K_l – множина кандидатів з l -го класу.

Введемо позначення для кількості появ тих чи інших значень показників: – x_{ij} – число появ j -го значення показника f_{ij} , при чому $x_{ij} = \sum_{k \in K} f_{ij}^K$; – y_l – число появ q_l - значення вихідного класу Q .

З урахуванням введених позначень загальний вигляд алгоритму використання Байєсовського класифікатора для визначення групи відповідності вакантній посаді представлений на рис.2. Алгоритм використання Байєсовського класифікатора для визначення групи відповідності складається з двох етапів: перший етап відповідає за навчання Байєсовського класифікатора, до цього процесу відносяться кроки 1 – 3 в описаному алгоритмі; другий етап, що складається з кроків 4 – 7, описує процес використання Байєсовського класифікатора, який підлягав навчанню за кроки 1 – 3.

Таким чином, математична модель вирішення задачі просіювання кандидатів на вакантну посаду представлена у вигляді діаграми діяльності. IDEF0-діаграма підбору персоналу для ІТ-команди демонструє всі основні задачі, які необхідно вирішувати за допомогою

використання ATS. Тому це є основою для специфікації вимог – Software Requirement Specification (SRS). SRS є детальним описом програмного продукту, який буде розроблятися в рамках ІТ-проекту у вигляді переліку функціональних та нефункціональних вимог.

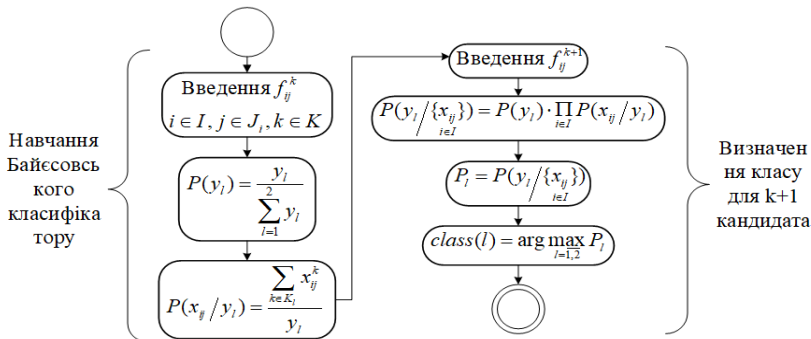


Рис. 2 – Діаграма діяльності для процесу підбору персоналу

Функціональні вимоги можна розділити на декілька видів: бізнес-вимоги, вимоги стейкхолдерів, функціональні вимоги та системні вимоги. Нефункціональні вимоги відображають бізнес правила, атрибути якості та обмеження. Набір вимог до ATS, що допомагає вирішити задачу підбору персоналу на вакантну посаду в ІТ-компанії, може бути показаний у вигляді діаграми вимог (рис. 3). Діаграма вимог дає наочне уявлення про те, як вимоги пов'язані між собою та іншими елементами моделі. Розглянемо представлені вимоги більш детально. Функціональні вимоги показують що саме буде робити система відстеження кандидатів, а нефункціональні вимоги визначають, як система повинна працювати. Перш за все, система повинна бути надійною та захищеною від сторонніх втручань, тому необхідно реалізувати авторизацію та розподіл доступу до даних в залежності від ролі користувача. HR-менеджер повинен мати змогу не тільки управляти акаунтами користувачів та базами з інформацією щодо співробітників та потенційних кандидатів, а й керувати профілями посади. В залежності від проекту, частина вимог до однієї й тієї ж посади змінюється, тому необхідно коректувати професіограми, згідно яких здійснюється пошук кандидатів. Окрім пошуку потенційних кандидатів, резюме яких підходить до вакантної посади, система повинна оцінювати множину знайдених резюме згідно розробленої моделі за допомогою Байєсовського класифікатора.

Таким чином, виходячи з опису вимог, можна сказати, що система відстеження кандидатів повинна вирішувати досить різноманітні задачі, що накладає на вибір архітектури та засобів програмування деякі обмеження.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

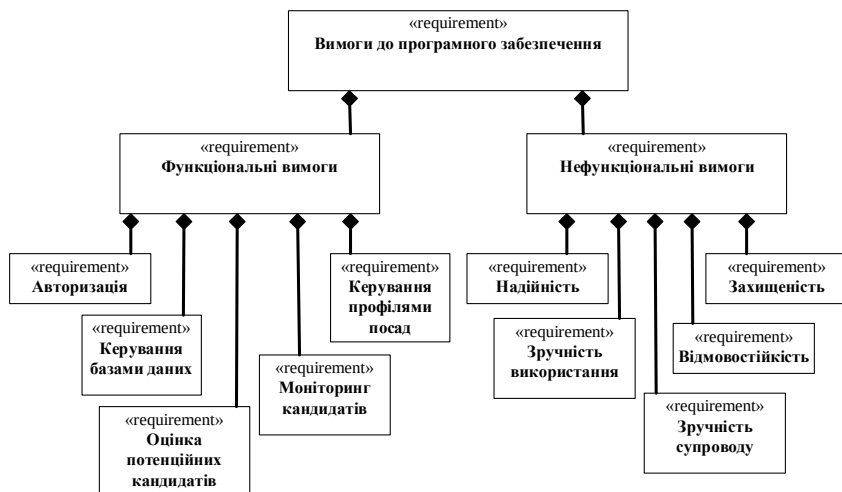


Рис.3 – Діаграма вимог для ATS

Виходячи з аналізу існуючих ATS та інформації, що представлена в специфікації вимог, можна зробити висновок, що в якості архітектури ATS доцільно використовувати компонентну архітектуру. Компонент – це одиниця програмного забезпечення, яка може бути незалежно замінена або оновлена. Останнім часом найчастіше використовують один з напрямків розвитку компонентного програмування – мікросервісну архітектуру [18]. Це підхід, при якому програмне забезпечення будується як набір невеликих, асинхронно взаємодіючих сервісів, кожен з яких реалізує одну із переліка задач, які сформульовано в аналітичному огляді предметної області та вирішено за допомогою розроблених моделей. Сервіси розгортаються незалежно з використанням повністю автоматизованого середовища. Вони можуть бути написані на різних мовах і використовувати різні технології зберігання даних. Зміна логіки одного модуля не має тенденцію впливати на код інших модулів, тобто перевагою цього підходу – є краще масштабування навантаження на окремі компоненти системи в порівнянні з монолітною архітектурою, а також можливість використання програмних технологій, найбільш придатних для реалізації поставлених завдань. На додаток до можливості незалежного розгортання і масштабування кожен сервіс також отримує чітку фізичну межу, яка дозволяє різним сервісам бути написаними на різних мовах програмування. Проаналізувавши особливості мікросервісної архітектури, запропоновано загальну архітектуру ATS (рис. 4).

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

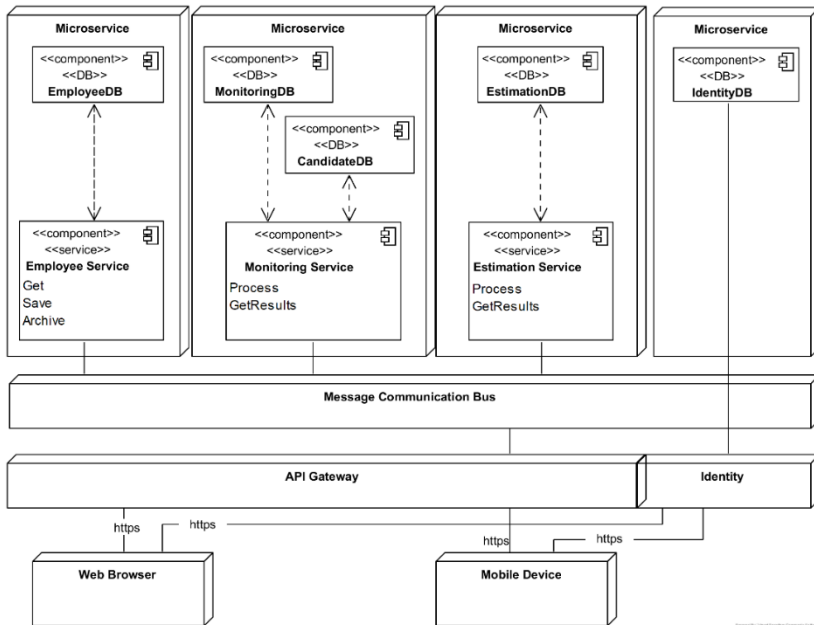


Рис. 4 – Архітектура ATS

Перелік мікросервісів та їх призначення для розробленої архітектури представлено таким чином:

1. EmployeeDB – база даних зі співробітниками в IT-компанії.
2. Employee Service – компонент, що реалізує роботу з інформацією щодо IT-фахівців.
3. MonitoringDB – база даних, що містить інформацію про результати моніторингу потенційних кандидатів на вакантні посади.
4. CandidateDB – база даних з інформацією щодо потенційних кандидатів.

5. Monitoring Service – компонент, який відповідає за логіку роботи MonitoringDB та CandidateDB.

6. EstimationDB – компонент «база даних», який містить усю необхідну інформацію для вирішення задачі оцінювання потенційних кандидатів на вакантні посади та результати використання цієї моделі.

7. Estimation Service – компонент, який відповідає за логіку роботи EstimationDB.

8. IdentifyDB – база даних, що містить аутентифікаційну інформацію щодо кожного користувача ATS. За виконання протоколів безпеки, аутентифікації, адміністрування та налаштування компонентів мережі відповідає рівень, на якому розташована система управління, тобто

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

обов'язки по авторизації повністю винесені в окремий додаток – мікросервіс, який використовується як для авторизації користувачів, так і для захищеного спілкування сервіс-сервіс всередині периметра. Дана система дозволяє управляти і взаємодіяти програмним і апаратним компонентам всієї архітектури.

Таким чином, рішення задачі пошуку і підбору потенційних кандидатів на вакантну посаду на основі концепції мікросервісної архітектури дозволить використовувати переваги розподіленої інфраструктури для збору, зберігання, обробки та використання інформації щодо персоналу, а також надасть ефективний інструмент для роботи HR-менеджеру, тим самим підвищуючи його якість роботи за рахунок зменшення часових витрат на рутинні функції менеджера відділу кадрів.

4.ВИСНОВКИ

У ході даного дослідження було запропоновано вирішення задачі підбору персоналу на вакантну посаду за рахунок використання системи відстеження кандидатів. Для цього було проведено аналітичний огляд існуючих Applicant Tracking Systems, який виявив обмеження використання подібних систем для ІТ-компаній. Розроблена функціональна модель дозволила формалізувати процес прийняття менеджерських рішень при вирішенні задачі підбору персоналу на вакантну посаду. Математична модель просіювання можливих кандидатів була розроблена за допомогою класифікатора Байєса та представлена у вигляді діаграми діяльності. На основі детального опису вимог до програмного продукту було обґрунтовано вибір мікросервісної архітектури для системи відстеження кандидатів та розроблена архітектура. Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні процесу пошуку потенційних кандидатів за допомогою запропонованої математичної моделі вирішення поставленої задачі, що дозволяє знизити часові витрати менеджера на просіювання доступних резюме. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в створенні методу розрахунку якості роботи HR-менеджеру при пошуку кандидатів на посади. Для чого необхідно розробити комплекс показників якості та способів їх обчислення, а також провести експериментальні дослідження запропонованого методу на практиці.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Qu L. 99% of Fortune 500 Companies use Applicant Tracking Systems (ATS) [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.jobscan.co/blog/99-percent-fortune-500-ats/>
- [2] Human Capital Management [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.workday.com/en-us/applications/human-capital-management.html>

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[3] Oracle Taleo Cloud—for Today, Tomorrow, and Beyond [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.oracle.com/applications/taleo.html#taleo-recruit-tab>

[4] SAP SuccessFactors [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.sap.com/products/human-resources-hcm.html>

[5] CleverStaff. Flexible recruitment software [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://cleverstaff.net/>

[6] Онлайн платформа для ефективного рекрутингу [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://talentscan.ua/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=cpc&utm_content=ats2adapt&gclid=Cj0KCQjw6PD3BRDPAIIsAN8pHuHsDNhV7rIOixcY2XfWpcadWzZ4KQZYTW_cFxbf3ttoOrNXGywIk7MaAqrvEALw_wcB#features

[7] Система підбору персоналу PeopleRecruit [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://peopleforce.io/uk/sistema-pidboru-personalu/>

[8] Melnyk K. V. Automation of employee evaluation in educational institution / K. V. Melnyk, V. I. Melnyk // XII міжнародна науково-практична конференція “Information technologies and automation – 2019. – Odessa, 2019. – P. 126-128.

[9] Бутусевич А. Підбираємо персонал: методи і типові помилки / А. Бутусевич // Консультант кадровика, № 23 (155), 2017. – С. 37-43. <https://kadrhelp.com.ua/pidbyrayemo-personal-metody-i-typovi-pomylyky>

[10] Шабанов-Кушнарченко Ю.П. Компараторная идентификация лингвистических объектов: монография / Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Н. В. Шаронова. – К.: ІСДО, 116 с (1993).

[11] Борисова Н. В. Технологія підбору команди іт-фахівців для виконання проекту / Борисова Н.В., Мельник К.В., Оліфенко І.В. // Тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2020). Черкаси, 21-23 травня 2020 року. – Черкаси: ЧДТУ, 2020. – С. 40-41.

[12] Thomas L. Saaty. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, ISBN 0-07-054371-2, McGraw-Hill. – 1980.

[13] Brian S. Everitt, Sabine Landau, and Daniel Stahl : Cluster Analysis. Wiley, 2011.

[14] Information system development for teaching staff performance evaluation [Текст] Інформаційні технології та автоматизація : глава моногр. / К. V. Melnyk, N. V. Borysova, V. I. Melnyk / под ред. С. В. Котлика. – Одеса : Астропринт, 2020. – С. 46-54.

[15] Golam, K., Sultana Sumi, R., Sadiq, R., Tesfamariam, S. : Performance evaluation of employees using Bayesian belief network model. International Journal of Management Science and Engineering Management, 13:2, P. 91-99, 2018. doi: 10.1080/17509653.2017.1312583

[16] Mauricio, A. Valle, Samuel, Varas, Gonzalo, A. Ruz : Job performance prediction in a call center using a naive Bayes classifier. Expert Systems with Applications, vol. 39, issue 11, pp. 9939-9945 (2012). doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.126>

[17] A Guide to the Scrum Body of knowledge (SBOK™ Guide) [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.scrumstudy.com/SBOK/SCRUMstudy-SBOK-Guide-2016.pdf>

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[18] Isiwele E. Microservices vs Monolithic Applications – Why You Should Consider Microservices [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.codementor.io/murphyisiwele/microservices-vs-monolithic-applications-why-you-should-consider-microservices-b2jdwgz2l>

INFORMATION SYSTEM DEVELOPMENT FOR SOLVING THE PROBLEM OF AUTOMATION OF THE PERSONNEL SELECTION PROCESS

Ph.D. Melnyk K., Ph.D. Borysova N.

Abstract The problem of recruitment for the formation of an IT-team is considered. The role of HR-manager in the process of searching the new employees is described. An overview of popular Applicant Tracking Systems has been done. They are used in large companies in Ukraine and abroad. The task of automating the process of personnel selection for a vacant position in an IT-company has been formalized. An analytical review of methods for classifying potential candidates was conducted. Based on the obtained results, the Bayesian approach was chosen to solve the problem. A functional model of the business process of personnel selection has been developed. An algorithm for solving the problem of classifying IT-specialists for a vacant position is presented. The Software Requirements Specification for the Applicant Tracking System is presented in the form of a requirements diagram with a list of functional and non-functional requirements. The use of microservice architecture for building a candidate tracking system is substantiated. The deployment diagram is given.

Keywords: HR-manager, Applicant Tracking Systems, Bayesian classifier, searching of potential candidates, recruitment, IT-team

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОДБОРА ПЕРСОНАЛА

К.т.н. Мельник К., к.т.н. Борисова Н.

Аннотация. Рассматривается проблема подбора персонала для формирования IT-команды. Описана роль HR-менеджера в процессе поиска новых сотрудников. Был сделан обзор популярных систем отслеживания кандидатов. Они используются в крупных компаниях Украины и за рубежом. Формализована задача автоматизации процесса подбора персонала на вакантную должность в IT-компаниях. Проведен аналитический обзор методов классификации потенциальных кандидатов. Исходя из полученных результатов, для решения поставленной задачи был выбран байесовский подход. Разработана функциональная модель бизнес-процесса подбора персонала. Представлен алгоритм решения задачи классификации IT-специалистов на вакантную должность. Спецификация требований к программному обеспечению для системы отслеживания заявителя представлена в виде диаграммы требований с перечнем функциональных и нефункциональных требований. Обосновано использование микросервисной архитектуры для построения системы отслеживания кандидатов. Приведена схема разветвления.

Ключевые слова: HR-менеджер, системы отслеживания кандидатов, Байесовский классификатор, поиск потенциальных кандидатов, рекрутинг, IT-команда

ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ

Д.т.н. Лисецкий Ю.М.

Аннотация. Приведены концепции хранения и управления данными: восстановления и архивирования данных; резервного копирования и аварийного восстановления данных; архивирования оригинальной информации; управления жизненным циклом информации. Представлена единая платформа для защиты, хранения всей информации организации CommVault Simpana, позволяющая организовать комплексный подход к управлению данными, что существенно повышает эффективность этого процесса. Рассмотрены системы хранения данными, основные задачи, которые они решают, сформулированы требования к системам хранения данных с учетом новых подходов в области их разработки. Проведен анализ программно-определяемых систем хранения данных, изложены требования к ним, показаны особенности, а также преимущества программно-определяемых систем хранения данных: абстрагирование от нижнего уровня аппаратной платформы, масштабируемость, упрощение инфраструктуры хранения и меньшие финансовые затраты на их построение.

Ключевые слова: концепция, данные, хранение и управление, архивирование, резервное копирование, системы хранения данных, программно-определяемые системы хранения данных.

1. ВВЕДЕНИЕ

Предприятия и организации различных отраслей экономики ежедневно занимаются решением множества задач по обработке и хранению растущих объемов данных, контролю доступа к ним, соблюдению нормативных требований поддержки бизнес-процессов и обеспечению их непрерывности [1]. При этом инфраструктура хранения данных должна давать возможность рационального использования ресурсов, быть гибкой и способствовать минимизации затрат на управление информацией. Учитывая, что в настоящее время данные являются одним из наиболее ценных активов любой организации, необходимо больше внимания уделять управлению этими данными. Поэтому задачи такого рода весьма актуальны и требуют качественно новых решений, ориентированных на комплексный подход к управлению данными и обеспечению эффективной работы предприятий и организаций [2].

2. КОНЦЕПЦИИ ХРАНЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ

Для решения задач хранения и управления данными существует несколько концепций, описывающих правила хранения, а также разработаны соответствующие технологии для их реализации.

Наиболее известными примерами могут служить: концепция, предложенная компанией EMC для решения задач резервного

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

копирования, восстановления и архивирования данных – BURA (Backup, Recovery and Archive) и концепция резервного копирования и аварийного восстановления данных (Backup & Recovery), направленная на обеспечение непрерывности ведения бизнеса. В них реализованы различные решения: от традиционного бэкапа отдельной, критичной для бизнеса БД, до реализации технологии непрерывной защиты данных (Continuous Data Protection, CDP) для организаций корпоративного уровня.

Достаточно схожей концепцией является архивирование оригинальной информации (Archive), направленное на перемещение эталонных данных для бессрочного или долговременного хранения на высоконадежный носитель. В большинстве случаев с поддержкой технологии однократной записи с многократным чтением (Write Once Read Many, WORM). Еще одним примером является концепция управления жизненным циклом информации (Information Lifecycle Management, ILM), которая позволяет оптимизировать использование ресурсов хранения и обеспечить доступ к ним с минимальными затратами. Она предусматривает перемещение данных в соответствии с их востребованностью и текущей ценностью между различными уровнями хранения, которые отличаются стоимостью самого ресурса хранения, включая показатели его производительности и защиты от отказов. Для небольших предприятий и организаций реализация любой из выбранных концепций может быть осуществлена как с помощью отдельных продуктов различных производителей, так и с помощью определенного набора таких продуктов. В свою очередь, для крупных корпораций именно комплексный подход к управлению данными является приоритетным, так как позволяет более эффективно решить основные задачи по управлению данными: интегрировать в единый репозиторий гетерогенное оборудование различных производителей, распределенное по множеству площадок; унифицировать защиту неоднородной информации в сложной и распределенной ИТ-инфраструктуре; организовать контроль за безопасностью конфиденциальных данных на мобильных устройствах пользователей; обеспечить соответствие требованиям национальных и международных регуляторов при прохождении аудита.

Таким образом, в настоящее время разработаны различные технологии для реализации концепций резервного копирования и аварийного восстановления, архивирования и управления жизненным циклом информации. Большая часть этих технологий базируется на программных и аппаратных платформах известных отраслевых лидеров и заслуженно занимает свою нишу на малых и средних предприятиях. Но организациям корпоративного уровня, для которых комплексный подход

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

к управлению данными является более эффективным, предлагается использовать платформу CommVault Simpana.

Комплексное управление данными с помощью CommVault Simpana.

Компания CommVault является одним из лидеров рынка систем резервного копирования и управления и неоднократно включалась в Gartner квадрант «Лидеры» исследования «Enterprise backup and integrated appliance». Со своим флагманским продуктом Simpana она также является лидером отрасли, по мнению аналитиков [3]: A Leader: Forrester Wave: Enterprise Backup and Recovery Software; № 1 for Enterprise Backup Applications в журнале Storage Magazine в номинации качества; № 23 в списке Forbes of America's 25 самых быстрорастущих технологических компаний; названа «Champion» в ряде отчетов Info-Tech Research Group (Backup Software for Heterogeneous Environments Vendor Landscape, Virtual Backup Vendor Landscape и Email Archiving Vendor Landscape). Полностью реализовать функционал, аналогичный функциональным возможностям Simpana, можно только с помощью достаточно большого набора продуктов разных производителей. При этом они будут с различными интерфейсами управления, с разными ресурсами хранения, что, в свою очередь, приведет к усложнению и увеличению стоимости внедрения и последующей поддержки. Simpana предлагается также в рамках OEM-партнерства таким лидером систем хранения, как HDS, в редакции Hitachi Data Protection Suite (HDPS). CommVault Simpana представляет собой единую платформу для защиты и управления всей информацией предприятия: от данных пользовательских приложений и ОС до корпоративных СХД и ресурсов облачных провайдеров. С ее помощью реализуются: резервное копирование данных, включая виртуальные среды; автоматический контроль виртуальной инфраструктуры, перенос ВМ между различными гипервизорами, перенос физических машин в виртуальную среду; архивирование электронной почты, файловых серверов, ВМ, БД; защита данных персональных компьютеров с защитой от потери ноутбука; создание индексируемого хранилища с полнотекстовым поиском; контроль содержимого на предмет несанкционированного контента; портал самообслуживания для самостоятельного восстановления данных пользователями; соответствие требованиям регуляторов и проведению служебных расследований в части защиты данных (E-discovery, Compliance, Legal hold). Структура CommVault Simpana представлена на рис.1. Основными ее компонентами являются [4]: CommServe – управляющий сервер Simpana; ContentStore – единый набор ресурсов хранения данных.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

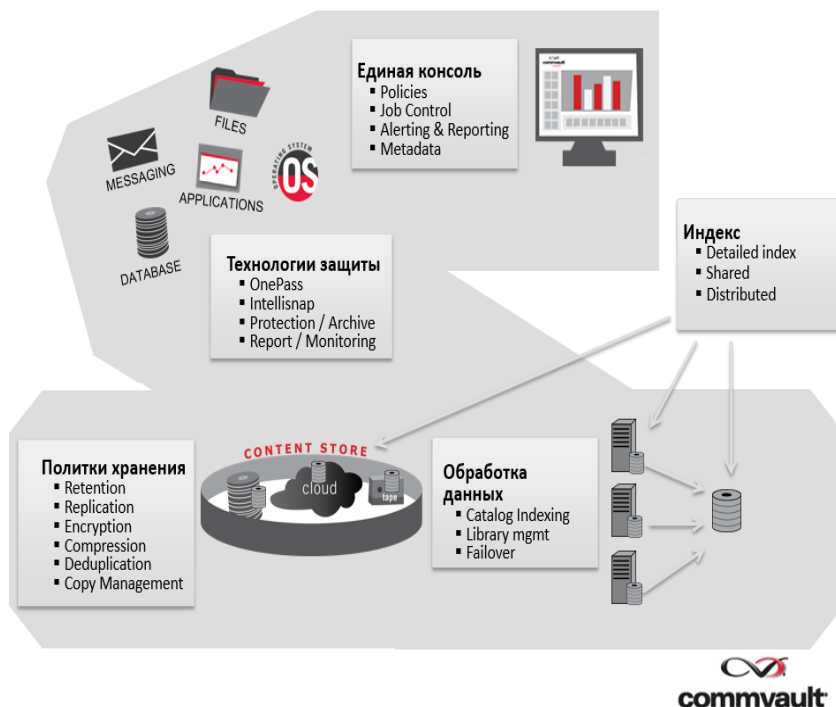


Рис. 1- Структура платформы CommVault Simpana

Это могут быть СХД (в том числе и программно-определяемые СХД), любые backup appliance, файловые серверы, ленточные библиотеки, облачные хранилища Amazon, Microsoft Azure и др.; Data Agent – агент для приложений и файловых систем. Выполняет также функции компрессии, дедупликации и шифрования на источнике (source-side dedup compression); Media Agent – медиаагент Simpana, принимающий поток данных с Data Agent, который реализует выбранную политику хранения, записывая данные на соответствующие носители в ContentStore. Медиаагент также непосредственно выполняет процесс дедупликации данных на получателе (target-side dedup).

Для защиты и управления данными реализованы такие подходы, как унифицированный процесс архивирования и резервного копирования данных (OnePASS), единый репозиторий для хранения, индексирования и глобальной дедупликации (ContentStore). Особенностью платформы CommVault Simpana является ее горизонтально масштабируемая архитектура как по производительности, так и объему. Если раньше Simpana представлял собой исключительно ПО, которое устанавливалось на аппаратное обеспечение, сконфигурированное в зависимости от

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

потребностей пользователя, то с появлением Storage Appliance компании CommVault, совместно с партнерами Fujitsu и NetApp, были разработаны программно-аппаратные комплексы для хранения архивов и резервных копий. Кроме этого, обновления коснулись и крупнейшего OEM-поставщика CommVault – компании Hitachi Data Systems, где устройства хранения от HDS комплектуются ПО Simpana, в редакции HDS – HDPS и также интегрируется с устройствами хранения в единый программно-аппаратный комплекс. Функциональные обновления в версии 10 R2 ServicePack 1, кроме традиционных улучшений и расширения функциональных возможностей в области информационной безопасности и мониторинга, также коснулись виртуальной инфраструктуры, публичных облаков и защиты рабочих мест пользователей, включая мобильные устройства. Для поддержки виртуализации в ОС – UNIX, IBM AIX и ORACLE/SUN Solaris, предлагается работа на уровне агентов Simpana, устанавливаемых внутри самих разделов соответствующей ОС (LPAR/WPAR или Containers). Большинство изменений затронуло традиционные платформы виртуализации для x86 архитектуры от Microsoft, XEN и VMware, причем для последней существенно расширен спектр возможностей, включая поддержку vSphere 6, VSAN 2.0 и vVols.

При интеграции частных облаков на базе вышеперечисленных гипервизоров с публичными облаками MS Azure и Amazon, взаимодействие осуществляется без установки каких-либо агентов, а непосредственно через API этих облачных инфраструктур. Благодаря такой интеграции можно выполнять функции создания, управления жизненным циклом и автоматического назначения политик как для локальных виртуальных сред на основе VMware и HyperV, так и для удаленных облачных – Amazon и MS Azure. Такая функциональная возможность, как конвертация ВМ с помощью функции Virtualize me между VMware и HyperV, теперь возможна и на VMware с MS Azure, что позволяет упростить миграцию ВМ в облачные среды. Для хранения данных, кроме поддержки Amazon S3/Glacier, добавился и Google Cloud Platform. По аналогии с Amazon, в Google Cloud данными можно управлять на двух уровнях хранения: оперативном и долговременном с пониженной доступностью (Standard/Durable Reduced Availability). Такой широкий спектр функциональных возможностей является уникальным на рынке платформ для управления данными, что позволяет позиционировать CommVault Simpana, как действительно «гибридное» облачное решение. В обновленных версиях CommVault Simpana реализована функция защиты рабочих мест пользователей. Основные изменения затронули модули Endpoint Data Protection (резервное копирование рабочих мест) и EDGE drive (синхронизация файлов и

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

папок как между различными устройствами, так и с внутренним облаком хранения). Модуль Endpoint Data Protection теперь поддерживает весь функционал резервного копирования для новой ОС Windows 10, включая восстановление образа машины целиком (One Touch). В модуле EDGE drive обновились приложения для мобильных устройств на базе Android, iOS, Windows. Для синхронизации данных можно воспользоваться уже несколькими режимами работы с различными папками. Синхронизация папок и файлов между компьютерами может быть однонаправленной, если целевая папка находится в режиме read only, или двунаправленной, если файлы могут быть отредактированы на любом устройстве. Также имеется возможность интеграции с Office 2013 благодаря подключению EDGE drive с помощью MS Office Connected Services, что делает работу пользователей с хранилищем CommVault полностью прозрачной. Расширение возможностей CommVault Endpoint Data Protection Solution Set для облегчения работы в гибридной среде, дает возможность ИТ-службе видеть данные на сервисах обмена файлами OneDrive, Dropbox и, соответственно, защищать их в соответствии со стандартами информационной безопасности, тем самым минимизируя риски при использовании публичных облачных хранилищ. Дальнейшее развитие платформы Simpana направлено на увеличение как ее производительности, так и количества корпоративных пользователей, активную поддержку интеллектуальной системы аналитики в масштабе реального времени. Благодаря этому значительно увеличатся возможности по масштабированию архитектуры, а новые методы индексации увеличат производительность. Также появятся новые механизмы оркестрации функции восстановления для работы в Azure и Amazon, а поддержка VSA распространится на Redhat RHEV (KVM), Nutanix Acropolis (AHV) и OpenStack платформы.

Таким образом, комплексный подход к управлению данными может быть рекомендован для применения во всех организациях и предприятиях корпоративного уровня, так как существенно повышает эффективность управления данными, а задача разработки качественно новых технологий для его реализации является весьма актуальной.

Технологии хранения данных.

СХД – это комплексная программно-аппаратная платформа для организации надежного хранения информационных ресурсов и предоставления гарантированного доступа к ним. Существуют следующие виды СХД: Direct-Attached Storage (DAS) – это непосредственно подключенные к вычислительной системе диски. Обычно как DAS квалифицируются варианты только непосредственного прямого подключения. Так, например, подключение дисков СХД по каналу FC в режиме «точка-точка» (без «сети хранения», порт системы

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

хранения в порт сервера), несмотря на то, что формально является DAS, тем не менее, считается частным, «вырожденным» случаем SAN. SAN представляет собой архитектурное решение для подключения внешних устройств хранения данных, таких как дисковые массивы, ленточные библиотеки, оптические приводы к серверам таким образом, чтобы ОС распознала подключенные ресурсы как локальные. Network Attached Storage (NAS) — сетевая СХД, сетевое хранилище. По сути, это компьютер с некоторым дисковым массивом, подключенный к сети (обычно локальной) и поддерживающий работу по принятым в ней протоколам. Часто диски в NAS объединены в RAID-массив. Несколько таких компьютеров могут быть объединены в одну систему. Функциональные возможности современных СХД ориентированы на производственные и финансовые потребности заказчиков. В настоящее время компании, работающие в различных отраслях экономики, заинтересованы в получении, обработке, хранении и эффективном управлении информацией [5]. Поэтому традиционные решения, которые производители интеллектуальных систем предлагали еще несколько лет назад, уже не соответствуют критериям целевых потребителей. Необходимы новые подходы в области разработки СХД: непрерывное ведение бизнеса при необходимости восстановления БД в чрезвычайных ситуациях; комплексные услуги, оптимизирующие затраты на хранение и доступ к данным; предоставление сетевых сервисов, ориентированных на реализацию конкретных отраслевых задач; возможности расширения для действующих приложений; постоянный мониторинг, архивирование и составление отчетов, другой документации в среде хранения, свободной от рисков. В настоящее время на мировом компьютерном рынке СХД представлены инновационными технологиями нового поколения, одним из наиболее перспективных направлений является виртуализация систем хранения. Ее повсеместное внедрение существенно облегчает управление различными системами, так как программные части совместимы с устройствами разных типов. СХД могут быть как частью, так и основой ЦОД [6]. Для любой организации, даже если это хотя бы несколько десятков компьютеров и несколько территориально разнесенных офисов, характерны типичные проблемы, связанные с растущими объемами информации. Децентрализация информации — если раньше все данные могли храниться буквально на одном жестком диске, то теперь любая функциональная система нуждается в отдельном хранилище — к примеру, серверов электронной почты, систем управления базами данных (СУБД), домене и пр. Ситуация усложняется в случае наличия территориально-распределенных офисов (филиалов). Лавинообразный рост информации — зачастую количество жестких дисков, которые можно установить в

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

конкретный сервер, не может предоставить необходимую системе емкость. И как следствие, – невозможность полноценно защитить хранимые данные, недостаточная скорость обработки информации, сложность резервного копирования (архивирования). Очень сложно или невозможно предусмотреть требуемый объем дискового пространства при развертывании компьютерной системы, вследствие чего возникают проблемы расширения дисковых емкостей и неэффективной утилизации ресурсов. Низкая степень конфиденциальности распределенных данных – невозможно проконтролировать и ограничить доступ в соответствии с политикой безопасности предприятия. Это касается как доступа к данным по существующим для этого каналам (локальная сеть), так и физического доступа к носителям. Сложность управления распределенными потоками информации – любые действия, направленные на изменения данных в каждом филиале, содержащем часть распределенных данных, создает определенные проблемы, начиная от сложности синхронизации различных БД, версий файлов разработчиков и заканчивая ненужным дублированием информации. Низкий экономический эффект внедрения «классических» решений – по мере роста информационной сети, больших объемов данных и все более распределенной структуры предприятия финансовые вложения оказываются не столь эффективны и зачастую не способствуют решению возникающих проблем. Высокие затраты на поддержку работоспособности всей информационной системы предприятия – начиная от необходимости содержать большой штат квалифицированного персонала и заканчивая многочисленными дорогостоящими аппаратными решениями для решения проблемы объемов и скоростей доступа к информации в совокупности с надежностью хранения и защитой от сбоев. В контексте перечисленных проблем, рано или поздно возникающих в любой динамично развивающейся организации, можно сформулировать требования к современным СХД [7]. Традиционный подход к построению современной архитектуры хранения данных, уже достаточно давно содержащий концепцию многоуровневого хранения, с разными требованиями по надежности, производительности, доступности, необходимо доработать в соответствии с современными требованиями к ИТИ организаций с целью обеспечения динамичной и гибкой ИТ-инфраструктуры для виртуализированных серверных ресурсов и быстрого развертывания или расширения программных приложений. Традиционные аспекты высокой надежности, высокой производительности и простоты управления остаются актуальны и для новых поколений СХД. Но их необходимо дополнить следующими характеристиками: упрощенное внедрение и изначальное планирование конфигурации; динамическое выделение

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ресурсов; постоянная оптимизация и настройка системы при изменении внешних условий и для обеспечения наиболее эффективного хранения информации; оптимизация на уровне одного логического тома; обеспечение безопасного доступа к данным и администрирования системы; масштабируемая архитектура; многопользовательская система хранения; плановая надежность системы; оптимальное использование ресурсов системы; виртуализированное хранение данных как на уровне одной системы, так и на уровне нескольких систем. В крупных организациях СХД составляет до 25 % стоимости ИТ-инфраструктуры. Эта цифра может существенно увеличиться вследствие роста объема используемых данных и потребности в емкостях СХД. В то же время организации имеют ограниченные ИТ-бюджеты, что вынуждает искать технологические решения, позволяющие сокращать расходы на построение СХД без ухудшения качества сервиса [8]. Одно из таких технологических решений – программно-определяемые СХД (Software-Defined Storage, SDS), которые позволяют создавать хранилища данных на неспециализированном оборудовании массового класса, как правило, группе серверных узлов архитектуры x86-64 под управлением ОС общего назначения (Linux, Windows, FreeBSD) [9]. Основная отличительная особенность SDS – виртуализация функции хранения, отделяющая аппаратное обеспечение от программного, которое управляет инфраструктурой хранения [10]. SDS входят в число новых технологий, которые быстро проникают в ИТ-инфраструктуру организаций и компаний-провайдеров облачных сервисов. Ожидается, что через пять лет объем этого рынка превысит 16 млрд долларов. Согласно прогнозу IDC, в период с 2017 по 2021 гг. мировые расходы на программно-определяемые хранилища будут ежегодно увеличиваться примерно на 13,5 % в год и составят около 16,2 млрд долларов к концу этого временного отрезка [11]. По прогнозам Gartner, уже в течение 2020 г. 70–80 % неструктурированных данных будут храниться на недорогих системах, управляемых с помощью SDS, а 70 % существующих массивов хранения станут доступны в полностью программной версии. SDS представляет собой ПО для управления услугами хранения на основе бизнес-ориентированных политик независимо от оборудования. Различные определения программно-определяемых хранилищ обычно включают виртуализацию хранилищ для отделения аппаратного обеспечения от программного, которое управляет инфраструктурой хранения. ПО, включающее программно-определяемую среду хранения, должно обеспечивать гибкую организацию хранения данных, а также управление на основе политик такими функциями, как кеширование, дедупликация, репликация, мгновенные снимки, резервное копирование, тонкое резервирование. В ассоциации производителей и потребителей

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

систем хранения (Storage Networking Industry Association, SNIA) SDS определяют, как виртуализированную среду хранения данных с интерфейсом управления сервисами, которая должна включать в себя [12]: автоматизацию – упрощенное управление, снижающее издержки на обслуживание инфраструктуры хранения данных; стандартные интерфейсы – Application Programming Interface (API) для управления, выделения и освобождения ресурсов, обслуживания сервисов и устройств хранения; виртуализацию путей доступа к данным – блочный, объектный и файловый доступ в соответствии с интерфейсами приложений; масштабируемость – изменение инфраструктуры хранения без снижения требуемого уровня доступности или производительности; прозрачность – мониторинг потребляемых ресурсов хранения, управление ими и контроль их стоимости. На сегодняшний день SDS предлагают многие производители: Dell EMC (Dell Nexenta, EMC и ScaleIO), HPE (StoreVirtual VSA), IBM (Spectrum Storage), NetApp (ONTAP Select), VMware (vSAN), Red Hat (RedHat Ceph Storage и RedHat Gluster Storage), StoneFly (SCVM, SDUS), DataCore (SANsymphony), VMware (vSAN), Virtuozzo (vStorage), Microsoft (Storage Spaces Direct и др. Условно все SDS можно разделить на три категории: классические (CEPH, Red Hat Storage Server, EMC ScaleIO); на основе традиционных систем хранения (NetApp ONTAP Select, HPE StoreVirtual VSA); в составе вычислительных комплексов (VMware vSAN). Некоторые производители предлагают как комплексные решения, так и программную часть (Huawei, Dell EMC). Это позволяет более гибко подходить к подбору продуктов и использовать «устаревшее» вычислительное оборудование для решения менее ресурсоемких задач хранения данных. Еще одна особенность SDS – возможность применения в некоторых классических СХД виртуализации дисковых массивов. Архитектурно SDS строятся по двум принципам: слабо связанные и распределенные (без общих элементов). В первом случае отказоустойчивость обеспечивается за счет распределенных копий данных, но из-за избыточности коммуникаций между узлами снижается скорость записи. Критичным элементом является сеть передачи данных, поэтому такие решения обычно реализованы на основе InfiniBand. По такому принципу построены SDS VMware vSAN, HPE StoreVirtual VSA, Dell EMC ScaleIO. В системах без общих элементов данные записываются на один узел, а затем с заданной периодичностью копируются на другие для обеспечения отказоустойчивости. При этом записи не являются транзакционными, поэтому такой подход более экономичен. Чаще всего в качестве интерконнекта в нем используется Ethernet. Данная архитектура также удобна с точки зрения масштабируемости.

3.ВЫВОДЫ

Комплексный подход к управлению данными может быть рекомендован для применения во всех организациях и предприятиях корпоративного уровня, так как существенно повышает эффективность управления данными. Поэтому необходимо проектировать СХД с учетом новых подходов в области их разработки. Одна из основных задач, которую необходимо решить при разработке и построении СХД – это обеспечение максимальной гибкости и масштабируемости при сохранении высокой эффективности использования ресурсов. SDS на сегодняшний день являются весьма востребованными на ИТ-рынке, так как их внедрение позволяет абстрагироваться от нижнего уровня аппаратной платформы, достигнуть необходимой масштабируемости, упростить инфраструктуру хранения и уменьшить финансовые затраты.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лисецкий Ю.М. Інформаційні технології в управлінні та обробці інформації: монографія. Київ: ЛІАТ&К, 2018. 268 с.
- [2] Лисецкий Ю.М. Комплексный подход к управлению данными. Математичні машини і системи. 2019. № 4. С. 93–99.
- [3] Продукт: CommVault_Simpana. URL: <http://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 15.07.2020).
- [4] Программа для резервного копирования CommVault Simpana. URL: <https://lwcom.ru/catalog/programmnoe-obespechenie/programmy-dlya-rezervnogo-kopirovaniya/commvault-simpana/> (дата обращения: 19.07.2020).
- [5] Лисецкий Ю.М. Информационные технологии в обработке и хранении экономической информации. Інформаційні технології, системний аналіз і моделювання соціоекологоекономічних систем: П'ята міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 19–20 березня 2014 р.). Київ, 2014. С. 79–81.
- [6] Лисецкий Ю. Построение современного территориально-распределенного центра обработки данных. Программные продукты и системы. 2008. № 2. С. 14–16.
- [7] Кучинский А. Требования к современным СХД. Storage News. 2011. № 4. С. 11–12.
- [8] Лисецкий Ю.М., Середович Е.П. Software-Defined Storages as a Tool of Lower IT Infrastructure Costs. Управляющие системы и машины. 2019. № 4. С. 42–48.
- [9] Иванов И.К. Программно-определяемые СХД: доступное решение для недоступных задач. URL: <http://www.globalcio.ru/workshops/1760/> (дата обращения: 24.07.2020).
- [10] Программно-определяемые СХД: время выбора. URL: <https://www.itweek.ru/infrastructure/article/detail.php?ID=196453> (дата обращения: 26.07.2020).
- [11] Рынок программно-определяемых хранилищ будет расти ежегодно на 13,5%. URL: <http://www.dailycomm.ru/m/41316> (дата обращения: 03.08.2020).

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[12] Программно-определяемые СХД: сравниваем 7 решений. URL: <https://habr.com/ru/company/lanit/blog/324072/> (дата обращения: 05.08.2020).

DATA STORAGE AND MANAGEMENT TECHNOLOGIES

Dr.Sci. Lisetskiy Y.

Abstract. The articles studies concepts of data storage and management: data recovery and archiving; backup copying and disaster recovery; original information archiving; information lifecycle management. There is described CommVault Simpana, a unified platform for protection and storage of all organization's information that enables complex approach to data management which significantly improve its efficiency. There are studied storage systems, major tasks they address as well as requirement to storages considering new approaches to their development are defined. There are analyzed software-defined storages, defined their requirements, described their features and main benefits, such as: abstraction from the lower level of the hardware platform; scalability; simplification of storage infrastructure and lowering expenses on its implementation.

Keywords: concept, data, storage and management, archiving, backup copying, storages, software-defined storages.

ТЕХНОЛОГІЇ ЗБЕРІГАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ДАНИМИ

Д.т.н. Лисецький Ю. М.

Анотація. Наведено концепції зберігання та управління даними: відновлення та архівування даних; резервного копіювання та аварійного відновлення даних; архівування оригінальної інформації; управління життєвим циклом інформації. Представлена єдина платформа для захисту, зберігання всієї інформації організації CommVault Simpana, що дозволяє організувати комплексний підхід до управління даними, що істотно підвищує ефективність цього процесу. Розглянуто системи зберігання даних, основні завдання, які вони вирішують, сформульовано вимоги до систем зберігання даних з урахуванням нових підходів у галузі їх розробки. Проведено аналіз програмно-визначених систем зберігання даних, викладені вимоги до них, показані особливості, а також переваги програмно-визначених систем зберігання даних: абстрагування від нижнього рівня апаратної платформи, масштабованість, спрощення інфраструктури зберігання і менші фінансові витрати на їх побудову.

Ключові слова: концепція, дані, зберігання та управління, архівування, резервне копіювання, системи зберігання даних, програмно-визначені системи зберігання даних.

УДК 004.043:691:389.6

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ.

К.т.н. Гришин С.И., д.т.н. Шинкевич Е.С.

Аннотация. Разработан архитектурный шаблон системы компьютерного моделирования свойств мелкозернистых бетонов полифункционального назначения. Показано, что в проектируемой OLAP-системе для компьютерного материаловедения потребность в агрегированных данных и значениях по умолчанию маловероятна и хранение этих данных нецелесообразно. С другой стороны в модели хранилища присутствует вид связи - «многие – ко - многим». Причина заключается в том, что объектом анализа может являться параметр конкретной добавки в составе композита, а реальным аргументом является коллекция добавок. Это вынуждает ввести дополнительный уровень иерархии таблиц измерений в виде таблицы связей. Поэтому использование более гибкой, по сравнению с многомерной, реляционной базы данных является предпочтительным. Выполненное моделирование показывает широкие возможности модификации составов органоминеральными экологически безвредными добавками и свидетельствует о рациональности разработок комплексных полифункциональных модификаторов отдельно для активированных и не активированных мелкозернистых бетонов. Практические результаты, полученные авторами, обеспечивают как повышенные по сравнению с нормативными, так и высокие дополнительные показатели качества.

Ключевые слова: тонкодисперсные наполнители, активация, компьютерные модели, хранилища данных.

1.ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство требует применения новых эффективных материалов, среди которых важное место занимают высококачественные мелкозернистые растворы и высокоподвижные смеси. Получение мелкозернистых растворных смесей высокой однородности, жизнестойкости и прочности невозможно без использования полифункциональных добавок-модификаторов, наиболее эффективными из которых являются комплексы на основе суперпластификаторов и высокодисперсных минеральных добавок на основе микрокремнезема. Однако препятствием к широкому применению таких комплексов в Украине является их высокая стоимость. Конкурентоспособной минеральной добавкой, является высокоактивный метакаолин, представленный в виде дисперсного порошка в результате обжига обогащенных метакаолиновых глин [1]. Различные кремнеземсодержащие активные микро- и макронаполнители с различными величинами площади удельной поверхности, структурой и полиминеральным составом могут по-разному влиять на реологию смесей, процессы структурообразования и твердения растворов [2,3].

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Важным нововведением в технологии высокоподвижных смесей и растворов является применение высокоскоростных смесителей-активаторов. Активация обеспечивает высокую стойкость к трещинам и высокую адгезию к различным основам, а на пористых наполнителях - еще и высокие теплозащитные и акустические свойства. В то же время вопросы совместного действия этих добавок и приоритетность их влияния на свойства смесей и бетонов, разработка высокоподвижных смесей с различными пластификаторами изучены недостаточно [4-6].

Одним из факторов, позволяющих интенсифицировать исследования в этой области и внедрение результатов исследования, является применение компьютерного моделирования. Систематизация исследуемых параметров и экспериментальных результатов позволяют быстро ответить на вопросы, возникающие у производителей в процессе принятия решений, а также увеличить объем моделирования, снизить вероятность ошибочных решений. В настоящее время преобладает эмпирический подход к моделированию физико-механических и строительно-эксплуатационных свойств с минеральными добавками [7]. Он характеризуется следующими этапами [8]: накопление информации об исследуемом объекте путем проведения экспериментов; первичная систематизация данных в виде таблиц и графиков, составляющих информационно-эмпирическую модель объекта; обработка этих данных методами математической статистики, позволяющая выявлять скрытые взаимосвязи и закономерности между статистическими переменными. Концепция и методология комплексного анализа по экспериментально-статистическим моделям позволяют за счет натурных и вычислительных экспериментов извлечь новые знания и полезную материаловедческую технологическую информацию, нередко недоступную при традиционном анализе, и тем самым интенсифицировать исследования и разработку строительных композитов нового поколения и неэнергоемких экологически безопасных технологий производства [9]. В качестве средств реализации модели обычно используют математические либо статистические программные пакеты [10]. В отличие от информационных систем эти программные средства ограничены в возможностях хранения исходных данных и результатов моделирования. Организация информационного обеспечения при работе с ними требует дополнительных усилий по интеграции с хранилищем данных – импорта данных в программный пакет, анализа данных средствами пакета, экспорта результатов анализа в хранилище. С другой стороны, популярные серверы баз данных давно имеют в своем составе службы анализа данных и типовые алгоритмы статистической обработки и нейросетевого моделирования. Ограниченные возможности эмпирического моделирования с

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

использованием программных пакетов определяют актуальность использования специализированных информационных систем для аналитических исследований. Назначение этих систем – поддержка аналитической деятельности, в том числе произвольных запросов пользователей-аналитиков с целью проверки возникающих гипотез.

Однако вопросы проектирования OLAP-систем для компьютерного материаловедения не получили освещения в литературе, в связи с чем представляет интерес определение общих для информационных систем строительных композитов шаблонов проектирования. В процессе проектирования информационных систем следует учитывать особенности трех уровней архитектуры: внешний уровень представляет индивидуальные интерфейсы пользователей; внутренний уровень представляет хранимые структуры данных, т.е. определяется выбранной СУБД;- концептуальный уровень - это абстрактное представление хранилища данных в целом.

2. ХРАНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

В разрабатываемом проекте предполагается хранить накопленный экспериментальный материал по влиянию добавок на свойства бетонных смесей, а также на физические, механические и эксплуатационные свойства композитов. В качестве анализируемых параметров приняты материалы добавок, состав растворной смеси, весовое содержания добавки в смеси, применение высокоскоростных смесителей-активаторов. Множественность анализируемых параметров предполагает представление данных в виде многомерной модели. В качестве многомерной модели хранилища использовано многомерное пространство с дискретным количеством значений на каждом измерении. К свойствам расворных смесей отнесены подвижность, водопотребность, расслаиваемость, время схватывания. Физические свойства композитов: плотность, водопоглощение по массе и по объему.

Механические свойства композитов: прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, адгезионная прочность, морозостойкость, водостойкость, трещиностойкость, микротвердость. Эксплуатационные свойства композитов: теплопроводность, звукопоглощение, деформативность, долговечность. Эти количественные показатели хранятся в одной таблице «Эксперименты» (рис. 1). В многомерной OLAP-модели эта таблица выполняет функции таблицы фактов. Данные по анализируемым параметрам содержатся в таблицах, которые выполняют функции таблиц измерений OLAP-модели. Перечень материалов добавок содержится в одноименной таблице. С целью повышения информативности нами принято решение хранить сведения о типах сущности Материалы. Типы определяют качественный характер

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

воздействия добавки на свойства композитов: наполнители, пластификаторы, порообразующие, стабилизаторы, ускорители.

В соответствии с принципами нормализации для хранения описаний типов выделена таблица Функции_добавок, занимающая верхний уровень иерархии по отношению к таблице Материалы. Измерение «состав растворной смеси» является структурой. Поэтому измерение представлено в схеме хранилища иерархией «главный-подчиненный».

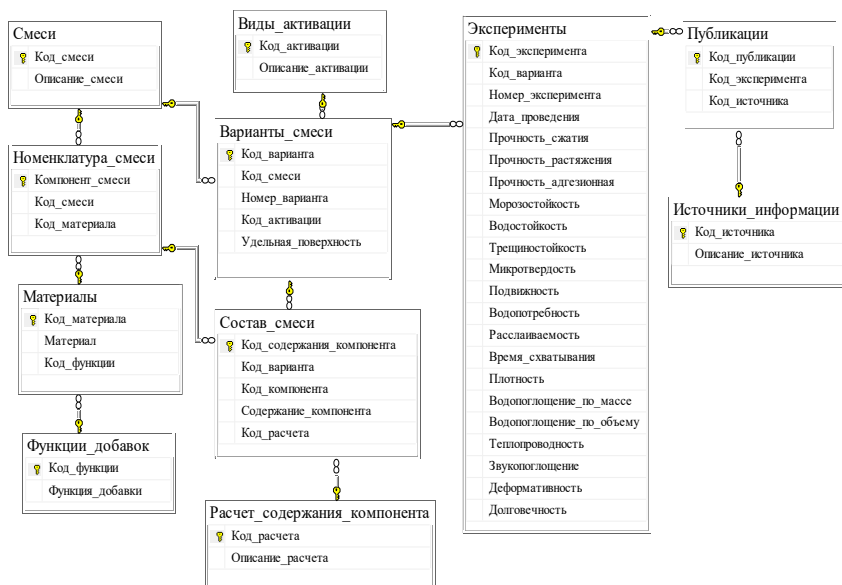


Рис. 1- Схема данных системы моделирования свойств строительных композитов

Перечень испытанных растворных смесей содержится в таблице Смеси, а их составы – в подчиненной таблице Номенклатура_смеси. Следует отметить, что таблица Номенклатура_смеси также реализует отношение «многие-ко-многим» между сущностями «материалы добавок» и «растворная смесь». Для реализации измерений «весовое содержания добавки в смеси», «удельная поверхность наполнителя» и «применение высокоскоростных смесителей-активаторов» используется таблица Варианты смеси. Она является подчиненной по отношению к таблице Смеси, а с таблицей Номенклатура_смеси связана отношением «многие-ко-многим». Это отношение реализовано с помощью таблицы Состав_смеси. Там же хранятся собственно весовые содержания добавок. Сведения о весовым либо долевым представлении содержания добавок

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

сохраняются с помощью связанной таблицы Расчет содержания компонента. Таблица Источники_информации не является таблицей фактов или измерений. Она включена в схему данных для повышения информативности системы и содержит ссылки на опубликованные экспериментальные результаты. С таблицей фактов таблица Источники_информации связана отношением «многие-ко-многим».

Это отношение реализовано с помощью таблицы Публикации. Полученная модель отличается от привычных моделей анализа - «звезды» либо «снежинки». В типовых моделях между таблицами измерений и таблицей фактов присутствует связь «один – ко - многим».

В модели ЭС-хранилища вид этой связи - «многие – ко - многим». Причина заключается в том, что объектом анализа может являться параметр конкретной добавки в составе композита, а реальным аргументом является коллекция добавок. Это вынуждает ввести дополнительные уровни иерархии таблиц измерений в виде таблиц связей. Такая особенность хранимых данных повлияла и способ реализации разработанной модели. Предпочтительным было признано использование более гибкой по сравнению с гиперкубом реляционной базы данных. Среди популярных серверов баз данных наиболее широким спектром инструментов для аналитических запросов к реляционным хранилищам данных обладает MS SQL Server. Важными расширениями языка Transact-SQL в плане анализа данных являются: конструкция окна для секционирования, упорядочивания и кадрирования, расширение предложения GROUP BY операторами и функциями, ранжирующие функции, статистические агрегатные функции, операторы сведения данных.

Таким образом, компьютерное моделирование получилось реализовать за счет формирования и заполнения хранилища данных, а также выполнения запросов на языке Transact-SQL с помощью инструментального средства SQL Server Management Studio.

На основе результатов экспериментов и компьютерного моделирования проведен сравнительный анализ изменения свойств активированных и не активированных смесей и мелкозернистых бетонов на их основе в зависимости от разной удельной поверхности: тонкодисперсных наполнителей: трепела или песка, от содержания микронаполнителей: высокоактивного метаксаолина (ВМК), волластонита (ВЛ) и водоредуцирующей добавки-суперпластификатора С-3 или Melflux. Анализ взаимовлияния добавок-наполнителей и добавок пластификаторов и оценка синергетических эффектов между ними проведены по одинаковым шестифакторным планам. В двух экспериментах использован молотый трепел, в двух других – молотый песок. В качестве независимых факторов состава варьировалось:

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

содержание микронаполнителей ВМК = $(6 \pm 4)\%$; ВЛ = $(5 \pm 5)\%$; и суперпластификатора С-3 = $(1 \pm 0,5)\%$. Для оценки эффективности приготовления растворяемых смесей рассматривались разные условия их приготовления: традиционный способ перемешивания в тихоходном смесителе с числом оборотов 300–400 об/мин и перспективный способ перемешивания в смесителе-активаторе с числом оборотов 2400 об/мин. Образцы твердели в нормальных условиях: $T = 22 \pm 2^\circ\text{C}$, Ратм. В первом и втором экспериментах подвижные неактивированные смеси с тонкомолотым песком (НАС-П) и тонкомолотым трепелом (НАС-Т) с В/Ц=0,5 готовились традиционным способом. В третьем и четвертом экспериментах готовились высокоподвижные активированные смеси с кварцевым песком (АС-П) и с трепелом (АС-Т) аналогичных составов с В/Ц=0,7 в скоростном смесителе. Реологические и физико-механические свойства высококачественных растворов зависят как от вида и содержания минеральных добавок – наполнителей, так и от состава и количества органических добавок. Важным фактором являются также технологические параметры приготовления смесей. На первом этапе исследований проведены оценка и анализ реологических свойств с учетом технологических условий приготовления смесей. Технологическая эффективность растворяемых смесей определяется в значительной степени её подвижностью. Подвижность смесей зависит от технологических условий их приготовления и от состава и В/Ц отношения. Она изменяется в диапазоне $D_p = (6 \div 16)$ см для подвижных и $D_p = (20 \div 30)$ см для высокоподвижных смесей. Плотность смесей изменяется в среднем на 40 %: $\rho_{\text{НАС-П}} = 2080 \div 2360$ кг/м³, $\rho_{\text{НАС-Т}} = 1760 \div 2020$ кг/м³, $\rho_{\text{АС-П}} = 1840 \div 1980$ кг/м³, $\rho_{\text{АС-Т}} = 1650 \div 2040$ кг/м³. Показатель расслаиваемости по нормам ДСТУ не должен превышать 5%. Не активированные смеси (НАС) – не расслаиваемы. Для активированных смесей при содержании С-3 < 1% и при отсутствии или минимальном содержании ВЛ показатель расслаиваемости превышает норму, что опосредованно может свидетельствовать о недостаточной, в данном случае пластификации смеси. Повышенное содержание С-3 до 1,0 ÷ 1,5% способствует нормализации расслаиваемости независимо от содержания ВЛ и ВМК и может быть связано с высокоразвитой структурой порового пространства применяемых наполнителей. В данном случае ВЛ и ВМК в оптимальном количестве выполняют роль стабилизаторов и гомогенизаторов смесей. Для активированной растворяемой смеси, модифицированной трепелом, значение раствороотделения при норме $\tan \alpha > 0,25$ изменяется от 0,38 до 0,56. С учетом дисперсности наполнителей раствороотделения растворяемой смеси может быть уменьшен до значений $\tan \alpha = 0,6 \div 0,7$. Следовательно, для активированных смесей и неактивированных смесей важно определение

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

таких показателей как расслоение и раствороотделение, которые в ДСТУ не предусмотрены. Для оптимальных составов активация смесей понижает расслоение и раствороотделение. *Сроки схватывания* корректируются составом и условиями приготовления. Повышенное содержание суперпластификатора С-3 отодвигает момент начала схватывания. Однако введение добавки ВЛ (CaSiO_3) совместно с ВМК приводит к ускорению периода гидратации цементных минералов. Начало сроков схватывания находится в пределах 50÷180 мин, а промежуток времени между началом и концом схватывания (период пригодности или время жизнестойкости) составляет 120-270 мин в зависимости от вида тонкомолотых наполнителей, подвижности и условий приготовления смесей. Неактивированные смеси с трепелом схватываются несколько медленнее, чем с кварцевым песком, что может быть связано, особенно в начальный момент времени, с увеличением содержания кремниевой кислоты и снижением рН.

Компьютерное моделирование позволяет сделать важное заключение о том, что даже при условии равноподвижности $\Pi = \text{const}$ смесей, реологические показатели, которые характеризуют эффективность смесей в процессе технологической переработки могут существенно отличаться.

Разные тенденции поведения смесей на кремнеземсодержащих наполнителях разного вида, строения, структуры и дисперсности могут являться косвенным свидетельством того, что механизмы формирования структуры в таких смесях будут проходить по-разному, что отражается на уровнях изменения физико-механических свойств.

Поэтому необходимо одновременно учитывать реологическую эффективность разных по природе и гранулометрии наполнителей, суперпластификатора и условий приготовления смесей: тихходные либо скоростные смесители. На следующем этапе исследований проведен сравнительный анализ изменения физико-механических и эксплуатационных свойств.

Прочность при сжатии. Совместное применение ВЛ и ВМК оказывает положительное влияние на $R_{см}$, повышая $\delta R_{см}$ до 25% (для НАС-П). За счет синергетического взаимодействия всех выбранных факторов с учетом условий приготовления смесей диапазон изменения $\delta R_{см}$ изменяется: с тонкомолотым трепелом – в 1,54 раза, с тонкомолотым песком - в 2,1 раза. При выборе оптимальных составов следует учитывать важный вывод о том, что влияние $S_{уд}$ макронаполнителей (трепел/песок) до 35% выше совместного влияния микронаполнителей ВЛ, ВМК и С-3, и что максимальные значения $R_{см}^{max}$ разных четырёх смесей достигаются при различной удельной

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

поверхности $S_{\text{песка}}$ или трепела. $R_{\text{см}}^{\text{max}} = 37; 40; 38; 25$ МПа для четырех исследуемых смесей, соответственно.

Прочность при изгибе. Обращает внимание тот факт, что ВЛ, который выполняет функцию микро армирования аналогично ВМК, синергетически взаимодействуют между собой, в результате диапазон изменения $R_{\text{изг}}$ увеличивается до 2 раз.

Максимальные и минимальные значения прочностей $R_{\text{см}}$ и $R_{\text{изг}}$ значительно превышают значения, нормированные ДСТУ для растворов различного вида, в том числе элементов полов: стяжек СТ1, СТ2, СТ3 – 3,5; 4,5; 6 МПа, покрытий полов ПО1, ПО2 – 5 МПа, ремонтных составов РМ3 ≥ 5 МПа, для замоналичивания швов ≥ 7 МПа, для кладки всех видов блоков МР2, МР3 ≥ 7 МПа. В среднем значения $R_{\text{см}}$ и $R_{\text{изг}}$ различаются более чем в 2,5 раза. Общие тенденции изменения для четырех видов смесей различны.

Следует отметить положительный синергетический эффект от влияния как микронаполнителей (ВЛ, ВМК, С-3) так и дисперсности микронаполнителей. Трещиностойкость изменяется в 2 раза: от 0,5 до 1 МПа*м^{0,5}. Общие тенденции изменения трещиностойкости активированных и не активированных смесей разные. Области максимальных значений трещиностойкости на не активированных смесях достигаются при максимальном содержании ВМК, С-3 и ВЛ. Микроволастонит $\text{CaSiO}_3^{\text{pH}=9,5-10,5}$ повышает деформационную и абразивную стойкость. Наблюдается нейтрализация значительного присутствия ВЛ модификациями кварца до $\text{pH}=7,5-8,5$.

Водостойкость составов на трепеле выше чем составов на тонкомолотом песке. Коэффициент размягчения в первом случае $K_p = 0,82 \div 1$, что связано с образованием вторичных водостойких гидросиликатов кальция в результате взаимодействия аморфного кремнезема с портландцементом.

Наибольшее влияние на K_{p0} оказывает $S_{\text{уд}}$. *Водопоглощение* модифицированных бетонов, которое характеризует пористость и проникновение жидкостей и газов, не превышает 3-6% в первую очередь за счет замены кварцевого молотого песка трепелом с $S_{\text{уд}} = 300$ и 600 м²/кг. *Морозостойкость* входит в комплекс нормированных свойств растворов и должна составлять не менее F50 циклов.

Морозостойкость МЗР определялась на образцах с тонкомолотых трепелом и образцах оптимального состава и достигает 50-75 циклов. Лучшая морозостойкость F75, полученная при содержании ВМК = 10%, ВЛ = 5-10% и С-3 = 1-1,5%, стоит отметить, что значительное влияние на морозостойкость раствора оказывает фракция трепела $S_{\text{уд}} = 600 \text{ м}^2 / \text{кг}$.

3. ВЫВОДЫ

На основе полученных результатов рекомендованы оптимальные составы полифункциональных модификаторов для активированных и не активированных смесей, которые отличаются количественным соотношением компонентов при одинаковом качественном их составе. Предлагаемые составы обеспечивают повышенные по сравнению с ДСТУ показатели качества и условия комфортности для различных элементов конструкций.

Многочисленность и многоплановость полученных составов на основе одинаковых по качественному, и различных по количественному составам органо-минеральных модификаторов предопределяет целесообразность и актуальность автоматизации аналитических исследований с применением системы поддержки принятия решений.

Основной задачей системы является предоставление информации по уже имеющимся составам и полифункциональным модификаторам. Это позволит расширить поле выбора и оценить конкурентоспособность состава.

Разработка и апробация хранилища данных позволяет перейти к следующим этапам проектирования аналитической информационной системы. К ним относятся накопление экспериментальных данных, использование типовых алгоритмов составе службы Ms SQL Server Analysis Service, табличная и графическая визуализация результатов исследования.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Дворкин, Л. И. Проектування складів бетонів / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Рівне : НУБГП, 2015. – 353 с.

[2] Pane, I. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. I. Pane, W. Hansen. // Cement and Concrete Research, 2005, v. 35, pp.1155-1164

[3] Beushausen, H. 2012 Early-age properties, strength development and heat of hydration of concrete containing various South African slags at different replacement ratios. H. Beushausen, M. Alexander, Y. Ballimb. // Constr. and Building Materials v. 29, pp. 533-540.

[4] Papadakis, V. Supplementary cementing materials in concrete. A fundamental estimation of the efficiency factor. V. Papadakis, S. Antiohos, S. Tsimas // Cement and Concrete Research, 2002, v. 32, pp. 1533-1538.

[5] Pal, S. C. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. S. C. Pal, A. Mukherjee, S. R. Pathak. // Cement and Concrete Research, 2003, v. 33, pp. 1481-1486.

[6] Шинкевич, Е. С. Исследования физико-механических и строительно-эксплуатационных свойств модифицированных растворов / Е. С. Шинкевич, [6] А. А. Тертычный, Е. С. Луцкий // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 348–362.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[7] Марко, О. Ю. Бетонные смеси и бетон с добавкой «УКД-1» – оценка изменений свойств / О. Ю. Марко, В. А. Ливинская, Е. Е. Корбут // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 164–188

[8] Кириллов, В. Х. Компьютерное моделирование физических и технологических процессов. Теория, алгоритмы, программы / В. Х. Кириллов, В. В. Зуб, А. С. Титлов, А. К. Ширшков. – Одесса : Издательство ВМВ, 2016. – 564 с.

[9] Шинкевич, Е.С. Математичні моделі впливу наповнювачів і добавок-модифікаторів на фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів / Е.С. Шинкевич, А.А. Тертичний, А.Б. Тимняк // Вісник ОДАБА. - 2016. - Вип. 62. - с. 194-200.

[10] Гришин С.И. Компьютерный анализ данных. Модели, алгоритмы, программы. / Гришин С.И., Кириллов В.Х., Ширшков А.К. - Одесса. Издательство ВМВ, 2014. – 304 с.

COMPUTER SIMULATION OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MODIFIED SOLUTIONS.

Ph.D. Grishin S.I., Dr.Sci. Shinkevich E.S.

Abstract. The architectural pattern of the system for computer modeling the properties of fine-grained multifunctional concrete has been developed. Practical results obtained by the authors provide the required and additional quality indicators, increase the physical and mechanical properties of fine-grained solutions, increase productivity.

Keywords: fine fillers, activation, computer models, data warehouse.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНИХ РОЗЧИНІВ.

К.т.н. Гришин С. І., д.т.н. Шинкевич Е. С.

Абстрактний. Розроблено архітектурну схему системи комп'ютерного моделювання властивостей дрібнозернистого багатофункціонального бетону. Практичні результати, отримані авторами, забезпечують необхідні і додаткові якісні показники, підвищують фізико-механічні властивості дрібнозернистих розчинів, підвищують продуктивність праці.

Ключові слова: тонкі наповнювачі, активація, комп'ютерні моделі, сховище даних.

УДК 681.5

**ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ МЕРЕЖ В АДАПТИВНИХ СИСТЕМАХ
УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ КЛІМАТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ**

Д.т.н. Михайлов С.А., к.т.н. Харченко Р.Ю.

Анотація. Пропонується використання апарату нейро-нечітких мереж при визначенні оптимальних значень параметрів ПІ - регуляторів в системах адаптивного управління суднових кліматичних установок. Показана ефективність запропонованої інтелектуальної адаптивної системи в порівнянні з традиційною адаптивною автоматичною системою управління.

Ключові слова: параметрична ідентифікація; генератор синусоїдальних коливань; оптимізація; гібридна мережа; ПІ - регулятор.

1. ВСТУП

Алгоритми функціонування автоматизованих систем управління (АСУ) судновими системами мікроклімату, що розроблені на стадії проектування, як правило, значною мірою відрізняються від оптимальних значень параметрів традиційних регуляторів. Пояснюється це недосконалістю математичних моделей об'єктів, які представлені як в аналітичному (часто спрощеному) так і експериментальному вигляді. Практично ускладнено отримання математичних моделей систем управління експериментальним шляхом на діючих і таких, що знаходяться на дистанційному або автоматичному режимах роботи, складних об'єктах. Ці труднощі пов'язані із впливом зовнішніх і параметричних збурень, ряд з яких носить нестационарний характер і не підлягають контролю [1-3]. Виходячи з цього, розроблені АСУ ТП потребують перенастроювання, яке супроводжується погіршенням якості процесу регулювання, що тягне за собою додаткові витрати матеріальних ресурсів. Оскільки роботи по настройці АСУ під час проведення пусконаладжувальних робіт, а також протягом подальшої експлуатації (при зміні навантаження і завдання) є необхідними і частими, виникають організаційні проблеми в їх виконанні. Наприклад, кількість настроюваних контурів систем регулювання на сучасному кліматичному об'єкті може досягати декілька десятків, що робить практично неможливим високоякісне і швидке виконання цих робіт «вручну» обмеженим складом екіпажу. У зв'язку з цим, необхідність застосування адаптивних інтелектуальних систем управління такими складними, багато режимними теплоенергетичними об'єктами як кліматичні суднові установки стає актуальною і необхідною мірою для підвищення ефективності управління та експлуатації судновим енергетичним комплексом в цілому. У вітчизняній енергетиці переважно застосовується типова каскадна система регулювання температури. До складу каскадної АСР (рис.1) входять управляючий контур ПІ-

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

регулятору і додатковий контур вимірювання допоміжної регульованої величини, що сформована в БФ – блоці формування сигналу (диференціаторі). Практика експлуатації такої системи показує, що при істотних змінах виникає потреба в ручному перенастроюванні значень коефіцієнтів її контуру регулювання за для досягнення заданої температури [4]. Фактично це важлива об'єктивна ознака того, що функціонування системи управління протікає в умовах апріорної невизначеності. Аналіз експлуатаційних характеристик пароперегрівача показує, що об'єкт управління має змінну величину транспортного запізнювання, його динамічні властивості істотно залежать від вмісту кисню у вихідних газах, забруднення поверхонь нагріву, а також від режимних факторів – навантаження, виду і сорту палива, що спалюється, стану поверхонь нагріву, надлишку повітря і т.п. Окрім того, отримання математичної моделі температури перегріву зазвичай пов'язано з апроксимацією кривих розгону, які отримано експериментально, та, як наслідок, математичний опис апріорі стає неточним.

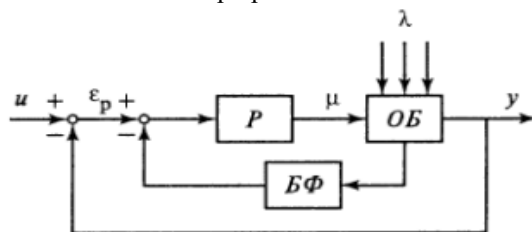


Рис. 1 - Каскадна АСР: P – регулятор, $ОБ$ – об'єкт управління (кліматична установка), u – завдання, λ – зовнішнє збурення, ε_p – помилка μ – управляюча дія, y – вихідний параметр

2. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

Дослідження наукових публікацій в області адаптивних АСР в теплоенергетичних системах [4-5] дозволило зробити висновок, що широке поширення отримали традиційні методи активної ідентифікації та пов'язані з ними алгоритми розрахунку оптимальних параметрів ПІ і ПІД - регуляторів з аналізу КЧХ об'єктів або режиму автоколивальності. Наприклад, такі підходи застосовуються в російських адаптивних регуляторах Реміконт і Протар. Слід зазначити, що для даної АСР температури, автоколивальний процес неприпустимий на вимогу технологічного регламенту, тому відхилення температури від норми може призвести до передчасного зносу обладнання. Таким чином, виникає наукова задача пошуку оптимальних методів ідентифікації об'єкту у випадках зміни його навантаження і алгоритмів розрахунку

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

настроек ПІ - регуляторів, з врахуванням думки експерта, для забезпечення очікуваного перехідного процесу (перерегулюванням $G < 30\%$, ступенню затухання $\Psi = (0.75-0.95)$, з мінімальним часом регулювання T_p). В даний час широкої популярності в теорії адаптивного управління набули наукові підходи, що пов'язані з використанням інтелектуальних систем [6-7]. Дані системи успішно реалізують досвід і знання експертів (нечіткі регулятори), а також мають здатність до самонавчання (нейро-регулятори). Спільне або комбіноване застосування даних напрямків стало поштовхом до виникнення нового наукового напрямку - гібридних або нейро-нечітких мереж (ГМ, ННМ) [8-9]. Розгляд даної технології стосовно ідентифікації та адаптації АСР температури перегрітої пари є актуальною науковою задачею.

Мета статті. Метою статті є розробка та навчання гібридної мережі для визначення оптимальних значень настроек ПІ-регулятора в каскадній АСР температури перегрітої пари за зміни навантаження об'єкту (регульовального режиму) та наявності пускового режиму.

3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ АДАПТИВНОЇ ГІБРИДНОЇ АСР

Авторами була запропонована структура гібридної адаптивної системи регулювання (рис. 2). На рисунку наведено наступні позначення: K - коефіцієнт передачі об'єкту, T - постійна часу об'єкту, τ - запізнювання, n - порядок об'єкту, y - вихідний параметр.

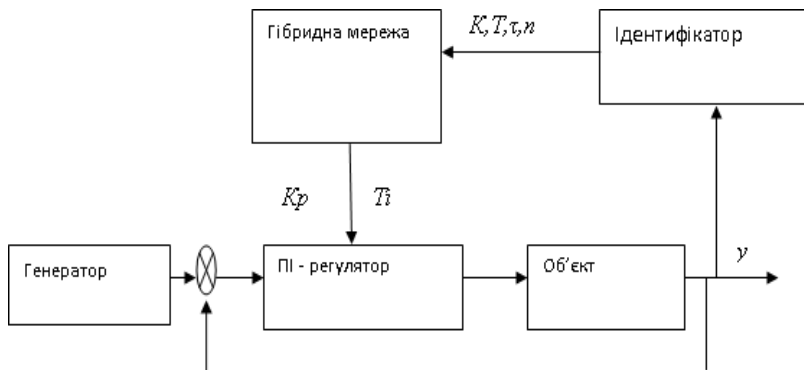


Рис. 2 - Структура адаптивної АСР

Структура адаптивної настройки ПІ-регулятора заснована на використанні активних частотних методів ідентифікації та визначення оптимальних настроек ПІ-регулятору гібридною мережею. Застосування частотних методів дозволяє забезпечити

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

перешкодозахищеність алгоритму та раціонально організувати активний експеримент на діючій системі щодо підтримки області стійкості. Ідентифікація здійснюється шляхом подання на вхід системи двох синусоїдальних сигналів від генератора на частотах, що розрізняються поміж собою, які належать до суттєвого діапазону.

Структура передавальної функції об'єкту складається з декількох інерційних ланок із запізненням виду: $W(s) = \frac{K}{(T(s)+1)^n} e^{\tau(s)}$ зі

значеннями, що змінюються протягом часу, в визначеному діапазоні в залежності від навантаження або режиму роботи парового котлу. Ідентифікатор знаходить значення параметрів об'єкту та його порядок. Надалі ці значення використовуються оптимізатором у вигляді нейро-нечіткої мережі, що діє за алгоритмом Сугено для пошуку оптимальних значень настройок ПІ-регулятора (K_p, T_i). Навчання гібридної мережі проводиться з урахуванням думки експертів - наладчиків АСУ ТП.

4. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТУ ТА РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІ - РЕГУЛЯТОРА

Для визначення значень чотирьох параметрів об'єкта (K, T, τ, n), пропонується використовувати генератор синусоїдальних коливань, який здійснює оцінку КЧХ об'єкту на двох різних частотах, що належать до суттєвого діапазону. З врахуванням дійсних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{K}{(\beta^2 \tau^2 \omega_1^2 + 1)^{0,5n}}; \\ A_2 &= \frac{K}{(\beta^2 \tau^2 \omega_2^2 + 1)^{0,5n}}; \\ \varphi_1 &= -\arctg(\beta \tau \omega_1) - \tau \omega_1; \\ \varphi_2 &= -\arctg(\beta \tau \omega_2) - \tau \omega_2 \end{aligned} \right\}$$

розв'язання яких за відомих амплітуд, частот і фазових зсувів: $A_1, A_2, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2$ дозволяє знайти значення параметрів передатної функції об'єкту. При цьому постійна часу: $T = \beta \tau$. Припускалося, що ідентифікатор визначив наступні значення параметрів передатної функції досліджуваного об'єкту за каналом регулювання [1,2]:

$$W(s) = \frac{8,27}{(3,05s + 1)^3} e^{0,93s}. \quad \text{В програмі MathCAD проведено}$$

розрахунок оптимальних значень настройок ПІ-регулятору (рис. 3).

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Mathcad-документ

Розрахунок настроек ПИ-регулятора за допомогою функцій

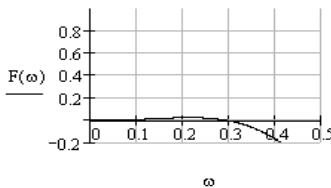
введення показника коливальності $M := 1.55$

введ. параметрів об'єкту $k_{\mu} := 8.27$ $T_{\mu} := 3.05$ $\tau := .93$ $W_{\mu}(\omega) := \frac{k_{\mu} \cdot e^{-\tau \omega \cdot j}}{(T_{\mu} \cdot j \cdot \omega + 1)^3}$

побудова графіка допоміжної функції

$$\omega_{\text{end}} := .5 \quad n := 500 \quad \Delta\omega := \frac{\omega_{\text{end}}}{n} \quad \omega := \Delta\omega, 2 \cdot \Delta\omega \dots \omega_{\text{end}}$$

$$\phi_{\mu}(\omega) := \arg(W_{\mu}(\omega)) \quad A_{\mu}(\omega) := |W_{\mu}(\omega)| \quad F(\omega) := \frac{-\omega \cdot M}{A_{\mu}(\omega) \cdot (M^2 - 1)} \cdot (M \cdot \sin(\phi_{\mu}(\omega)) + 1)$$



визначення частоти максимуму допоміжної функції

$$\omega := .35 \quad \text{Given} \quad \omega \geq .2 \quad \omega \leq .4$$

$$\omega_{\text{res}} := \text{Maximize}(F, \omega)$$

$$\omega_{\text{res}} = 0.213 \quad F(\omega_{\text{res}}) = 0.022$$

визначення оптимальних параметрів регулятора і побудова АЧХ замкнутого контуру

$$A_{\text{res}} := A_{\mu}(\omega_{\text{res}}) \quad k_p := -M^2 \cdot \frac{\cos(\phi_{\mu}(\omega_{\text{res}}))}{(M^2 - 1) \cdot A_{\text{res}}} \quad T_i := \frac{k_p}{F(\omega_{\text{res}})} \quad W_r(\omega) := k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot \omega \cdot j}\right)$$

$$W(\omega) := W_{\mu}(\omega) \cdot W_r(\omega) \quad \Phi(\omega) := \frac{W(\omega)}{1 + W(\omega)} \quad A(\omega) := |\Phi(\omega)| \quad \omega_{\text{end}} := 2 \quad \Delta\omega := \frac{\omega_{\text{end}}}{n}$$

$$\omega := \Delta\omega, 2 \cdot \Delta\omega \dots \omega_{\text{end}}$$

Оптимальні значення

$$k_p = 0.124 \quad T_i = 5.649$$

$$+ \frac{A(\omega)}{1.55}$$

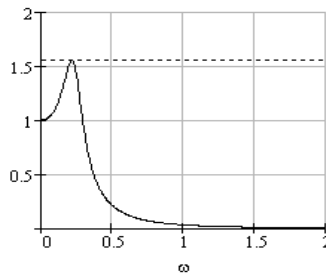


Рис. 3 - Розрахунок оптимальних значень настроек ПИ-регулятора

Слід зазначити, що розраховані за представленим методом настройки ПИ-регулятора потребували ручного коригування, оскільки низка отриманих затухаючих перехідних процесів не відповідала заданим критеріям (першому відхиленню та часу регулювання). Для отримання тестової вибірки (матриці навчання нейро-нечіткої мережі) значень оптимальних параметрів ПИ-регулятора каскадної АСР, був проведений комп'ютерний експеримент в програмі MatLab (Simulink) з ручним коригуванням значень настроек K_p та T_i , значення параметрів передатної функції об'єкту змінювалися з урахуванням різних режимів роботи парового котла. Результати експерименту представлено в табл. 1.

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІОННИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

Таблиця 1. Оптиміальні настройки ПІ-регулятору при $n=3$ та дії на об'єкт параметричного збурення (зміни навантаження)

$K_{об}$	0,5	1	5	15	5	12	4,43	7,05	11,9	13,7
$T_{об}$	1,5	3	4	4	1,5	1,5	2,48	1,5	1,5	3,4
τ	0,5	1	1,5	1	0,5	0,5	0,92	0,5	0,5	0,7
K_p	1,34	0,99	0,49	0,146	0,135	0,031	0,22	1,92	0,031	0,021
T_i	1,91	5,55	40,63	20,4	1,92	1,58	6,61	0,1	1,58	3,55

5. РОЗРОБКА НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ

Нейро-нечітка мережа (ННМ) або гібридна мережа (ГМ) являє собою багатoshарову нейронну мережу без зворотних зв'язків. У такій мережі входи (K, T, τ) представлені у вигляді лінгвістичних змінних (мале значення, середнє, велике). У програмі Matlab (ANFIS) був проведений процес побудови адаптивної системи нейро-нечіткого виводу (рис.4) для апроксимації залежності, що являє собою причинно-наслідковий зв'язок поміж K, T, τ й K_p, T_i . Виходячи з рекомендацій [8,9] і комп'ютерних експериментів у середовищі MatLab (Fuzzy Logic Toolbox) було обрано і типи функцій належності (трапецеїдальний і трикутний), що описують вхідні і вихідні значення. У процесі навчання було використано кількість циклів, що дорівнює 40, та обрано метод навчання - зворотнього поширення помилки.

Таким чином, гібридною мережею було реалізовано відображення параметрів ПІ-регулятора за характеристиками об'єкту регулювання: $S^k = f(x^k) = f(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)$, $k = 1, 2, \dots, N$, за наявності навчальної множини $((x^1, y^1), \dots, (x^N, y^N))$ що знаходиться в табл.1.

Для моделювання невідомої функції f використовується алгоритм Сугено з базою знань наступного типу: Π_i : $YKЩО x_1 \in A_{i1} \text{ Й } x_2 \in A_{i2} \text{ Й } x_1 \in A_{in}$, $ТО T_{in} = S_i$, $i=1, 2, \dots, m$, де A_{ij} – нечіткі множини трикутної форми, що описують висловлювання експерта (мале (М), середнє (С), велике (В)), S_i – вихідні значення об'єкту. Ступінь істинності μ правила i визначається за допомогою операції кон'юнкції. Вихід нечіткої системи

$$\text{визначається методом центру тяжіння: } T_{ik} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i}.$$

Після навчання ГМ та подання на її вхід значень параметрів об'єкту ($K_{об} = 8,27$; $T_{об} = 3,05$; $\tau = 0,928$), що відсутні в тестовій вибірці (табл.1) і визначених в результаті активної ідентифікації, мережа рекомендувала значення настройок ПІ – регулятору : $T_i = 5,15$; $K_p = 0,12$, а традиційний метод КЧХ (рис.3) – $K_p = 0,21$, $T_i = 5,649$.

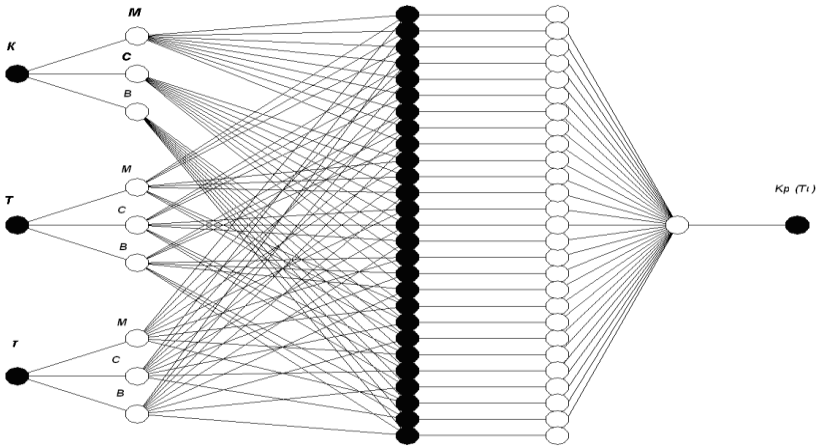


Рис. 4 - Структура запропонованої гібридної мережі

6. КОМП'ЮТЕРНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ З АПРОБАЦІЇ ЗНАЧЕНЬ НАСТРОЙОК АДАПТИВНОГО ПІ-РЕГУЛЯТОРА

У програмі MatLab (Simulink) розроблено моделі каскадних АСР (рис.1) з ПІ-регуляторами та інерційними об'єктами третього порядку із запізненням (модель пароперегрівача за каналом регулювання) з нелінійним елементом (обмеження на керуючий вплив) (рис.5). На вхід системи подавався одиничний скачок. При зміні значень параметрів передатної функції об'єкту у випадках переходу енергоблоку на піковий або пусковий режим (моделюванні дії параметричного збурення) та встановлення нових значень параметрів об'єкту $K_{об} = 13,7$; $T_{об} = 5,4$; $\tau = 1,1$, ГМ рекомендувала настройки: $K_p = 0,81$; $T_i = 6,33$, а традиційний частотний метод за допоміжною функцією: $K_p = 0,021$; $T_i = 3,55$. Підстановка цих значень в схему програми Simulink дозволила отримати наступні перехідні процеси (рис.6).

З аналізу перехідних процесів рис.6 (1,2) можна зробити висновок, що при номінальному або стабільному режимі роботи об'єкту, гібридний і традиційний ПІ-регулятори демонстрували однакові показники якості (час регулювання $T_p = 45$ с), однак при впливі параметричного збурення (3,4) гібридна система має менший час регулювання ($T_{p1} = 138$ с), у порівнянні з традиційною адаптивною АСР ($T_{p2} = 173$ с), також перерегулювання гібридної АСР $G^{гп} = 28\%$, традиційної $G^{гп} = 50\%$, ступень затухання гібридної $\Psi^{гп} = 0,91$, традиційної $\Psi^{гп} = 0,68$., тобто запропонована гібридна АСР є оптимальною та енергоекономною, а традиційна каскадна АСР потребує додаткової адаптації.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

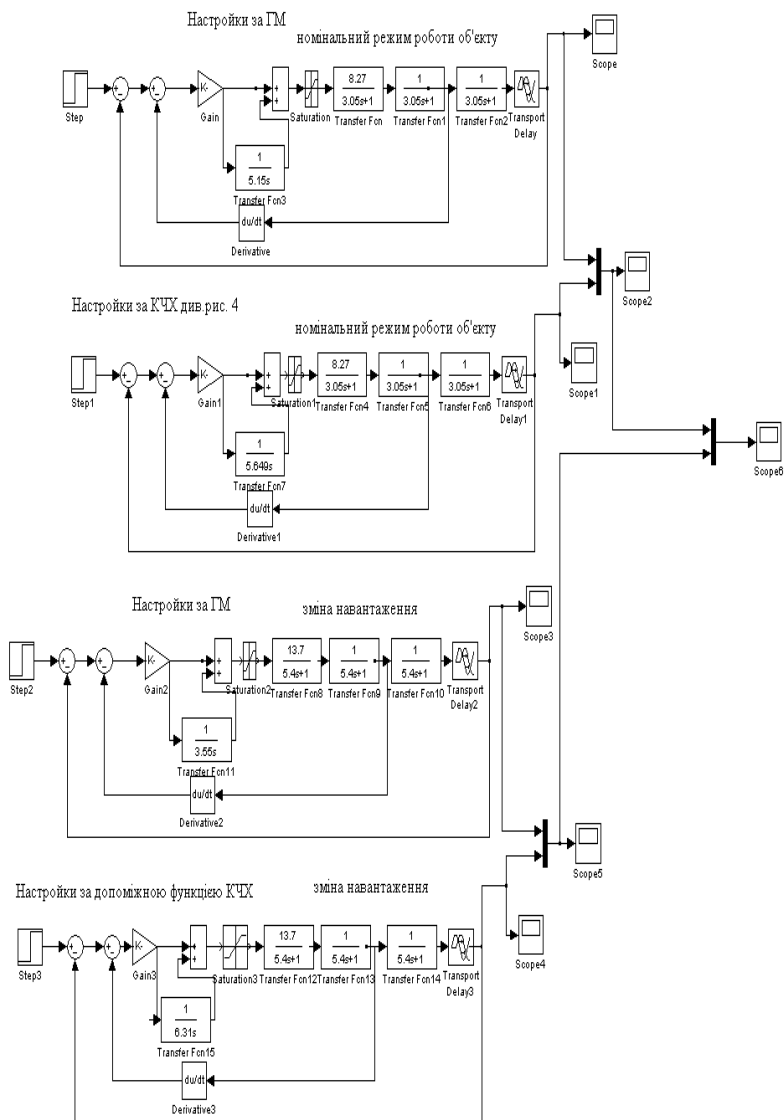


Рис. 5 - Схема адаптивних АСР з ПІ - регуляторами та нелінійними елементами (Saturation)

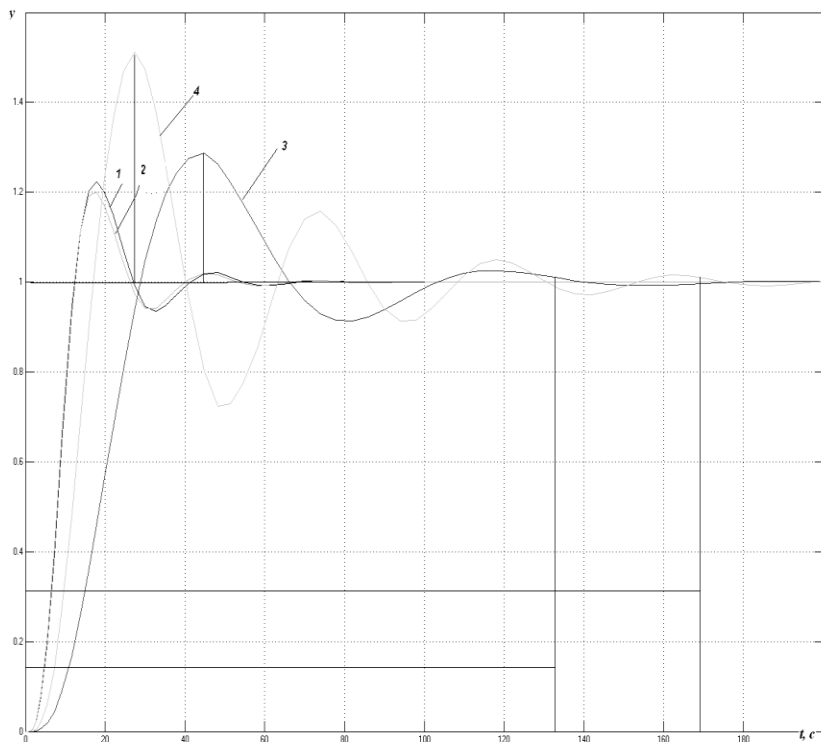


Рис. 6 - *Перехідні процеси за каналом регулювання: 1 – традиційної АСР та 2 – нейро-нечіткої АСР (за номінального навантаження), 3 – нейро-нечіткої АСР та 4 – традиційної АСР (за зміни навантаження).*

7. ВИСНОВОК

Комп'ютерні експерименти в програмі MatLab (Simulink) з варіюванням значень параметрів передатної функції об'єкта (моделюванні пікових і пускових режимів) продемонстрували в низці випадків неефективність традиційного адаптивного підходу (АСР була неефективна) на відміну від алгоритму ГМ, перехідні процеси якої були оптимальними.

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що запропонована інтелектуально-адаптивна АСР температури має наступні переваги в порівнянні з традиційними методами адаптації за КЧХ і автоколивань, які використовуються в даний час в АСР: швидкість процесу знаходження оптимальних налаштувань ПІ-регулятора каскадної

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

АСР з можливістю їх апроксимації та екстраполяції і при дії невизначених збурень; меншим першим відхиленням і часом перехідного процесу регулювання; можливістю оптимального функціонування каскадної АСР у всіх режимах; можливістю використання в процесах адаптації різних АСУ ТП і АСР з ПД і ПДД-регуляторами.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Харченко Р. Ю. Методы адаптивного регулирования в системе климатического контроля судна/ Р. Ю. Харченко //Автоматизация судовых технических средств, Научно-технический сборник ОНМА, выпуск 17, 2011. С. 95-106.
- [2] Вычужанин В. В. Повышение эффективности эксплуатации судовой системы комфортного кондиционирования воздуха при переменных нагрузках: монография/ В. В. Вычужанин // Одесса : ОНМУ, 2009. — 206 с.
- [3] Вычужанин В. В. Теплофизические свойства обитаемого помещения судна при нестационарных нагрузках/ Вычужанин В. В. // Вестник международной академии холода, 2008 №4 С.15-19.
- [4] Михайленко В. С. Решение задач идентификации и управления температурным контуром системы охлаждения судового дизеля/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Науковий вісник ХДМА. Науковий журнал. Херсонська державна морська академія. №2 (17) 2017г. С. 69-77.
- [5] Михайленко В. С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ – регулятора по идентификации переходного процесса/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Труды Одесского политехнического университета. – 2012. – № 1 (38). – С. 152-156.
- [6] Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети для оптимизации режимов эксплуатации судовых систем комфортного микроклимата/ С. А. Михайлов, Р. Ю. Харченко // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 36.–Одесса: НУ «ОМА», 2016. С. 24-32.
- [7] Харченко Р. Ю. Идентификация объектов в системах адаптивного управления с помощью нейро-нечетких сетей/ Харченко Р. Ю. // Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки». – Одеса: НУ «ОМА», 2016. С. 97-100.
- [8] Михайлов С. А. Применение гибридных интеллектуальных сетей в судовых системах климат-контроля/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // конференция «СИЭТ-2014» МНПК «Современные информационные и электронные технологии», – 2014.– С. 13.
- [9] Вычужанин В.В., Гибридные экспертные системы для противоаварийного управления сложными техническими системами/ Вычужанин В.В., Коновалов С.Н. // Вісник ОНМУ: 36. наук. праць. – 2017.– Вип. 2 С. 165-179.
- [10] Михайлов С. А. Гібридна система управління параметрами мікроклімату / Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // Матеріали VIII Міжнародної

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» 23 - 25 вересня 2019, – Одеса: ОНМУ, 2019. С. 122-124.

[11] С. А. Михайлов, Р. Ю. Харченко, Інтелектуальне управління параметрами мікроклімату судових приміщень, Матеріали науково-методичної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика» 05.12.2018 – 06.12.2018, Одеса, НУ «ОМА», стр. 53 – 57.

APPLICATION OF HYBRID NETWORKS IN ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS FOR SHIP CLIMATE INSTALLATIONS

Dr Sci. Mikhailov S. A., Ph.D. Kharchenko R. Yu.

Abstract. The use of the device of neural-fuzzy networks at definition of optimum values of parameters of PI - regulators in systems of adaptive management of ship climatic installations is offered. The efficiency of the proposed intelligent adaptive system in comparison with the traditional adaptive automatic control system is shown.

Keywords: parametric identification; sinusoidal oscillator; optimization; hybrid network; PI - regulator.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ СЕТЕЙ В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Д.т.н. Михайлов С. А., к.т.н. Харченко Р. Ю.

Аннотация. Предлагается использовать устройства нейронечетких сетей при определении оптимальных значений параметров ПИ-регуляторов в системах адаптивного управления судовыми климатическими установками. Показана эффективность предложенной интеллектуальной адаптивной системы по сравнению с традиционной адаптивной системой автоматического управления.

Ключевые слова: параметрическая идентификация; генератор синусоидальных колебаний; оптимизация; гибридная сеть; ПИ - регулятор.

Моделирование и разработка программ

УДК 519.216.1

**PROBABILISTIC METHODS IN COMPUTER SIMULATION OF THE
FORMATION OF CLASSES OF PRIMES AND ESTIMATION OF
THE CONSTANTS OF THE GENERALIZED ARTIN HYPOTHESIS**

Ph.D. Vostrov G., Opiata R.

Abstract. The relationship between the processes of forming classes of primes in the generalized Artin hypothesis based on the theory of randomized algorithms of the probabilistic method is investigated. It is proved that probabilistic methods are the basis for constructing computer models of classes of primes in accordance with the generalized Artin hypothesis. Methods for calculating the Artin constants are developed and the convergence of the estimates of the constants in probability to the limiting values is established. The foundations of a number-theoretic analysis of Artin's constants and related classes are created.

Keywords: generalized Artin classes, Artin constants, class probabilities, stability of estimates of the Artin constants, convergence in probability

1. INTRODUCTION

The solution of many problems in various fields of applied mathematics depends on the solution of a significant number of problems of pure mathematics, which are still not solved. Artin's hypothesis of primitive roots is one of these fundamental mathematical problems. The solution to the Artin problem is important for investigating the relationship between the properties of natural numbers other than zero and plus or minus 1 and the properties of the classes of primes generated by recursive mappings based on Fermat's small theorem [1 – 3].

The numerical sequences of iterative models of cyclic fixed points of dynamical systems are determined by the properties of the primes with which they are represented. It is necessary to know the law of distribution of primes. Riemann proposed a zeta function in 1869:

$$\xi(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \prod_{p \in \mathcal{P}} \left(1 + \frac{1}{p^s} + \frac{1}{p^{2s}} + \dots \right) \quad (1)$$

where s is a complex variable, $\mathcal{P}$ is the set of all primes [1,2]. Concerning this Riemann function, a hypothesis was formed according to which all non-trivial zeros of this function are on line $1/2 + iy$, where $i = \sqrt{-1}$ and $y \in \mathbb{R}$. It follows that all primes lie on this line since y – takes values from a set that includes all primes $\mathcal{P}$. Moreover, for any prime number p

$\xi(1/2 + ip) = 0$. In essence, this was the first attempt to find the law of the distribution of primes.

In 1896, independently, Hadamard and Vallee-Poussin proved that equality is true:

$$\pi(x) = \int_2^x \frac{dt}{\ln t} + O\left(x \cdot e^{-c\sqrt{\ln x}}\right) \quad (2)$$

where $\pi(x)$ is the number of primes $p \leq x$, and the first term in the form of a logarithmic smooth function determines the logarithmic law of the distribution of primes in asymptotic form.

One of the ways to deepen the logarithmic law of the distribution of primes was the formulation in 1927 by the French mathematician Artin of the hypothesis of primitive roots of primes $p \in \mathcal{P}$ and, accordingly, of primitive roots of residue groups $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ modulo prime p [4 – 7].

Consider the definition of the primitive root of a prime number p . The numbers $a \neq 1$, $a \neq k^2$ is the primitive (antiderivative) root of the number p , if the following relations are true:

$$\begin{cases} a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p} \\ a^{\frac{p-1}{n}} \not\equiv 1 \pmod{p}, \quad n > 1 \end{cases} \quad (3)$$

Moreover, n is the divisor of $p-1 = \prod_{i=1}^k p_i^{\alpha_i}$.

Given the definition of a primitive root, Artin's hypothesis is:

$$\pi(x, a) = c(a, x) \cdot \pi(x) \quad (4)$$

where $\pi(x, a)$ is the number of primes p less than or equal to x , for which $a \neq \pm 1$ and $a \neq k^2$ are according to (2) their primitive roots, $c(a)$ is the Artin constant. More precisely, this hypothesis should be presented as follows:

$$\begin{cases} \pi(x, a) = c(a, x) \cdot \pi(x), \\ c(a, x) \rightarrow c(a), \quad x \rightarrow \infty \end{cases} \quad (5)$$

But then $c(a, x) = \frac{\pi(x, a)}{\pi(x)}$ and in probability converges to $c(a)$, and

therefore has a probability theory interpretation: $c(a)$ is the probability of choosing from the set $\mathcal{P}$ a prime number p such that a is its primitive (primitive) root. Note that the first relation in (5) is always satisfied if a and

p are coprime numbers according to Fermat's theory [1]. It should be noted that Artin proposed his ratings for $c(a)$ at $a = 2$. But as proved by Hooley [5], these estimates are not true. He also proved the validity of the relation:

$$\pi(x, 2) = \frac{c(2) \cdot x}{\ln x} + O\left(x \frac{\ln \ln(x)}{(\ln(x))^2}\right) \quad (6)$$

at the same time $c(2) = \prod_{p \in \mathcal{P}} \left(1 - \frac{1}{p(p-1)}\right)$, and an estimate of the value

$c(2) = 0,373955813\dots$ As will be shown later, this estimate is true only with the accuracy of the first two decimal places.

It should be noted that any number $a > 1$ and coprime to p is the basis for considering the recursive function $f(x) \equiv a \cdot x \pmod{p}$, which leads to a recursive iterative sequence.

$$f(x_0 = 1) = 1, \quad f(x_{n+1}) = x_{n+1} \equiv ax_n \pmod{p} \quad (7)$$

According to Fermat's theorem [1,2], if a is not a primitive root for p , then the process of recursive computations will continue for such m that equality $f(x_n = m) \equiv x_{m-1} \cdot a \pmod{p} = 1$ is reached, i.e.

$$a^m \equiv 1 \pmod{p} \quad \alpha \vee \delta \quad m < p - 1 \quad (8)$$

From Fermat's theorem and the properties of the group of residues $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ modulo p [1,2], it follows that in this case a is a generating element of some subgroup of the group $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$. Moreover, m is the order of this subgroup, which is usually denoted by $\text{card}_a(p)$, the number of adjacency classes for this subgroup is denoted by $\text{ind}_a(p)$. According to the cyclic group theorem $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$, the equality:

$$p - 1 = \text{card}_a(p) \cdot \text{ind}_a(p) \quad (9)$$

From the above analysis it follows that equation (9) allows us to study the Artin hypothesis from a more general point of view, when any natural number $a > 1$ can be used as a classifier of the set of all primes in the magnitude of $\text{ind}_a(p)$, which is the object of further research. As will be established, Artin's hypothesis of primitive roots will be a frequent case of its more general formulation.

2. MODELING THE PROCESSES OF GENERATING DYNAMIC INFORMATION ABOUT THE STRUCTURE OF CLASSES OF PRIMES ON A GIVEN BASIS

Now we return to the logarithmic law of the distribution of primes [1,2] Information about the distribution of smooth primes [1] is important when solving the discrete logarithm problem and applying algorithms for solving it in the modern coding theory, modern cryptography. It is known that finding smooth large prime numbers is very difficult. This implies that it is of considerable interest to search for the laws of distribution of primes not only with respect to their primitive roots, but also to the generating elements of the subgroups of the residue group modulo prime $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$. Artin's hypothesis does not imply such detailed studies. Such tasks were not considered at all.

The second circumstance is that simultaneously with this fact, the dynamics of change in $O\left(x \cdot e^{-\frac{c}{2}\sqrt{\ln x}}\right)$ is investigated. In [7,8], the entropy

of function $f(x) = \pi(x) - Li(x)$ was estimated and was proved that it has a fractal character. The first attempt was made by D. Zagier [8], but not completed. The results obtained by the author confirm the very complex fractal behavior of this component. It follows that it is necessary to significantly improve the study of the depth of classification of primes, taking into account all models for the formation of classes of primes for any given basis $a > 1$. Further more detailed studies of this component confirm that although the logarithmic distribution law is fulfilled, nevertheless, complete information on the dynamic properties of primes and their relationships with their primitive roots remains poorly studied. In the future we will consider any values of the base and large units. According to Artin's hypothesis [4 – 6], the set of such primes has the distribution law $\pi(x, a)$ as an expression:

$$\pi(x, a) = c(a) \cdot \pi(x) \quad (10)$$

where $\pi(x)$ is the distribution of prime numbers, and $c(a)$ is a constant dependent on a . Until now, despite numerous studies, this hypothesis has not been resolved. However, it is not known if this is true for any a values. If the hypothesis is correct, then the question remains how to estimate the constant $c(a)$ for each concrete a and which properties of the number a influence its value. Answers to these questions are still missing. In works [6,7] a detailed analysis of all the results of research in the field of solving the Artin hypothesis is given. It should be noted that the proof of Artin's hypothesis is important both from a theoretical point of view in number theory, and from an applied rhenium point, because it's positive solution is important in

cryptography, coding theory, and the theory of dynamical systems. In [6], a generalized Artin hypothesis was formed for any $a > 1$, i.e. and at the same time a may not be a primitive root. According to Artin's generalized theory, the following equality is true:

$$\pi(x, a, i) = c(x, a, i) \cdot \pi(x) \quad (11)$$

where $a > 1$, i is the index of the subgroup of the group $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ of primes in the classification of prime numbers generated by the numbers a , $c(a, i)$ is a constant. According to the classification built in [6]:

$$\mathcal{P}(a, i) = \{p \in \mathcal{P} \mid (p-1)/\text{card}_a(p) = i\} \quad (12)$$

where $\text{card}_a(p)$ is the length of the dynamic recursion $x_{n+1} \equiv ax_n \pmod{p}$ at $x_0 = 1$, $\mathcal{P}$ is the set of all primes.

It is not difficult to show that for any $a > 1$ the equality:

$$\sum_{i=1}^{\infty} c(a, i) = 1 \quad (13)$$

This means that primes are evenly distributed in classes $\mathcal{P}(a, i)$ for any a . By uniformity is meant that within each class of primes $\mathcal{P}(a, i)$ a logarithmic law of the distribution of primes is preserved. The constant $c(a, i)$ determines the measure of puncturing prime numbers, based on the value a . If $i = 1$ then a is the primitive root of all primes $\mathcal{P}(a, 1)$. For an arbitrary natural number x , the equality

$$\pi(x, a, i) = c(a, i, x) \cdot \pi(x) \quad (14)$$

Moreover, if $x \rightarrow \infty$, then $c(a, i, x)$ tends to the limit value $c(a, i)$. If we put $i = 1$ then $c(a, 1)$ will be Artin's constant for primitive roots. In this case $a \neq \pm 1$, and $a \neq k^2$ for none $k \in \mathbb{N}$. This is true according to Fermat's theorem [1,2]. Wherein, a is the primitive root of the group of residues $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ for any $p \in \mathcal{P}$ such that

$$\mathcal{P}(a, 1) = \{p \in \mathcal{P} \mid (p-1)/\text{card}_a(p) = 1\}$$

It is important to investigate the classes of primes $\mathcal{P}(a, i)$ for $i > 1$ since in this case the positive integer a will be the primitive root for the subgroups of the group $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ with the index defined by the relations:

$$\mathcal{P}(a, i) = \{p \mid (p-1)/\text{card}_a(p) = \text{ind}_a(p)\} \quad (15)$$

where $\text{ind}_a(p) = i$ is the index of the subgroup of $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$. The classes of primes $\mathcal{P}(a, i)$ have not yet been studied and the distribution of primes in these classes is not known. In [1], an assumption was made that $\mathcal{P}(a, i)$ at $i > 1$ is proportional to $\mathcal{P}(a, 1)$ with a factor of $1/i^2$. Since $i > 1$ is considered, in this case it is important to know the distribution of prime numbers for the value $a = k^2$. This is an important generalization of Artin's hypothesis. At the same time, the probability of:

$$P(p \in \mathcal{P}(a, i)) = |\mathcal{P}(a, i)|/|\mathcal{P}| = c(a, i) \quad (16)$$

membership agrees exactly with the provisions of the theory of probability, and therefore, estimating $c(a, i)$ on the basis of successive statistical tests and the law of large numbers is parity [9 – 12]. The determination of $c(a, i)$ for any a, i using analytical methods is unlikely in the near term. However, the formation and development of experimental mathematics [13 – 15] opens up another way to solve this problem by using computer simulation of nonlinear dynamic processes for the formation of classes of prime numbers. The process of modeling the distribution of primes in classes $\mathcal{P}(a, 1), \mathcal{P}(a, 2), \dots, \mathcal{P}(a, k), \dots$ was reduced to choosing a set of consecutive primes from a set of a sufficiently large sample of these classes. The number of primes analyzed at each interval of natural numbers was chosen to be 500,000. This choice was largely due to the fact that it was previously established that reducing this value leads to more significant fluctuations in estimates, although convergence to the limit over the entire set of any intervals, even if they are not placed consistently, has the same character. The process of statistical testing of $p \in \mathcal{P}$ primes for checking their belonging to class $\mathcal{P}(a, i)$ was reduced to calculating for the selected number p the recursive procedure $x_0 = 1, x_{n+1} = ax_n \pmod{p}$ until the pairs $ax_i \equiv 1 \pmod{p}$ were reached at some step i . Then $\text{card}_a(p) = i$ and according to Fermat's theory and the cyclic group theorem the number $p - 1$ is divisible by i and then $\text{ind}_a(p) = (p - 1)/\text{card}_a(p) = i$, and therefore $p \in \mathcal{P}(a, i)$ and if $i = 1$, then a is the primitive root of the cyclic group $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$, and otherwise it is the primitive root of some subgroup. At $i > 1$, we obtain the primitive roots of the subgroups of the $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ residue group with the index $i > 1$. The study of the distribution law of prime

numbers p on their belonging to $\mathcal{P}(a, i)$ had the character of consistent statistical tests on the set of natural numbers containing the first 500,000 primes. At the first stage, primes p were chosen from the set $\{p_1, p_2, \dots, p_{500000}\}$. With this $x = p_{500000}$. For each $n \in \{2, \dots, x\}$, we had to solve two problems: check n for simplicity, and if $n = p \in \mathcal{P}$, then $p - 1$ was decomposed into simple factors, i.e. systematically solved two non-simple problems of checking numbers for simplicity and decomposition into simple factors. An effective algorithm for solving them was created based on probabilistic methods in the theory of elliptic curves. As a result of analyzing $a \in \{2, \dots, x\}$, $\mathcal{P}(a, 1), \dots, \mathcal{P}(a, l)$ sets were obtained for some $l < x$ and absolutely exact values of their powers were calculated, i.e. $|\mathcal{P}(a, 1)|, \dots, |\mathcal{P}(a, l)|$, and then estimates of:

$$c(a, 1, x) = |\mathcal{P}(a, 1, x)| / \pi(x), \dots, c(a, l, x) = |\mathcal{P}(a, l, x)| / \pi(x)$$

$\eta \mu \epsilon \ c(a, 1, x) \rightarrow c(a, 1), \dots, c(a, l, x) \rightarrow c(a, l) \ \omega \iota \tau \eta \ x \rightarrow \infty \ \omega \epsilon \rho \epsilon \ \sigma \beta \tau \ \alpha \iota \nu \epsilon \delta.$

At the next stage, work was also carried out for prime numbers from the $\{p_{500001}, \dots, p_{1000000}\}$ interval and the values of the $c(a, 1), \dots, c(a, l)$ constants were calculated using the same scheme. At the same time l increases. The $\{p_1, \dots, p_{500000}\}$ and $\{p_{500001}, \dots, p_{1000000}\}$ sequences were combined, and the estimates of the generalized Artin constants were again calculated and the process of their refinement was studied on the basis of the theory of large numbers in probability theory. In the process of estimating the $c(a, i)$ constants, two important theorems were proved:

Theorem 1. For any $a \in \{2, 3, \dots, k, \dots\}$ that is not a square, i.e. $a \neq k^2$ The number of non-empty classes of primes tends to infinity at $x \rightarrow \infty$.

Theorem 2. For any $a \in \{2, 3, \dots, k, \dots\}$ that is not a square, i.e. $a \neq k^2$ The number of prime numbers in $\mathcal{P}(a, i)$ tends to infinity at $x \rightarrow \infty$.

These theorems are the basis of the convergence of a sequence of statistical tests to marginal values. Since for any $x \in N$ it is obvious that:

$$c(a, 1, x) = |\mathcal{P}(a, 1, x)| / \pi(x), \dots, c(a, l, x) = |\mathcal{P}(a, l, x)| / \pi(x) \quad (17)$$

$$\bigcup_{i=1} \mathcal{P}(a, i) = \pi(x) \quad (18)$$

at $i \neq j$, it follows from this that:

$$\mathcal{P}(a, i) \cap \mathcal{P}(a, j) = \emptyset \quad (19)$$

and this is true for all values of $x \rightarrow \infty$. The review [5] provides an estimate of $c(2,1)$, which is identified by $c(2,1)$ in our sense, but $c(2,1)$ differs from the estimate of $c(2,1)$ starting from the fifth decimal place and this is a theoretical error of the survey works. For different $a \in \{2,3,5,6,7,8,10,11,\dots\}$, the behavior of the $c(a,i)$ constants is complex group-theoretic and number-theoretic. The study of their dynamic properties is beyond the scope of this work. It should be noted that the results of computer simulation of the processes of distribution of primes are calculated with an accuracy of the eleventh decimal place for estimates of $c(2,1), c(3,1), c(5,1), c(6,1), \dots$ values. This cannot be asserted for classes by the $i \geq 2$ index. To achieve the same accuracy with $i \geq 2$, it is necessary to significantly increase the number of prime numbers. With an increase in the i class index $\mathcal{P}(a,i)$ more than three requirements and the volume of the analyzed primes increases in accordance with the unexplored laws. Probability-theoretic interpretation of the constant:

$$\sum_{i=1}^k c(a, i) = 1 \quad (20)$$

Consider the probability space $(\Omega, F, \mathcal{P})$ based on:

$$c(a) = \frac{\pi(x, a)}{\pi(x)} \text{ at } x \rightarrow \infty \quad (14)$$

Consider the probability space $(\Omega, F, \mathcal{P})$ based on:

$$\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_n, \dots\} = \{p_1, \dots, p_n, \dots\} = \mathcal{P} \quad (15)$$

Obviously at $x \rightarrow \infty$ the numbers are $\pi(x) \rightarrow \infty$, $\pi(x, a) \rightarrow \infty$, but:

$$\pi(x, a) = |\mathcal{P}(a, 1, x)|, \pi(x) = |\mathcal{P}(x)|, c(a, 1, x) = \frac{|\mathcal{P}(a, 1, x)|}{|\mathcal{P}(x)|} \quad (16)$$

and at $x \rightarrow \infty$ it is obvious that:

$$|\mathcal{P}(a, 1, x)| / |\mathcal{P}(x)| \rightarrow c(a, 1) \quad (17)$$

is where $x \in \mathcal{P}$, $\mathcal{P} \rightarrow \infty$,

$$\mathcal{P}(a, i, x) = \{p \mid p \leq x \text{ \& } (p-1)/\text{card}_a(p) = i\} \quad (18)$$

is at $x \rightarrow \infty$ $\mathcal{P}(a, i, x) \rightarrow \mathcal{P}(a, i)$. Thus:

$$c(a) = \lim_{x \rightarrow \infty} \pi(x, a) / \pi(x) \quad (19)$$

It follows from Artin's hypothesis that with $c(a, 1)$ there is precisely the probability of a random event $\mathcal{P}(a, 1)$ consisting of a choice of $\Omega = \{p_1, \dots, p_n, \dots\}$ of a prime number p for which a is an original root of the cyclic group $(Z/pZ)^*$. To estimate this probability, the law of large numbers and the method of successive statistical tests were used. The essence of the method is that the first test group was reduced and calculated for $\{p_1, p_2, \dots, p_{500000}\}$ for each $a \in \{2, 3, \dots, 16\}$ evaluation of the values of $c(a, i, x)$ at $x = p_{500000}$ for all possible values of $i = \{1, 2, \dots, k, \dots\}$, that is, $\tilde{c}_1(a, 1, x), \dots, \tilde{c}_k(a, k, x), \dots$ was calculated on the next iteration, the same tests were performed for the second iteration on the set $\{p_{500001}, \dots, p_{1000000}\}$. $\tilde{c}_1(a, 1, x), \dots, \tilde{c}_k(a, 1, x), \dots$ Estimates were obtained at the same time $\tilde{c}_1(a, 1, x), \dots, \tilde{c}_k(a, k, x), \dots$, provided that the first and second samples were combined and computed values and were determined by $|\tilde{c}(a, i, x) - \tilde{c}(a, 1, x)| \leq \varepsilon$ for all x . The main focus was on $c(a, 1, x)$. As a result of some iterations, it was found that for all a the estimates obtained:

$$\mathcal{P}(x) = \{p \mid p \leq x\} \quad (20)$$

$$\mathcal{P}(a, i, x) = \{p \mid p \leq x \ \& \ (p-1)/\text{card}_a(p) = i\} \quad (21)$$

the order of the cyclic group of the subgroup $(Z/pZ)^*$. If $l = p - 1$, then a is an original root, and if $l < p - 1$ is the original form of the $c(a)$ Artin measure, $c(a, i)$ is a measure of classes by $\mathcal{P}(a, i)$ in $\mathcal{P}$. At that $c(a, i) = |\mathcal{P}(a, i)| / |\mathcal{P}|$ and at the same time:

$$\sum_{i=1}^{\infty} c(a, i) = 1 \text{ for all } a > 1 \quad (22)$$

This applies only to classes with indexes $i = 1$. For $i \geq 2$ it is necessary to increase the number of statistical tests. This is naturally due to the fact that the classes $\mathcal{P}(a, i, x)$ for $i \geq 2$ from numerical theorems contain less than prime numbers. In [1] it is stated that this decrease should be of the order of $1/i^2$ [15], but this is an erroneous assertion. This is clearly seen from table 1. The degree of decline essentially depends on the properties of a and requires

a separate study. Case $a \in \{4,9,16\}$ requires separate investigations, because these numbers cannot be primitive roots of that number p , in accordance with the Fermat theorem [3] cannot be generating elements of groups $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$. However, they are generating elements of the subgroups of the group $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ with even indices. All classes with odd indices are empty sets. Table 1 shows the constants for $c(a,1)$ for all a except $\{4,9,16\}$. Analysis of the table. The table contains over a thousand columns. The analysis of these data is numerically theoretical and group-specific and goes beyond the scope. The simulation process of the dynamics of the formation of prime numbers was constructed on the following assumptions. Suppose that an ordered set of prime numbers $\mathcal{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_k, \dots\}$ is given, whose elements are ordered in ascending order. All this set was split into a subset of 500,000 primes. The number of 500,000 is due to the limitations of MS Excel, as a statistical analysis tool, on a number of characteristics of the process of generating prime numbers. Only one restriction is important. We always select 500,000 consecutive primes of the set $\mathcal{P}$. In the current version of Excel, this number can be increased to one million. If you use a powerful computer, you can choose a larger number instead of a million. The implemented version of the study of dynamic processes for the formation of primes includes the following indicators: the number of a simple number in the p in the ordered set of $\mathcal{P}$, the value of a simple number of p , the value of the recursion length of the numbers $card_a(p)$ at the same value of a for all prime numbers $\mathcal{P}$, the index $ind_a(p)$ of the index of the class:

$$ind_a(p) = (p-1)/card_a(p) \quad (23)$$

the value of the residues modulo any natural module $n > 1$, for all classes and any other analytic properties of primes or factors of the decomposition of the number of $p-1$ into simple factors. For each simple multiplier p_i in the:

$$p-1 = \prod_{i=1}^n p_i^{\alpha_i} \quad (24)$$

decomposition, one parameter of the dynamic process of generating primes is presented, with separate indicators that can be analyzed for any other indicators, the values for them are deducted by the modulus of the natural number $n > 1$. The only exception is $ind_a(p)$. The number of controlled indicators analyzed in the Excel environment can be expanded. The iterations

process is continued until an analytically based solution of the generated hypothesis is obtained. Since the Artin generalized hypothesis is considered in the paper, we present the results of the estimation of the constant $c(a, i)$ for the case $a = 4$ and $i = 2$. The number $a = 4$ is a perfect square, and therefore it cannot be a primitive root. In terms of Artin's generalized hypothesis, this is as interesting and important as in the case when a is an original root. Based on the data presented in [6], we obtained estimates for $c(a, i)$ for $a \in \{2, 3, \dots, 32, 53\}$ and $i = 1, 2, \dots, 10$. It is shown that their values are stable for class $\mathcal{P}(4, 2)$ i.e. class with $\text{ind}_4(p) = 2$ to within a fourth decimal place. The estimates for the $c(a, i)$ constants given in table 1 have the unique $i = 1$ property, which is that for $a \in \{2, \dots, 32, 53\}$ they coincide with the accuracy of the third decimal place. The data in Table 1 allow us to make an important conclusion that there are many primitive roots for which the generalized Artin constant $c(a, 1)$ is equal to the same value 0.3739.... The generalized Artin hypothesis for all classes $\mathcal{P}(a, 1), \dots, \mathcal{P}(a, i), \dots$ will require additional studies based on probabilistic computer simulation on the set of prime numbers of data beyond the limits of the first hundred million.

The results of experimental mathematics in table 1 of the first iteration confirm that Artin's hypothesis is correct. The estimates of the constants are obtained with the accuracy of the third decimal place. For $a \in \{2, 3, \dots, 32, 53\}$ the:

$$\sum_{i=1}^{\infty} c(a, i) = 1 \quad (25)$$

and for $a \in \{4, 9, 16, 25\}$ all $c(a, 2i + 1) = 0$ and:

$$\sum_{i=1}^{\infty} c(a, 2i) = 1 \quad (26)$$

This is due to the fact that for all $a = k^2$ this is true because they are primitive roots of $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ groups, but primitive roots of their subgroups with even indices [3]. The results obtained are the basis for constructing an analytical proof of Artin's hypothesis and its general. The $c(a, 1)$ ratings given in the table for the set of primitive roots $\{2, 3, \dots, 16\}$ are obtained for the first time based on the results of computer simulation. The literature is

known estimation $c(2,1)$, which, starting from the fourth decimal place, is estimated analytically incorrect, due to the fact that the formula:

$$c(2,1) = \prod_{p \in \mathcal{P}} \left(1 - \frac{1}{p \cdot (p-1)} \right) \quad (27)$$

is not true, because it includes all primes and among them those primes for which $a = 2$ is not a primitive root [5]. An important result is the creation of a computer model of the process of forming classes $\mathcal{P}(a,1), \dots, \mathcal{P}(a,i), \dots$. For any values of $a > 1$, the interactions between the classes Table 2 and Table 3 are investigated (as a continuation). The first estimates were $c(a,i)$ for $i \geq 2$, and it was established that the statement that $c(a,i)$ is proportional to $1/i^2$ is absolutely false [1]. Obtaining the results is the basis for further deepening research on the Artin's hypothesis using analytical methods.

3. DYNAMIC PROPERTIES OF FORMATION OF CLASSES OF PRIME NUMBERS IN THE GENERALIZED ARTIN HYPOTHESIS

In accordance with the developed mathematical model for the formation of base classes of primes on the basis of $a > 1$ and the calculated values of the generalized constants $c(a,i)$ for $i \geq 1$, as a result of computer simulation it was established that the generalized hypothesis is true. Table 1 shows the values of the Artin constants, the relationship between classes, the dynamics of the formation of classes and its properties on the set of all primes $\mathcal{P}$. Actually, the modeling of $\mathcal{P}(a,i)$ classes was carried out for many $a \in \{2, \dots, 32, 53\}$. Numbers $a \in \{4, 9, 16, 25\}$ as squares of numbers according to Fermat's theorem [2] cannot be primitive roots of $p \in \mathcal{P}$, and, accordingly, of residue groups $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ modulo p . Particular attention was paid to the numbers $\{5, 13, 17, 29, 53\}$ due to the fact that they belong to the class of numbers of the Chebyshev type [1,2] that is, they have representations $p = 4k + 1$, while $p \in \mathcal{P}$, and the number n is a natural number. According to Chebyshev's assumption, the behavior of these numbers in residue classes modulo a prime number should differ from other primes. To solve the problem of modeling classes of primes on a given basis and evaluating the generalized constants of Artin $c(a,i)$, an Excel-based software package was created that allows you to extend the modeling process to any natural numbers $a > 1$, and any set of consecutive primes whose power is a multiple of 500,000. This is the number of primes was chosen for the reason that it is statistically represented and provides an accurate representation of the dynamic processes of the formation of classes $\mathcal{P}(a,i)$. Table 1 shows the results of the simulation process for $a \in \{2, 3, 5, 8, 12\}$ values, $a = 2$ is included in this set

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

for the reason that it can be verified that the estimate [5,6] is different from the exact value.

Table 7. The distribution of prime numbers in the generalized Artin hypothesis

a	$P(a,1)$	$P(a,2)$	$P(a,3)$	$P(a,4)$	$P(a,5)$	$P(a,6)$	$P(a,7)$	$P(a,8)$	$P(a,9)$
2	0,3740	0,2805	0,0664	0,0467	0,0189	0,0498	0,0089	0,0351	0,0074
3	0,3739	0,2992	0,0666	0,0561	0,0190	0,0332	0,0089	0,0140	0,0074
4	0	0,5609	0	0,0935	0	0,0997	0	0,0701	0
5	0,3937	0,2657	0,0700	0,0664	0	0,0473	0,0094	0,0166	0,0078
6	0,3741	0,2805	0,0665	0,0748	0,0189	0,0498	0,0089	0,0140	0,0074
7	0,3741	0,2827	0,0664	0,0684	0,0188	0,0503	0,0089	0,0170	0,0074
8	0,2243	0,1683	0,1995	0,0281	0,0114	0,1496	0,0054	0,0211	0,0222
9	0	0,5983	0	0,1122	0	0,0666	0	0,0281	0
10	0,3741	0,2804	0,0665	0,0713	0,0189	0,0499	0,0089	0,0166	0,0074
11	0,3741	0,2813	0,0664	0,0695	0,0189	0,0500	0,0089	0,0173	0,0074
12	0,3740	0,2991	0,0665	0,0561	0,0189	0,0333	0,0090	0,0140	0,0074
13	0,3764	0,2787	0,0670	0,0697	0,0191	0,0495	0,0090	0,0174	0,0074
14	0,3739	0,2806	0,0665	0,0707	0,0189	0,0498	0,0089	0,0171	0,0074
15	0,3739	0,2796	0,0665	0,0708	0,0189	0,0508	0,0089	0,0177	0,0074
16	0	0,3740	0	0,1869	0	0,0664	0	0,1403	0
17	0,3754	0,2794	0,0667	0,0698	0,0190	0,0497	0,0090	0,0175	0,0075
18	0,3740	0,2805	0,0664	0,0467	0,0189	0,0498	0,0089	0,0350	0,0074
19	0,3739	0,2808	0,0665	0,0700	0,0189	0,0499	0,0089	0,0175	0,0074
20	0,3936	0,2657	0,0700	0,0664	0	0,0472	0,0094	0,0166	0,0078
21	0,3722	0,2819	0,0681	0,0705	0,0188	0,0486	0,0107	0,0176	0,0076
22	0,3740	0,2805	0,0665	0,0704	0,0189	0,0499	0,0089	0,0174	0,0074
23	0,3741	0,2808	0,0664	0,0699	0,0189	0,0499	0,0089	0,0175	0,0074
24	0,3740	0,2805	0,0665	0,0748	0,0189	0,0498	0,0089	0,0140	0,0074
25	0	0,5708	0	0,1328	0	0,1015	0	0,0333	0
26	0,3741	0,2805	0,0664	0,0702	0,0189	0,0499	0,0090	0,0174	0,0074
27	0,2244	0,2244	0,1994	0	0,0113	0,0997	0,0054	0	0,0222
28	0,3740	0,2828	0,0665	0,0684	0,0188	0,0503	0,0090	0,0171	0,0074
29	0,3745	0,2801	0,0666	0,0700	0,0189	0,0498	0,0089	0,0176	0,0074
30	0,3740	0,2805	0,0665	0,0699	0,0189	0,0499	0,0089	0,0178	0,0074
31	0,3741	0,2806	0,0665	0,0701	0,0188	0,0499	0,0089	0,0175	0,0074
32	0,2953	0,2214	0,0524	0,0369	0,0945	0,0394	0,0070	0,0277	0,0058
53	0,3740	0,2804	0,0665	0,0701	0,0190	0,0498	0,0090	0,0175	0,0074

The difference begins with the third decimal place. This fact is important due to the fact that expression (5), although from an asymptotic point of view is close to the exact value of $c(2)$, nevertheless, it does not take into account all the features of the formation of classes $\mathcal{P}(a,1)$ for $a = 2$. The number

$a=5$ is interesting because $a=5=4 \cdot 1+1$ is the smallest Chebyshev number, which is as sensitive as possible to the established fact that all classes $\mathcal{P}(5, 10k+5)$ for $k \geq 0$ are empty. This is true for all Chebyshev numbers. The proof of this fact is of a theoretical number, and therefore, is not given. The numbers $a=8, 27, 32$ are interesting for the reason that the dynamic properties of the classes $\mathcal{P}(8, i)$ are radically different from the other classes studied. In particular, it was established that if $a=8$ is the primitive root of $p \in \mathcal{P}$, then $a=2$ is also the primitive root of the same prime number. Conversely, if $a=2$ is the primitive root of $p \in \mathcal{P}$, then $a=8$ will be either the same primitive root of p or $p \in \mathcal{P}(8, 3)$. This is completely new information about the generalized Artin constants. The developed approach allowed us to obtain fundamentally new results in modern number theory, and as a consequence of modern cryptography. In conclusion, look back at Table 1 from a different theory of vision. The essence of a fundamentally new fact is that wherever 500,000 primes $p \in \mathcal{P}$ are selected for any $a > 1$, the number of primes in classes ranges from no more than 500, which is no more than a thousandth of them. This means that on any set of consecutive primes we obtain an estimate of the Artin constants up to the fifth decimal place. Statistical summation of values over the entire set of the first ten million primes made it possible to obtain estimates of the constants $c(a, 1)$ accurate to the eighth decimal place. It follows that the methods of computer modeling the processes of forming classes of primes $\mathcal{P}(a, 1), \mathcal{P}(a, 2), \dots, \mathcal{P}(a, i), \dots$ and estimating constants $c(a, 1), c(a, 2), \dots, c(a, i), \dots$ are the basis for the development of information technologies in modern pure and applied mathematicians. An interesting result is the equality of constants:

$$\begin{aligned} c(2, 1) &\cong c(3, 1) \cong c(6, 1) \cong c(7, 1) \cong c(10, 1) \cong c(11, 1) \cong c(12, 1) \cong \\ c(14, 1) &\cong c(15, 1) \cong c(18, 1) \cong c(19, 1) \cong c(22, 1) \cong c(23, 1) \cong \\ c(24, 1) &\cong c(26, 1) \cong c(28, 1) \cong c(30, 1) \cong c(31, 1) \cong c(53, 1) \dots \end{aligned} \quad (28)$$

accurate to one thousandth, although $c(8, 1)$ and $c(5, 1)$ are radically different. On the basis of modern number theory and the theory of random processes, the validity of such results is proved. Evidence of these allegations of remoteness is built only on the basis of data obtained as a result of computer modeling. The dynamic properties of the values of other classical Artin's constants confirm the assumption that there is no universal law of their

formation. The generalized Artin's constants $c(a, i)$ for $i > 1$ obey even more complex laws and will be the subject of further research.

4. CONCLUSION

Based on the analysis of the processes of formation of classes of primes for any bases, fundamentally new information technologies were created for solving complex mathematical problems using methods of modern experimental mathematics. The correctness of the developed approach and computational efficiency are proved. A generalized theory of Artin's hypothesis has been developed which its classical version is a very special case. Estimates of the Artin constants for bases greater than two are obtained, and the statistical validity of the estimates obtained is proved. A detailed analysis of the classes of primes is carried out and the foundations of effective methods for the structural analysis of classes are created. It is proved that a new method for modeling the dynamics of the formation of classes of primes and a description of their properties creates the basis for constructing more advanced models of pseudo-prime number generators, the development of new methods of information protection in modern cryptography, opens up new possibilities for constructing models of nonlinear dynamic systems.

REFERENCE

- [1] Crandall R., Pomerance C. (2005) Prime Numbers A Computational Perspective. Springer Science, Portland, pp 663.
- [2] Manin Yu. I., Panchishkin A. A. (2009) Introduction to the modern theory of numbers. MTSNM. Springer, pp 528.
- [3] Vostrov G., Opiata R. (2019) Computer modeling of dynamic processes in analytic number theory, International Symposium Computer Data Analysis and Modeling Stochastic Processes, Minsk, pp 240-247.
- [4] Ambrose D. (2014) On Artin's Primitive Root Conjecture. Dissertation zur Erlangung des mathematisch -Naturwissenschaftlichen Doctorgrades "Doctor rerum naturalium" der Georg-August-Universität Göttingen, pp 169.
- [5] Artin E. (1982) Collected papers. Edited by Serge, Lang and T. John, Springer-Verlag, New York.
- [6] Hooley C. (1973) Application of sieve methods to the theory of numbers. Cambridge, London, pp 1–234.
- [7] Moree P. (2012). Artin's Primitive root conjecture a survey, arXiv: math/0412262v2, pp 1–86.
- [8] Zagier D., (1977) First 50 million prime numbers, Math Intell, pp 42-71.
- [9] Cohen H., Number Theory. vol. 2, (2007) Analytic and modern tools .Springer-Verlag, New-York, pp 637.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[10] Mitzenmacher M., Upfal E., (2005) Probability and Computing. Randomized Algorithms and Probabilistic Analysis. Cambridge University Press, pp 356.

[11] Habib M., McDiarmid C., Ramirez-Alfonsin J., Reed B., (1998) Probabilistic Methods for Algorithmic Discrete Mathematics. Springer, pp 344.

Skorochod A.V., Hoppensteadt F., Habib S., (2002) Random Perturbation Methods with Application in Science and Engineering. Springer, pp 496.

[12] Bailey D. H., Bauscke H. H., Thera M., Vanderwerff J. D., (2013) Computational and Analytical Mathematics. Springer. New York, pp 692.

[13] Borwein J., Bailey D. H., Girgensohn R., (2005) Experimentation in Mathematics. Computational Path to Discovery. Printed in Canada, pp 371.

[14] Borwein P., Choi S., Rooney B., Weirathmueller A., (2008) The Riemann Hypothesis. Canadian Mathematical Society. Springer, pp 541.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ В КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБРАЗОВАНИЯ КЛАССОВ ПРИМОВ И ОЦЕНКИ КОНСТАНТ ОБОБЩЕННОЙ ГИПОТЕЗЫ АРТИНА

К.т.н. Востров Г.Н., Опята Р.

Аннотация. Исследуется взаимосвязь между процессами формирования классов простых чисел в обобщенной гипотезе Артина, основанной на теории рандомизированных алгоритмов вероятностного метода. Доказано, что вероятностные методы являются основой для построения компьютерных моделей классов простых чисел в соответствии с обобщенной гипотезой Артина. Разработаны методы вычисления констант Артина и установлена сходимость оценок констант по вероятности к предельным значениям. Созданы основы теоретико-числового анализа констант Артина и связанных с ними классов.

Ключевые слова: обобщенные классы Артина, константы Артина, вероятности классов, устойчивость оценок констант Артина, сходимость по вероятности.

МОВІРНІ МЕТОДИ У КОМП'ЮТЕРНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ФОРМУВАННЯ КЛАСІВ ПРИМУЛІВ І ОЦІНКИ КОНСТАНТ УЗАГАЛЬНЕНОГО ГІПОТЕЗУ АРТИНУ

К.т.н. Востров Г.М., Опята Р.

Анотация. Досліджено взаємозв'язок між процесами формування класів простих чисел в узагальненій гіпотезі Артіна на основі теорії рандомізованих алгоритмів імовірнісного методу. Доведено, що імовірнісні методи є основою побудови комп'ютерних моделей класів простих чисел відповідно до узагальненої гіпотези Артіна. Розроблено методи розрахунку констант Артіна та встановлено збіжність оцінок констант імовірності до граничних значень. Створено основи теоретичного аналізу констант Артіна та суміжних класів.

Ключові слова: узагальнені класи Артіна, константи Артіна, ймовірності класів, стійкість оцінок констант Артіна, збіжність у ймовірності

**КОГНИТИВНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ
ЖИВУЧЕСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**
Д.т.н. Вычужанин В.В., Вычужанин А.В., к.т.н. Козлов А.Е.

Аннотация. В статье рассмотрены известные модели живучести сложных технических систем. Принципы построения когнитивно-импульсной модели оценки их живучести. Описан разработанный метод поражающего и диагностирующего импульсов, а также метод оценки структурных и функциональных угроз элементам сложных технических систем. Приведено разработанное программное обеспечение когнитивно-импульсного моделирования и результаты его применения. Представлены результаты исследования когнитивно-импульсной модели оценки живучести сложных технических систем. Разработанная методика позволяет по когнитивной карте с помощью импульсного моделирования определять угрозы и риски, влияющие на живучесть систем. Методика позволяет определять численные значения оценки угроз и риска отказов элементов сложных технических систем.

Ключевые слова: сложные технические системы, риск отказа, модель, когнитивно-импульсное моделирование, программное обеспечение.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные сложные технические системы (СТС) состоят из многочисленных взаимодействующих друг с другом разнородных элементов, число которых может достигать десятков тысяч. При проектировании и эксплуатации СТС требования, предъявляемые к таким системам, постоянно ужесточаются. Это связано с риском отказов, аварий и катастроф при эксплуатации технических систем.

2. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

С точки зрения концепции безопасности СТС необходимо изучать с позиций надежности, живучести. При изучении живучести СТС используются вероятностные модели, в рамках математической теории надежности, и детерминистические, в рамках механики катастроф. Нарушение функционирования таких систем возможно при нарушении связности их структур. Система не может выполнять свои функции, когда отсутствуют взаимодействия между всеми или жизненно важными элементами. Среди используемых в настоящее время моделей живучести можно выделить следующие: нормативный подход, вероятностные и детерминированные модели живучести, деревья отказов, логико-вероятностные и аналитические методы оценки живучести [1-8]. Для оценки живучести могут быть использованы методы работы со структурированными объектами и нечеткими знаниями. На практике перечисленные методы редко встречаются в чистом виде — поэтому

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

одними из самых распространенных систем оценки живучести являются комбинированные системы (например, сочетающие нормативный и логико-вероятностный подходы). Наиболее разработанными являются методы ЛВМ (логико-вероятностные модели) и деревья отказов. Еще одним быстро развивающимся направлением является когнитивно-имитационное моделирование [7,9,10]. Эффективная диагностика СТС невозможна без учета структурных и функциональных связей их подсистем и элементов [11,12]. Для этого оценки риска отказа СТС должна учитывать деление систем на подсистемы (комплексы, агрегаты) и элементы (узлы и детали). В составе подсистем могут рассматриваться структурно и функционально завершенные составные части системы, взаимодействие которых должно обеспечивать ее надежную работу. Каждый элемент СТС связан с другими элементами определенным образом. Поэтому при оценке риска отказов элементов, подсистем СТС необходимо выявить их взаимосвязи и взаимодействия, проводя структурный анализ системы. При исследованиях модели СТС можно установить особенности функционирования системы в различных эксплуатационных условиях и снижать риск отказов ее подсистем и элементов. Если рассмотреть проблему оценки риска отказов при диагностике состояния СТС с точки зрения синергетики, а также теории управления рисками, тогда математическая модель системы должна содержать основные элементы, влияющие на ее качество, эффективность функционирования. В терминах синергетики это параметры порядка моделируемого объекта. Такой подход в исследованиях, без детализации СТС, процессов и явлений, в них протекающих является системным синтезом. В целях обеспечения живучести СТС в различных условиях эксплуатации, успешного исследования надежности систем при их переходах между различными вариантами состояния необходимо дальнейшее развитие методов диагностики СТС, учитывающих структурные и функциональные взаимосвязи и взаимодействия подсистем и элементов СТС [13,14]. Необходима разработка методов и моделей, новых решений по информатизации диагностики технического состояния сложной системы для обеспечения: гибкости - возможность использования методов на любом уровне оценки риска отказов компонентов подсистем СТС при различных их конфигурациях; адаптивности - методы должны обладать способностью адаптации при изменениях конфигурации подсистем сложных технических систем [15-20].

Таким образом, остается актуальным при диагностике технического состояния решение задачи обеспечения живучести систем на основе оценки риска отказов компонентов и в целом СТС при поступлении информации об отказах в компонентах.

3. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОГНИТИВНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В целях оценки риска отказов элементов, подсистем СТС, с учетом их структурных и функциональных взаимосвязей и взаимодействий предлагается использовать системный синтез систем на основе вероятностно-детерминистической модели, описывающей распространение внешних воздействий на элементы системы. Модель основывается на формализации структуры СТС в виде направленного графа - орграфа и внешнего отрицательного влияния на систему в виде импульсного воздействия. В этом случае модели СТС соответствует упрощенная модель, что позволяет рассмотреть влияние внешних воздействий на систему при различных оценках ее неработоспособности (выход из строя ряда элементов системы, достижение элементами системы предельного состояния и т.д.). Общую картину связей между всеми элементами, подсистемами СТС отражает структура системы. Опыт исследования СТС показывает, что на этапе оценки риска отказов элементов системы ее целесообразно представлять в виде орграфа, вершинами которого являются элементы [21,22], обладающие определенными свойствами, а взаимодействие элементов описывать с помощью ребер орграфа. Мера живучести в этом случае это минимальное число элементов СТС (вершинная связность) или связей (реберная связность), выход из строя которых под влиянием внешних воздействий приводит к нарушению связности структуры системы.

Предлагаемый метод использует комплексное когнитивно-импульсное моделирование и взаимодействует с СТС, как с орграфом, подвергаемым импульсному воздействию различных по характеру распространения и изменения импульсов. Моделирование выполняется путем воздействия на орграф модели имитационных единичных моделирующих импульсов (ИМИ). Суть такого моделирования состоит в том, что в одной из вершин орграфа задается определенное изменение. Эта вершина актуализирует всю систему показателей, т.е. связанных с ней вершин. Проходя по вершинам и дугам орграфа, импульс изменяет их состояния и изменяется сам (в зависимости от модели может меняться модуль воздействия импульса). При оценке структурных угроз используется воздействие неизменяющегося поражающего моделирующего импульса (ПМИ), при распространении по орграфу, модифицирующего состояние отдельных узлов. Оценка функциональных угроз производится с помощью диагностирующего моделирующего импульса (ДМИ), который при распространении по графу не оказывает воздействия на узлы, но изменяется сам.

Метод использует понятия угроз и рисков. Угроза - безразмерная

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

внемасштабная оценка «важности», «уязвимости» элемента с точки зрения структурной живучести системы в целом. Живучесть СТС рассматривается, как сочетание двух основных факторов - уязвимости СТС как сложной структуры и вероятности выхода из строя тех или иных компонентов СТС в результате внешних или внутренних неблагоприятных воздействий. Анализ угроз позволяет выявить уязвимости - "слабые места" в структуре СТС. Анализ и моделирование внутренних и внешних воздействий позволяет оценить вероятность выхода из строя каждого из компонентов СТС. Интегральной характеристикой, объединяющей оба фактора живучести, является понятие риска, объединяющее уязвимость СТС, как оценку возможного ущерба от внешних воздействий и вероятность выхода из строя компонентов СТС.

Предлагаемый метод включает в себя следующие пять основных уровней оценки структурных и функциональных угроз (рис. 1) - три основных, один дополнительный и обобщенный уровень системы поддержки принятия решения (СППР). К основным уровням относятся уровень оценки структурных и функциональных угроз, уровень оценки риска и уровень оценки критичности эксплуатации СТС. Дополнительный уровень оценивает пространственную компоновку СТС с точки зрения аварийной ситуации. Уровень СППР интегрирует оценки предыдущих уровней для использования в такой системе.



Рис.1 – Пятиуровневая модель оценки живучести СТС

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Базовыми понятиями в предлагаемом методе являются понятия потенциальных структурной и функциональной угроз. Потенциальная структурная угроза представляет собой оценку положения элемента в структуре СТС и его роль в топологии системы. Функциональная угроза так же учитывает положение и роль элемента в системе, но уже с точки зрения потенциальных изменений в работоспособности системы, где под работоспособностью понимается вероятность успешного выполнения системой задач, после воздействия неблагоприятных и поражающих факторов. В качестве основного критерия функциональной угрозы используется модификация критерия Бирнбаума в применении к оценке живучести, выражающая удельное изменение работоспособности системы по отношению к работоспособности элемента. С позиции классических моделей теории надежности система изучается изолированно от окружающей среды. Т.е. система не подвергается воздействиям внешней среды, а окружающая среда не испытывает на себе воздействий со стороны системы.

В рамках модели, предлагаемой в настоящей работе, сложная техническая система считается подвергнутой влиянию внешних воздействий. Существуют различные виды внешних воздействий, оказывающих влияние на систему. Воздействия могут быть – механические, термические, электромагнитные, биохимические, радиационные, гидродинамические и т.д. (Как правило, основные - первые три из перечисленных). Повышение нагрузки могут наблюдаться не только у тех элементов системы, которые оказались под влиянием внешних воздействий, но и у элементов, взаимодействующих (связанных) с ними. Следует отметить, что речь идет только о нагрузках, не являющихся нормативными, т.е. учитываемыми при проектировании и эксплуатации системы. Кратковременные и мощные внешние (импульсные) воздействия мгновенно и в значительной степени могут уменьшать показатели надежности отдельных элементов и всей системы в целом, но СТС в состоянии сохранить свою работоспособность.

3.1 Метод поражающего и диагностирующего импульсов

В орграфе вершинам соответствуют компоненты (комплексы, системы, подсистемы, элементы), а направленные дуги - их взаимодействие по одному из типов взаимосвязи (передача вещества, информации, либо энергии). Воздействия ПМИ и ДМИ определяются импульсным вектором $imp_j(t)$, $j \in 1, 2, \dots, k$ для дискретного времени $t = 0, 1, 2, 3, \dots$. Импульсный вектор для M - межэлементных связей (МС) и N - элементов в общем виде

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

$$imp_j(t) = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_{M(N)}), j = 1 \dots M(N), \quad (1)$$

где $x_1 \dots x_{M(N)}$ – значения состояний МС (элементов).

Воздействие ПМИ на вершину (ребро) орграфа когнитивно-импульсной модели (КИМ) СТС в дискретный момент времени t определяется

$$1 - imp_j(t) = \frac{w_{a(v)}j(t)}{w_{a(v)}j(t-1) \cdot K_{Vc.n.} \cdot K_{Ac.n.}}, \quad (2)$$

где $imp_j(t)$ – импульсный вектор для вершины и ребра с номером j ; $w_{a(v)}j(t)$, $w_{a(v)}j(t-1)$ – значение веса ребра (вершины) в момент времени t и в предыдущий момент времени $t-1$.

Выражение $1 - imp_j(t)$ представляет собой операцию обнуления соответствующих значений состояний элементов (МС) перед каждой последующей итерацией движения ПМИ по МС. Рекурсивные соотношения, соответствующие изменениям работоспособности элементов СТС за один шаг дискретного времени

$$w_{jN}(t) = (1 - imp_j(t)) \cdot w_{jN}(t-1) \quad (3)$$

$$w_{jM}(t) = (1 - imp_j(t)) \cdot w_{jM}(t-1) \quad (4)$$

При прохождении через МС от вершины V_i к вершине w_j и через вершину от i -й МС к j -й МС импульсы imp_j и imp_i связаны

$$imp_j(t+1) = imp_i(t) \cdot H_m^a(t)$$

(5)

$$imp_j(t+1) = imp_i(t) \cdot H_m^v(t) \quad (6)$$

Завершению распространения ПМИ по орграфу за весь период моделирования соответствует

$$S = \sum_{j=1}^M imp_j(t) = 0. \quad (7)$$

При прохождении ДМИ через элементы с работоспособностью V_i и V_j в моменты времени t импульсные воздействия определяются для соединенных элементов:

- последовательно (до узла v_i), $t+1$ (после прохождения узла v_i),

$t+2$ (после прохождения узлов v_i и v_j)

$$\text{imp}(t+2) = \text{imp}(t+1) \cdot v_j = \text{imp}(t) \cdot v_i \cdot v_j \quad (8)$$

- параллельно (до прохождения узлов v_i и v_j), $t+1$ (прохождения узлов v_i и v_j), $t+2$ (после прохождения точки соединения ребер графа)

$$\begin{aligned} \text{imp}(t+2) &= \text{imp}_i(t+1) + \text{imp}_j(t+1) \\ &= \text{imp}(t) \cdot v_i + \text{imp}(t) \cdot v_j = \text{imp}(t) \cdot (v_i + v_j) \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогичным образом, можно получить соотношения для более сложных последовательно-параллельных структур.

3.2 Оценки структурных и функциональных угроз

Рассмотрим импульсное воздействие на систему, элементы которой имеют живучесть и связи равные единице, с помощью ПМИ. Такое воздействие моделирует поражение объекта номер i импульсом силы 1. В данной системе такое воздействие равносильно полному поражению элемента и его выходу из строя. В единичной системе, поражаемой единичным импульсом, связи между узлами орграфа также являются единичными, поэтому импульс будет распространяться по системе до тех пор, пока не выведет из строя все доступные элементы. Это - случай «наихудшего сценария» для единичного поражающего воздействия. Следовательно, критичность элемента (а вместе с ней и уязвимость системы) можно оценить по тому, насколько большой ущерб наносит его выход из строя для системы в целом. В качестве примера такого воздействия рассмотрим орграф (рис.2)

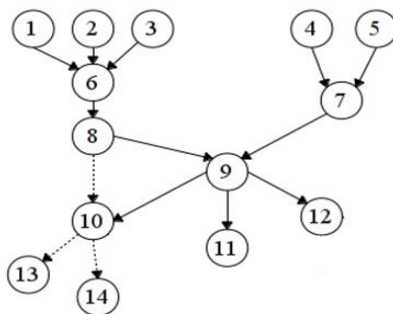


Рис.2 – Орграф СТС

Последовательно воздействуем на каждую из его вершин единичным импульсом и проследим за распространением импульса по орграфу. Например, на рис.2 считаем, что конечная фаза воздействия единичного импульса приходится на узел V_9 . Введем понятие коэффициента структурной уязвимости (КСУ), отражающего первый

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

уровень оценки угрозы системы, позволяя ранжировать элементы СТС по степени структурной значимости и выделить наименее надежные из них. Коэффициент структурной уязвимости для пораженного элемента V_j определяется отношением i пораженных элементов системы ко всем элементам системы N , при единичном поражении выбранного элемента и беспрепятственном распространении импульса по системе. Рассмотрим сценарий поражения единичным импульсом связей системы (предположив, что узлы орграфа имеют единичную проводимость). Импульс будет распространяться по системе до тех пор, пока не выведет из строя все доступные элементы. Отсюда, критичность ребра (а вместе с ней и уязвимость системы) можно оценить по тому, насколько существенен ущерб наносит его выход из строя для системы в целом. Последовательно воздействуем на каждое из ребер орграфа единичным импульсом и проследим за распространением импульса по орграфу. Например, на рис. 2 изображена конечная фаза распространения импульса при поражении связи $E_{8,10}$ (вышедшие из строя связи орграфа обозначены пунктиром). Таким образом, если после поражения элемента $E_{i,j}$ распространяющимся импульсом будет поражено i_e связей, а общее количество связей в орграфе N_e , получим следующее выражение для коэффициента структурной уязвимости k_{se}

$$k_{se}(E_{ij}) = \frac{i_e}{N_e} \quad (10)$$

Оценки структурной уязвимости по узлам и по связям позволяют получить в первом приближении весовую оценку значимости узла или связи для обеспечения живучести системы в целом. Численно такая оценка тем больше, чем уязвимее элемент для системы. В качестве примера, рассмотрим численное моделирование на указанном графе для уязвимостей по объектам для орграфа (рис.2). В результате получены следующие значения коэффициентов структурной уязвимости узлов орграфа

Таблица 1 - Коэффициенты структурной уязвимости узлов орграфа

V0	V02	V03	V0	V0	V06	V07	V08	V09	V10	V11	V12	V13	V14
0.7	0.72	0.7	0.6	0.6	0.64	0.58	0.58	0.52	0.23	0.06	0.2	0.06	0.0

Исходя из полученных результатов (табл.1) в рассматриваемом

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

орграфе, структурно важными являются узлы V01, V02, V03, структурно значимыми — V04, V05, V06, V07, V08, V09, прочие — V10, V12, V11, V13, V14 СТС. При необходимости возможно ранжирование по важности узлов орграфа СТС. Следует отметить, что изменение единичного ДМИ при прохождении по узлам орграфа, при условии, что веса вершин численно равны оценке работоспособности соответствующих объектов, будет численно равно общей работоспособности системы. Следовательно, моделирование прохождения по системе единичного ДМИ позволяет оценивать ее работоспособность по указанным выше критериям.

3.3 Программное обеспечение когнитивно-импульсного моделирования

Для моделирования действия поражающих импульсов на систему были выбраны следующие средства: представление исходных моделей в формате JSON; высокоуровневый язык программирования Python; средства визуализации графов graphviz; утилиты make; средства дистрибутива Debian GNU/Linux. Моделирование проводилось на базе дистрибутива Debian GNU/Linux, с широким использованием средств программной оболочки (makefiles, язык сценариев bash). Утилита использует специальные make-файлы, в которых указаны зависимости файлов друг от друга и правила для их удовлетворения. На основе информации о времени последнего изменения каждого файла make определяет и запускает необходимые программы. Технологически процесс моделирования с использованием make-утилиты выглядел следующим образом: исходная модель формулировалась в терминах формата JSON, затем передавалась на вход программы на python. Результатом работы программы являлся массив таблиц в csv-формате и файлов в формате языка dot. Затем массив dot-файлов с помощью утилиты make пакетно передавался на вход программы graphviz, результатом работы которой был массив соответствующих диаграмм в формате png. Анализ полученных результатов проводился средствами Calc Libre Office. Для моделирования поражающего и моделирующего импульсов было создано два отдельных скрипта, каждый из которых содержит набор общих функций. Обе программы включают в себя основную часть, вспомогательные функции и модуль моделирования ПМИ или ДМИ — в зависимости от целевого назначения программы. Набор вспомогательных функций одинаков для обеих программ и содержит следующие функции: GetJson – выполняет анализ JSON-файла и строит на его основе КИМ; DotFileDot – генерирует dot-файл с поврежденными узлами и проходящими импульсами; DotFile – генерирует последовательность dot-файлов для graphviz; Meet_In_Other –

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

выполняет вспомогательные функции (поиск узла пересекающегося с векторами других узлов); TablesToCsv – выполняет сохранение результатов работы программы в массив csv-таблиц. Для моделирования диагностического и моделирующего импульсов используются подпрограммы HitPulse и DiagPulse соответственно. Программы организованы таким образом, что могут быть вызваны как самостоятельно (в режиме «stand alone»), так и в составе более сложных программных комплексов (в виде подключаемых библиотек языка Python). Дальнейшая обработка полученных результатов выполняется с помощью утилиты GNU make и утилиты визуализации graphviz. Файл в формате языка dot представляет собой текстовое описание графа, в котором задается оформление узлов и связей между ними. Для облегчения пакетной обработки полученных dot-файлов использовался make-файл. Такая схема позволила генерировать как все файлы сразу (по директиве *make* либо *make all*), либо по отдельности (*make st* для ПМИ, *make fun* для ДМИ), а так же производить очистку директории перед запуском нового цикла моделирования (*make clean*). Кроме утилиты GNU make, при моделировании широко использовались утилиты GNU coreutils — в основном для преобразования csv-таблиц к виду удобному для визуализации средствами Calc Libre Office. В основном использовался язык обработки табличных данных GNU awk и утилита paste входящая в пакет GNU coreutils. Результаты моделирования распространения ДПИ по графу приведено на рис.3 для заданной вероятности безотказной работы в течение некоторого промежутка времени для всех вершин графа равными 0.9. В качестве иллюстрации использования программного обеспечения когнитивно-импульсного моделирования на рис. 3 приведена СТС (коммуникационная сеть некоторой системы управления), изображенная в виде графа.

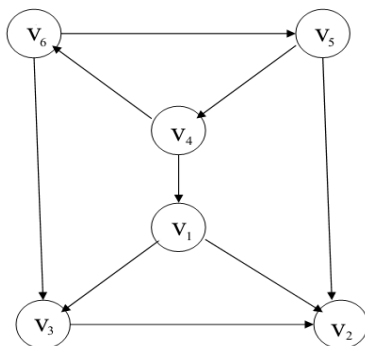


Рис.3 – Граф коммуникационной сети системы управления

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Сеть должна обеспечивать прохождение моделирующего сигнала от вершины v_6 до вершины v_2 . На вершину v_6 подается сигнал, который должен достичь вершины v_2 . Главное событие S – непрохождение сигнала от вершины v_6 до вершины v_2 . Промежуточные события S_i , $i=\{1,2,3,4,5,6\}$, – непрохождение сигнала до вершины v_2 . Задаваясь надежностью (вероятностью безотказной работы в течение некоторого промежутка времени) для всех вершин графа получаем надежность функционирования коммуникационной сети в виде графа

$$P(\ddot{S})=1-(1-P(S_6S_2S_1))(1-P(S_6S_5S_1))(1-P(S_6S_4S_3S_2))(1-P(S_5S_4S_3S_2))(P(S_3S_2S_1)) \quad (11)$$

Событие $\ddot{S}$ противоположное событию S . Таким образом, на базовом уровне структурная угроза живучести оценивается путем последовательного воздействия ПМИ на каждый из узлов системы и далее, вычисления коэффициента структурной угрозы для каждого из узлов. Функциональная угроза живучести каждого из узлов оценивается как отношение суммарного значения ДМИ прошедших по полностью исправной системе и суммарного значения ДМИ при последовательном выведении из строя каждого узла КИМ. Отношение полученных величин (критерий Бирнбаума) позволяет получить коэффициент функциональной уязвимости системы.

3.4 Оценка живучести СТС на базовых и дополнительных уровнях модели

Уровень оценки риска отказов дополняет оценку функциональных угроз с помощью уточнения уровня дополнительной информацией о надежности элементов. При введении в модель информации о надежности элемента появляется новая интегральная характеристика, совмещающая в себе оценку угрозы и оценку надежности - риск. В рамках данной модели выделяются два типа рисков отказов - структурные и функциональные.

Рассмотрим оценку когнитивной карты, в которой находится N элементов, причем каждый из элементов i для $i = 1, \dots, N$ характеризуется вероятностью отказа $p_i(t)$ и распределением работоспособности во времени $f_i(t)$. Пусть диагностирование системы с помощью ПМИ и ДМИ позволило установить, что каждый из элементов i для $i = 1, \dots, N$ характеризуется структурной угрозой $k_s(V_i)$ функциональной угрозой $Ob(i)$. Для момента t известна вероятность $p_i(t)$ смены состояния i -того элемента от исправного состояния к неисправному (она может выражаться разными параметрами. В частности такую оценку можно

получить, используя, например, величину $\frac{n}{\tau}$, равную числу отказов в течении 10^6 часов времени эксплуатации СТС). Тогда, структурный риск отказа r^s_i элемента i может быть выражен через его уязвимость и

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

вероятность отказа

$$r_i^s = k_s(V_i)p_i(t) \quad (12)$$

Общий структурный риск системы может быть определен на основе свертки

$$r^s = \sum_i^N r_i^s p_i(t), \quad (13)$$

где r^s — общий структурный риск отказа СТС, N — число элементов в системе, r_i^s — структурный риск отказа элемента i , $p_i(t)$ — вероятность отказа элемента.

Функциональный риск отказа может быть определен как математическое ожидание функциональной угрозы в зависимости от изменения работоспособности элемента во времени

$$r_i^\theta = \Theta b(i)p_i(t), \quad (14)$$

где r_i^θ - функциональный риск отказа элемента i , $\Theta b(i)$ - функциональная угроза для элемента i , вероятностью смены состояния элемента $p_i(t)$.

Общий функциональный риск отказа СТС может быть определен на основе свертки

$$r^\theta = \sum_i^N r_i^\theta p_i(t), \quad (15)$$

где r^θ - общий функциональный риск отказа СТС, N — число элементов в системе, r_i^θ - функциональный риск отказа элемента i , $p_i(t)$ – вероятность отказа элемента.

Структурные и функциональные риски отказов СТС позволяют получить интегральную оценку живучести, включающую в себя, как понятие угрозы, так и понятие надежности, а так же прогнозировать тенденцию изменения живучести системы во времени - в зависимости от изменения работоспособности и надежности отдельных ее элементов, с учетом разной скорости изменения технического состояния. Для уточнения расчетов модели вводится учет параметра «критичность». Критичностью K названа числовая величина, характеризующая важность объекта для системы, выражающая вероятность того, что неисправность рассматриваемого модуля повлечет за собою выход из строя всей системы. Для i -того элемента K определяется как вероятность перехода системы в неисправное состояние S_n^s при условии отказа i элемента

$$K_i = P(S_n^s | S_n) \quad (16)$$

Как правило, критичность элемента оценивается путем экспертной оценки (в частности методом анализа иерархий). Структурные и функциональные риск отказов для элемента с учетом критичности выражаются через свертку параметров

$$r_i^{ks} = K_i r_i^s = K_i k_s(V_i) p_i(t), \quad (17)$$

где r_i^{ks} — риск отказа для i -того элемента с учетом критичности, K_i — критичность i -того элемента, r_i^s — структурный риск отказа элемента i , $k_s(V_i)$ — структурная угроза для элемента i , $p_i(t)$ — вероятность отказа элемента.

Таким образом, интегральный структурный риск отказа для системы

$$r^{ks} = \sum_i^N r_i^{ks} p_i(t) = \sum_i^N K_i r_i^s p_i(t) = \sum_i^N K_i k_s(V_i) p_i^2(t) \quad (18)$$

3.5. Метод уровня оценки пространственной компоновки в сценариях аварийной ситуации

Для моделирования аварийной ситуации, поражающего одну или несколько пространственных компоновок (ПК) в модель вводится дополнительный уровень элементов, соответствующего единицам ПК объекта. Каждый из ПК-элементов соединяется направленными дугами с проводимостью равной единице для случаев аварии, либо в диапазоне (0;1) при моделировании пространственного поражения ПК разного характера. В простейшем случае когнитивная модель живучести СТС для 17-ти элементов и n ПК-элементов будет выглядеть так, как это показано на рис. 4.

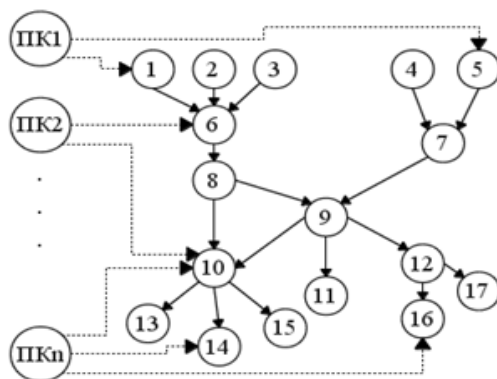


Рис.4 – Орграф из 17 основных элементов и n ПК-узлов

Для простоты на диаграмме не указаны другие ПК-узлы, кроме того,

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ПК-узлы размещены отдельным уровнем — дабы подчеркнуть их роль в работе модели. Аварийная ситуация отказа элемента 2, которому соответствует ПК-узел ПК-2, будет моделироваться как поражение ПК-узла ПК-2. На рис. 5 видно, что такое поражение на первом этапе приведет к выходу из строя узлов СТС 6 и 10, а на следующем этапе — к поражению подчиненного этим узлам участка СТС - оргграф на рис.6

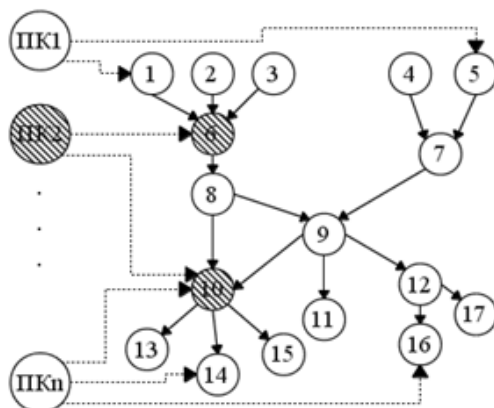


Рис.5 – Поражение ПК-узла ПК2 в первой фазе аварийной ситуации

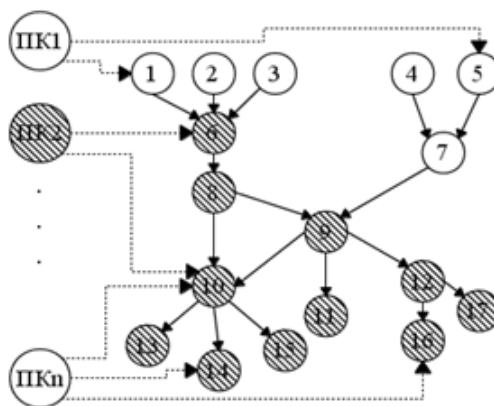


Рис.6 – Поражение ПК-узла ПК2 во второй фазе аварийной ситуации

Таким образом, нижележащие уровни модели оценки живучести используют методы уровня оценки угроз в качестве базового. При

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

моделировании на уровне оценки риска, модель дополняется данными о надежности узлов, при моделировании на уровне оценки критичности - данными о критичности узлов. На дополнительном уровне - при оценке живучести в условиях сценария «экстремальной аварийной ситуации», вводится понятие единиц ПК объекта исследования и данные о пространственной компоновке СТС на месте ее установки.

4. ИССЛЕДОВАНИЯ КОГНИТИВНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДЕЛИ

Для проведения исследований когнитивно-импульсной модели в качестве сложной технической системы выбрана система кондиционирования воздуха (СКВ), функционирующая в «летном» режиме работы (рис. 7) Система состоит из агрегатов: Cm – компрессор; E – электродвигатель; K – конденсатор; V – испаритель; R1, R2 – регулирующие вентили; N – насос; Cn – система управления; A – воздухоохладитель. Отличительной особенностью рассматриваемой модели является неиерархическая структура связей ее агрегатов (наличие замкнутого контура «Cn — K — R1 — V»), а так же наличие связей двух типов — ресурсного (указано на схеме сплошными линиями) и информационного (указано пунктиром).

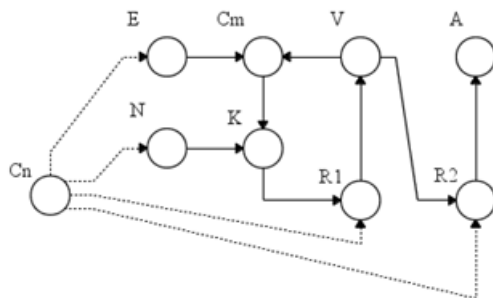


Рис. 7 – Орграф СКВ в летнем режиме работы

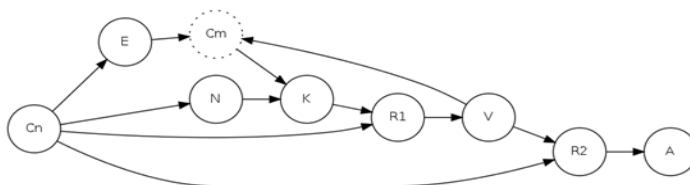


Рис. 8 - Начальная стадия воздействия ПМИ на агрегат Cn КИМ СКВ

Оценка структурных угроз и риска отказа. Для расчета КСУ агрегатов когнитивно-импульсной модели (КИМ) СКВ моделирующие их

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

узлы орграфа последовательно подверглись воздействию ПМИ. Изменения состояний агрегатов для начальной и конечной стадии распространения импульса по орграфу приведены на рис. 8,9 (выведенные из строя агрегаты указаны пунктиром). Для агрегата C_m КСУ $k_s = 0.667$ (табл.2).

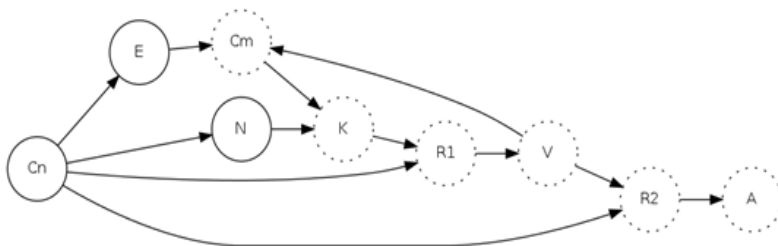


Рис. 9 - Конечная стадия воздействия ПМИ на агрегат C_n КИМ СКВ

Таблица 2. Коэффициенты структурных угроз для агрегатов СКВ

Агрегат	k_s
A	0.111
C_m	0.667
C_n	1.000
E	0.778
K	0.667
N	0.778
R1	0.667
R2	0.222
V	0.667

По рассчитанным значениям КСУ и надежности агрегатов рассчитаны КСР, проведено ранжирование их по структурному риску отказов (табл. 3). Оценка функциональных угроз и риска отказов агрегатов. В рамках когнитивно-импульсного моделирования подвергнем оргграф СКВ воздействию диагностирующего импульса ДМИ и проанализируем его распространение. Примем условную работоспособность всех узлов равную $f = 0.99$. Ранжировав полученные результаты по рискам (табл. 4), установим наиболее ответственные

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

участки системы — агрегаты СКВ, это Е и См. Работоспособность системы в наибольшей степени зависит от состояния этих агрегатов.

Таблица 3. Ранжирование агрегатов СКВ по степени структурного риска

Агрегат	r_s	Агрегат	r_s
См	163,55	R1	9,13
K	76,11	Cn	3,15
N	46,99	R2	3,04
E	32,11	A	2,28
V	18,26		

Таблица 4. Ранжирование агрегатов СКВ по КФУ и КФР

Агрегат	$\Theta b(i)$	$r_{\Theta} \cdot 10^{-3}$	Агрегат	$\Theta b(i)$	$r_{\Theta} \cdot 10^{-3}$
См	0,99999998	0,24533	V	0,34072216	0,00933
E	0,99999998	0,04129	R2	0,00101010	0,00001
N	0,67367395	0,0407	Cn	0,00101010	0,00001
K	0,67367395	0,07691	A	0,00101010	0,00002
R1	0,34072216	0,00466			

Из-за более низкой надежности агрегат К тоже попадает в «группу риска» и нуждается в приоритетном надзоре при эксплуатации, вместе с агрегатами См и Е. При проведении исследований СКВ была рассмотрено для девяти ее агрегатов 18 сценариев, 130 отдельных диаграмм состояния. В результате когнитивно-импульсного моделирования были получены значения оценок структурных и функциональных угроз и риска, установлены уязвимые места в СТС. Исследование СКВ когнитивно-имитационным моделированием позволило определить структурные и функциональный уязвимости и определить «вес» и «вклад» агрегатов в общую живучесть системы с учетом ее компоновки и структуры. Введение показателя надежности позволяет уточнить ранжировку агрегатов по риску и получить данные, которые могут быть использованы, как при эксплуатации системы, так и на стадии ее технического обслуживания, модернизации и проектирования. В соответствии с описанным импульсным воздействием на орграфе, можно ввести различные критерии (признаки) достижения системой предельного состояния. Можно считать, что СТС находится в предельном состоянии, если надежность одного или нескольких наиболее

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

значимых элементов системы, ниже некоторого допустимого уровня (критический уровень надежности элемента). Такой критерий однозначно разделяет докритическое и закритическое состояние элемента СТС. Если надежность элемента ниже критического уровня, то элемент не в состоянии выполнять возложенных на него функций, или функционировать требуемое время. Созданные когнитивно-импульсных моделей позволили обосновать возможность использования методов поражающего и диагностирующего импульсов для оценки живучести СТС, определять значения коэффициентов структурной и функциональной угроз, риска отказов агрегатов СТС.

5. ВЫВОДЫ

Разработанная методика позволяет по когнитивной карте с помощью импульсного моделирования определять угрозы и риски - уязвимые и критичные места системы, влияющие на ее живучесть. Она позволяет определять численные значения оценки угроз и риска отказов элементов СТС. Особенностью разработанной модели является возможность исследования зависимости надежности любого элемента системы от его места в структуре СТС, а также зависимость живучести системы от ее структуры.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Atamanyuk, I., Kondratenko, Y.: Computer's Analysis Method and Reliability Assessment of Fault-Tolerance Operation of Information Systems. In: ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Proceedings of the 11th International Conference ICTERI-2015 // S.Batsakis et al. (Eds.), CEUR-WS, Vol. 1356, pp. 507-522 (2015)
- [2] Atamanyuk, I., Shebanin, V., Kondratenko, Y., Volosyuk, Y., Sheptylevskiy, O., Atamaniuk, V.: Predictive Control of Electrical Equipment Reliability on the Basis of the Non-linear Canonical Model of a Vector Random Sequence. In: Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019, 8896569, pp. 130-133 (2019)
- [3] Hakobyan, A., Aldemir, T., Denning, R., Dunagan, S., et al.: Dynamic generation of accident progression event trees. In: Nucl. Eng. Des., №238, pp. 3457–3467 (2008). doi: 10.1016/j.nucengdes.2008.08.005
- [4] Ibáñez, L., Hortal, J., Qeral, C., Gómez-Magán, J., Sánchez-Perea, M., Fernández, I., et al.: Application of the integrated safety assessment methodology to safety margins. Dynamic event trees, damage domains, and risk assessment. In: Reliab. Eng. Syst. Saf., №147, pp. 170–193 (2015). doi: 10.1016/j.res.2015.05.016
- [5] Mandelli, D., Yilmaz, A., Aldemir, T., Metzroth, K., and Denning, R.: Scenario clustering and dynamic probabilistic risk assessment. In: Reliab. Eng. Syst. Saf., № 115, pp. 146–160 (2013). doi: 10.1016/j.res.2013.02.013
- [6] Ryabinin I.A.: Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem. SPb.: Politehnika, (2000)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[7] Vychuzhanin, V.V., Rudnichenko N.D.: Metody informatsionnykh tekhnologiy v diagnostike sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Monografiya, Odessa (2019)

[8] Tsvetkov, V.YA.: Slozhnyye tekhnicheskiye sistemy. In: Obrazovatel'nyye resursy i tekhnologii, №3(20), pp. 86-92 (2017)

[9] Rudnichenko, N. Vichuzhanin, V.: Information cognitive model of technological interdependence of marine technical recourses. In: Informatics and mathematical methods in simulation, Vol.3, №3, pp. 240-247 (2013)

[10] Vychuzhanin, V. Rudnichenko, N., Zenkin, E.: Cognitive Model of the Internal Combustion Engine. In: SAE International, 2018-01-1738, pp. 1-10 (2018). doi:10.4271/2018-01-1738

[11] Vychuzhanin, V. Rudnichenko, N., Sagova, Z., et al.: Analysis and structuring diagnostic large volume data of technical condition of complex equipment in transport. In: Machine Modelling and Simulations (2019). doi:10.1088/1757-899X/776/1/012049

[12] Dorozhko, I. V., Tarasov, A. G., Baranovskiy A. M.: Otsenka nadezhnosti strukturno slozhnykh tekhnicheskikh kompleksov s pomoshch'yu modeley bayesovskikh setey doveriya v srede GeNIe. Intellectual Technologies on Transport, № 3, pp. 36-45 (2015)

[13] Zhang, R., Brennan, T.J. and Lo, A.W.: The origin of risk aversion. In: PNAS Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 111, No.50, pp. 17-82 (2014)

[14] Shevtsov, U.D., Dudnik, L.N., Arefyeva, S.A., Fadeyev, Ye.D.: Prognozirovaniye parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya dvigateley energeticheskikh ustanovok. In: Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, № 132, pp. 508-517 (2017)

[15] Kurdyumov S.P., Malinetskiy G.G.: Sinergetika i sistemnyy sintez. Novoye v sinergetike: vzglyad v tret'ye tysyacheletie, M.: Nauka (2002)

[16] Mosleh, A., Groen, F., Hu, Y., Nejad, H., Zhu, D., and Piers, T. Simulation Based Probabilistic Risk Analysis Report. Center for Risk and Reliability, University of Maryland (2004)

[17] Vychuzhanin, V., Rudnichenko, N., Shibaeva, N., Konovalov, S.: Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems. In: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 84, № 6/9, pp. 4 -11 (2016)

[18] Vichuzhanin, V., Rudnichenko, N.: Development of the neural network model for prediction failure risk's of complex technical systems components. In: Informatics and mathematical methods in simulation, Vol. 6, №4, pp. 333-338 (2016)

[19] Pohorletskiy, D., Gritsuk, I., Zenkin, E., Bulgakov, N., Golovan, A., Vichuzhanin, V.: The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units. In: SAE International, 2018-01-1773, pp. 1-10 (2018). doi:10.4271/2018-01-1773

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[20] Vichuzhanin, V., Rudnichenko, N., Mateichyk V., Polyvianchuk A.: Complex Technical System Condition Diagnostics and Prediction Computerization. In: CMIS-2020 Computer Modeling and Intelligent Systems, Ceur-ws.org. 2608 (2020)

[21] Kasti, D.: Bol'shiye sistemy. Svyaznost', slozhnost' i katastrofy, M.: Mir (1982)

[22] Kochkarov, A.M., Kochkarova, A.N., Khapayeva, L.K.: Modelirovaniye fraktal'nogo razvitiya struktur prosteysimi predfraktal'nymi grafami. In: Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki, pp. 90-101 (2016)

COGNITIVE-PULSE MODEL FOR EVALUATION OF SURVIVAL OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Dr.Sci. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A., Ph.d. Kozlov A.

Abstract. The article considers known models of survivability of complex technical systems. Principles of constructing a cognitive-impulse model for assessing their survivability. The developed method of striking and diagnosing impulses is described, as well as the method of estimating structural and functional threats to elements of complex technical systems. The developed software of cognitive-impulse modeling and results of its application are resulted. The results of the study of the cognitive-impulse model for assessing the survivability of complex technical systems are presented. The developed technique allows to determine the threats and risks affecting the survivability of systems from the cognitive map with the help of pulse modeling. The technique allows to determine the numerical values of threat and failure risk assessment of elements of complex technical systems.

Keywords: complex technical systems, failure risk, model, cognitive-impulse modeling, software.

КОГНІТИВНО-ІМПУЛЬСНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЖИВУЧОСТІ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧЕСЬКИХ СИСТЕМ

Д.т.н. Вичужанін В.В., Вичужанін О.В., к.т.н. Козков А.Ю.

Аннотація. У статті розглядаються відомі моделі живучості складних технічних систем. Принципи побудови когнітивно-імпульсної моделі оцінки їх живучості. Описаний розроблений метод уражуючого та діагностичного імпульсів, а також метод оцінки структурних та функціональних угроз елементів складних технічних систем. Введено розроблене програмне забезпечення когнітивно-імпульсного моделювання та результати його застосування. Представлені результати дослідження когнітивно-імпульсної моделі оцінки живучості складних технічних систем. Розроблена методика дозволяє по когнітивній карті за допомогою імпульсного моделювання визначати угрози та ризики, що впливають на систему живлення. Методика дозволяє визначити численні значення оцінок рівня ризику та ризику відказових елементів складних технічних систем.

Ключові слова: складні технічні системи, ризик відказу, модель, когнітивно-імпульсне моделювання, програмне забезпечення.

УДК 519.216.1

**TWO-PHASE MULTI-NOMENCLATURE
PRODUCTION/STORAGE MODEL WITH RANDOM
INPUT**

Dr.Sci. Postan M.

Abstract. The mathematical model of a manufacturing system with several kinds of final product and one kind of raw materials is under consideration. This production system is interpreted as two-phase storage system with random input flow of raw materials which is described by the Levy process with non-decreasing sample paths and zero drift. The first phase consists of one warehouse for raw materials storage and second one consists of industrial equipment and several parallel warehouses for final products storage. The production rates and rates of products removal from warehouses are constant. The joint distribution of storage levels of raw materials and any kind of final product at warehouses is found in closed form (in the terms of Laplace-Stieltjes transform). The problem of optimal values of products removal rates is formulated and solved.

Keywords: Two-phase manufacturing system, random input of raw materials, Levy process, several kinds of final products, set of warehouses, production rates, storage levels, probabilistic distribution.

1. INTRODUCTION

It is well-known that application of the Markov processes for modeling of different types of production/storage systems is motivated by necessity to take into account the following main factors of internal and external uncertainty: a) random moments of the orders' giving from market to an enterprise for a product manufacturing; b) irregularity of raw materials delivery to enterprise by transport; c) restricted reliability of industrial equipment. During the last 2-3 decades the much researches devoted to development and analysis of Markovian models of production/storage systems were fulfilled [1]-[6]. But it is almost impossible very often to study the real large-scale systems or networks by the analytical means because of dimension barrier. Therefore it is expediently to develop the theoretical approaches which allow us to find out the conditions of full or partial decomposition of corresponding mathematical models. Typical example of such kind is the queueing networks theory [1,2]. In our works [7-10], the approach was proposed for modeling the large-scale stochastic systems which is based on development of continuous variant of queueing networks theory - so-called stochastic storage networks theory. Generally speaking, this approach is a generalization of some classical stochastic storage models for the case of set of interacting single storehouses. In this paper, the application of this analytic approach is demonstrated for modeling the two-phase production/storage system with several kinds of final product and random input of raw materials.

2. DESCRIPTION OF MATHEMATICAL MODEL

Consider the following two-phase manufacturing system. The first phase consists of one warehouse for raw material storage. From this warehouse, if it isn't empty, the raw materials come to M machines (industrial equipment), located in parallel, for manufacturing corresponding final products. At the m -th machine the raw materials come with the rate W_m and with the same rate the m -th machine manufactures the final product of m -th kind. Correspondingly, the m -th final product comes to the warehouse (of second phase) with the rate W_m and with the rate $U_m < W_m$ it removes off (i.e. comes to consumers) if this warehouse isn't empty. The value U_m may be interpreted as the rate of m -th final product delivery to consumers. Once the storage level of raw materials at warehouse has been exhausted, then all machines have been stopped. It is assumed also that all warehouses have the unlimited capacities. This assumption, of course, is only simplification of reality but, from the mathematical point of view, analysis of a storage model with finite warehouses' capacities may be provided on the basis of this more simple case [10]. The input flow of raw materials is Levy process $X(t)$ [3] with nonnegative trajectories and zero drift, $X(0) = 0$. In our case $X(t)$ has the meaning of total input of raw materials during the time interval $(0, t]$. As it is known [3]

$$\mathbb{E}e^{-sX(t)} = e^{-\varphi(s)t}, \operatorname{Re} s \geq 0, \quad (1)$$

where $\varphi(s)$ is the cumulant of $X(t)$. For example, for compound Poisson process

$$\varphi(s) = \lambda(1 - \beta(s)),$$

where λ is the rate of the Poisson stream; $\beta(s) = \int_0^\infty e^{-st} dB(x)$, $B(x)$ is the distribution function (d.f.) of jump sizes which is concentrated on $R_+ = [0, \infty)$. In this case process $X(t)$ may be interpreted in the following "logistical" way: through the exponentially distributed with the mean $1/\lambda$ time intervals an enterprise receives an order from market for manufacturing a random quantities of final products. These quantities demand a batch of raw materials of random size with d.f. $B(x)$.

We denote by $\xi_1(t)$ the content of warehouse for raw materials storage at moment t and by $\xi_{2m}(t)$ the amount of m -th final product at warehouse at moment t . Let $\xi_1(0), \xi_{1m}(0), m = 1, 2, \dots, M$, are the non negative values.

According to the above assumptions the processes $\xi_1(t), \xi_{11}(t), \dots, \xi_{1M}(t)$ satisfy the following system of integral equations (with probability 1):

$$\xi_1(t) = \xi_1(0) + X(t) - W(t - I_1(t)), \quad (2)$$

$$\xi_{2m}(t) = \xi_{2m}(0) + W_m(t - I_1(t)) - U_m(t - I_{2m}(t)), \quad (3)$$

$m = \overline{1, M},$

where

$$I_1(t) = \int_0^t u(\xi(\tau)) d\tau, I_{2m}(t) = \int_0^t u(\xi_1(\tau)) u(\xi_{2m}(\tau)) d\tau, m = \overline{1, M};$$

$$u(z) = 0, \text{ if } z > 0, u(0) = 1; W = \sum_{m=1}^M W_m.$$

Note that $I_1(t), I_{2m}(t), m = \overline{1, M}$, are duration of time when the warehouses have remained the empty in the time interval $(0, t]$.

The Eqs. (2), (3) are usual, for storage theory, balance relations describing input and output processes of material flows [3]. The conditions

$$W_m > U_m, m = \overline{1, M}, \quad (4)$$

are necessary to avoid the trivial situations. So, for example, if for any warehouse of second phase inequality (4) isn't valid, then this warehouse will become empty with probability 1 in a finite time and will remain empty after that.

3. ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODEL

The main results concerning analysis of the model (2), (3) we formulate as the following theorems.

Theorem 1. *The system of integral equations (2), (3) has the unique non negative solution*

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

$$\xi_1(t) = \xi_1(0) + X(t) - Wt + WI_1(t), \quad (5)$$

$$\xi_{2m}(t) = \xi_{2m}(0) + V_m t - W_m I_1(t) + U_m I_{2m}(t), \quad (6)$$

$$\text{where } WI_1(t) = \max\{0, -\xi_1(0) - \inf_{0 \leq \tau \leq t} [X(\tau) - W\tau]\},$$

$$U_m I_{2m}(t) = \max\{0, -\xi_{2m}(0) - \alpha_m \xi_1(0) - \\ - \inf_{0 \leq \tau \leq t} [\alpha_m X(\tau) - U_m \tau]\}, m = 1, M; V_m = W_m - U_m; \\ \alpha_m = W_m / W.$$

The proof of Theorem 1 is based on reduction of Eqs. (2), (3) to classical storage model [3]. For this purpose we multiply both sides of Eq. (2) by α_m , take the sum of Eqs.(2) and (3), and take into account the identity

$$u(\xi_1(t))u(\xi_{2m}(t)) = u(\alpha_m \xi_1(t) + \xi_{2m}(t)).$$

After these manipulations we arrive at the following equation for the process $\varsigma_m(t) = \xi_1(t) + \xi_{2m}(t)$:

$$\varsigma_m(t) = \varsigma_m(0) + \alpha_m X(t) - U_m(t - I_{2m}(t)). \quad (7)$$

The Eqs. (2) and (7) are the classical storage models with the Levy input processes $X(t)$, $\alpha_m X(t)$ and the release rates W , U_{2m} correspondingly. Applying the known results for classical storage model [3] we get the formulas (5) and (6).

The further results are related to determination of joint distribution of stochastic processes $\xi_1(t)$, $\xi_{2m}(t)$, $I_1(t)$, $I_{2m}(t)$. Let us denote

$$\Psi_m^*(s, \omega; \mathbf{x}; \omega) = \int_0^\infty \Psi_m(s, \omega; \mathbf{x}; \omega) e^{-\omega t} dt, \text{Re } \omega > 0,$$

where $\Psi_m(s, \omega; \mathbf{x}; t) = E\{\exp[-(s, \xi(t)) - (\omega, I_m(t))] | \xi(0) = \mathbf{x}\}$, $\mathbf{s} = (s_1, s_2)$, $\omega = (\omega_1, \omega_2)$, $\mathbf{x} = (x_1, x_2) \geq \mathbf{0}$.

Theorem 2. *The Laplace transform of conditional joint distribution of random vectors $\xi(t)$ and $\mathbf{I}_m(t)$ is given by*

$$\Psi_m^*(s, \omega; \mathbf{x}; \omega) = [e^{-(s, \mathbf{x})} - (s_1 W - s_2 W_m + \omega_1) H_{2m}^*(s_2, \omega; \mathbf{x}; \omega) - (s_2 U_m + \omega_2) H_{1m}^*(\omega; \mathbf{x}, \omega)] [\omega + s_2 V_m - s_1 W + \varphi(s_1)]^{-1},$$

$$\operatorname{Re} \omega > 0, \operatorname{Re} s_i > 0, \operatorname{Re} \omega_i > 0, i = 1, 2, \quad (8)$$

$$H_{1m}^*(\omega; \mathbf{x}; \omega) = \frac{\exp(-(x_1 + x_2 / \alpha_m) \eta_{1m} - \omega_1 x_2 / W_m)}{\omega_2 + U_m (\omega_1 + \eta_{1m} W) / W_m},$$

$$H_{2m}^*(s_2; \omega; \mathbf{x}; \omega) =$$

$$= [\exp(-s_2 x_2 - \eta_{2m} x_1) - (s_2 U_m + \omega_2) H_{1m}^*(\omega; \mathbf{x}; \omega)] \times$$

$$\times (W \eta_{2m} - W_m s_2 + \omega_1)^{-1},$$

$\eta_{1m} \equiv \eta_{1m}(\omega_1, \omega)$, $\eta_{2m} \equiv \eta_{2m}(s_2, \omega)$ are the unique continuous solutions to the functional equations

$$\omega + \omega_1 V_m / W_m - U_m \eta_{1m} / \alpha_m + \varphi(\eta_{1m}) = 0, \quad (9)$$

$$\omega + s_2 V_m - W \eta_{2m} + \varphi(\eta_{2m}) = 0 \quad (10)$$

with the following properties:

$$a) \left. \frac{d}{d\omega} \eta_{1m}(0, \omega) \right|_{\omega=0+} = \begin{cases} \alpha_m (U_m - \alpha_m \gamma)^{-1}, & \alpha_m \gamma < U_m \\ \infty, & \alpha_m \gamma = U_m \end{cases}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \omega} \eta_{2m}(0, \omega) \right|_{\omega=0+} = \begin{cases} (W - \gamma)^{-1}, & \gamma < W \\ \infty, & \gamma = W, \end{cases}$$

where $\gamma = \varphi'(0) = EX(1) < \infty$; $\varphi(s)$ is the cumulant of $X(t)$ (see (1));

7

b) as $\omega \rightarrow 0+$, $\eta_{1m}(0, \omega) \rightarrow \eta_{1m}^0$, where η_{1m}^0 is the largest positive root of the equation $U_m \eta_{1m}^0 = \alpha_m \varphi(\eta_{1m}^0)$ and $\eta_{1m}^0 \geq 0$, iff $\alpha_m \gamma > U_m$.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

The proof of Theorem 2 may be given by analogy with the corresponding theorem in theory of classical storage model (2) or (7) [3]. Particularly, the formula (8) is derived by direct calculation of expression $\Psi_m^*(s, \omega; \mathbf{x}; \omega)$ taking into account the relations (5), (6). Using the results of Theorems 1 and 2 we can immediately determine the conditions under which there exists a limit distribution of the random vector $(\xi_1(t), \xi_{2m}(t))$, as well as examine its asymptotic distribution. Setting in (8) $s_1 = s_2 = 0, \omega_1 = 0$ we obtain

$$\int_0^\infty e^{-\omega t} E\{\exp(-\omega_2 I_{2m}(t)) | \xi_1(0) = x_1, \xi_2(0) = x_2\} dt = \quad (11)$$

$$= \frac{1}{\omega} [1 - \omega_2 e^{-(x_1 + x_2 / \alpha_m) \eta_{1m}(0, \omega)} / (\omega_2 + \frac{U_m}{\alpha_m} \eta_{1m}(0, \omega))],$$

where $\eta_{1m}(0, \omega)$ is the root of functional Eq.(9) with $\omega_1 = 0$. By definition, $I_{2m}(t)$ is a monotone non decreasing function of t , therefore $I_{2m}(t) \rightarrow I_{2m} \leq \infty$ with probability one. Applying the Tauberian theorem, from (11) we get

$$E\{\exp(-\omega_2 I_{2m})\} = 1 - \omega_2 \lim_{\omega \rightarrow 0+} \frac{e^{-(x_1 + x_2 / \alpha_m) \eta_{1m}(0, \omega)}}{\omega_2 + U_m \eta_{1m}(0, \omega) / \alpha_m}.$$

The last expression equals to 0 if $\gamma \leq U_m / \alpha_m$, and equals to

$$1 - \omega_2 / (\omega_2 + U_m \eta_{1m}^0 / \alpha_m) \quad (12)$$

if $\gamma > U_m / \alpha_m$.

Theorem 3. a) Let $\omega_1 = \omega_2 = 0, x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$. Then as $t \rightarrow \infty$ if $\gamma > W$, then $\xi_1(t) \rightarrow \infty, \xi_{2m}(t) \rightarrow \infty$ in distribution. If

$\alpha_m \gamma < U_m$, then process $(\xi_1(t), \xi_{2m}(t))$ converges weakly to random vector (ξ_1, ξ_{2m}) with distribution given by the Laplace-Stieltjes transform

$$\begin{aligned} E\{e^{-s_1 \xi_1 - s_2 \xi_{2m}}\} &= (U_m - \gamma \alpha_m) \frac{s_2 W}{s_1 W - s_2 V_m - \varphi(s_1)} \times \\ &\times \frac{s_1 - \eta_{2m}(s_2, 0+)}{W_m s_2 - W \eta_{2m}(s_2, 0+)}, \quad \text{Re } s_i > 0, i=1,2, \end{aligned} \quad (13)$$

where $\eta_{2m}(s_2, 0+) = \lim_{\omega \rightarrow 0+} \eta_{2m}(s_2, \omega)$.

b) If $\frac{U_m}{\alpha_m} < \gamma < W, \sigma^2 < \infty$, then

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P\left\{\frac{\xi_{2m}(t) - (\alpha_m \gamma - U_{2m})t}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}} \leq x\right\} = N(x),$$

where $N(x)$ is standard normal distribution with zero mean and unit variance;
 $\sigma^2 = -\varphi''(0) = \text{Var}X(1)$.

c) If $\gamma < U_m / \alpha_m, \sigma^2 < \infty$, then

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P\left\{\frac{U_m I_{2m}(t) - (U_m - \alpha_m \gamma)t}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}} \leq x\right\} = N(x).$$

The proof of point a) of Theorem 3 is based on formula (8) and application of the Tauberian theorem. To prove the point b) note that from (7), it follows

$$\begin{aligned} \frac{\xi_{2m}(t) - (\gamma \alpha_m - U_m)t}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}} &= \frac{\alpha_m \xi_1(0) + \xi_{2m}(0)}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}} + \frac{X(t) - \gamma t}{\sigma \sqrt{t}} - \\ &- \frac{\xi_1(t)}{\sigma \sqrt{t}} + \frac{U_m I_{2m}(t)}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}}. \end{aligned}$$

It is obvious that the first addend in right-hand side of the last relation tends to 0 as $t \rightarrow \infty$. If $\alpha_m \gamma > U_m$, then from (12) follows the existence of finite limit of $I_{2m}(t)$, therefore $I_{2m}(t) / \sqrt{t} \rightarrow 0$ in distribution. Since

$\gamma < W$, there exists the limit distribution of process $\xi_1(t)$, hence

$\xi_1(t) / \sqrt{t} \rightarrow 0$. Therefore

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{P}\left\{\frac{\xi_{2m}(t) - (\alpha_m \gamma - U_m)t}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}} \leq x\right\} = \\ = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{P}\left\{\frac{X(t) - \gamma t}{\sigma \sqrt{t}}\right\}. \end{aligned}$$

But for the Levy process $X(t)$ the last limit equals to $N(x)$ [3]. The point c)

of Theorem 3 may be proved similarly. Note that $\zeta_m(t) = 0$ iff

$\xi_1(t) = \xi_{2m}(t) = 0$. As it follows from theory of classical storage model

and Eq. (7) if $\alpha_m \gamma < U_m$, then

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{P}\{\zeta_m(t) = 0\} = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{P}\{\xi_1(t) = 0, \xi_{2m}(t) = 0\} =$$

$$= 1 - \alpha_m \gamma / U_m.$$

Setting in (13) $s_1 = 0, s_2 = s$ we have

$$f(s) \equiv \mathbf{E}\{e^{-s\xi_{2m}}\} = \frac{U_m}{V_m} \left(1 - \frac{\alpha_m \gamma}{U_m}\right) \frac{W \eta_{2m}(s, 0+)}{W \eta_{2m}(s, 0+) - sW}. \quad (14)$$

Using this formula we can calculate the stationary mean and variance:

$$\mathbf{E}\xi_{2m} = -f'(0) = \frac{V_m \alpha_m \sigma^2}{2(W - \gamma)(U_{2m} - \alpha_m \gamma)}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Var} \xi_{2m} &= f''(0) - (f'(0))^2 = \frac{\alpha_m V_m^3}{6(W - \gamma)(U_m - \alpha_m \gamma)^2} \times \\ &\times \{2\sigma^4 (W_m + U_m - 2\alpha_m \gamma) + 2\varphi'''(0)(W - \gamma)(U_m - \alpha_m \gamma)\} - \\ &- (E\xi_{2m})^2. \end{aligned}$$

For example, if $\varphi(s) = \lambda(1 - \beta(s))$, then $\varphi^{(k)}(0) = (-1)^{k+1} \lambda \beta^{(k)}$,

where $\beta^{(k)}, k=1,2,3$, are the first three initial moments of d.f. $B(x)$.

These results may be used for approximate determination of warehouses' capacities and formulation of some optimization problems.

For example, let us it is required to find out the values $\overline{U}_m, m=1, \overline{M}$, that minimize mean current cost for storage of final products and costs for their transportation ($\overline{E}$). The objective function is given by

$$\overline{E} = \sum_{m=1}^M (e_m U_m + c_m E \xi_{2m}), \quad (16)$$

where e_m is transportation cost for delivery of 1 t of m -th final product to consumers; c_m is storage expenses per unit of time for 1 t of m -th final product. Taking into account the formula (15) we can re- write the expression (16)

$$\overline{E} = \sum_{m=1}^M e_m U_m + \frac{\sigma^2}{2(W-\gamma)} \sum_{m=1}^M \frac{c_m \alpha_m (W_m - U_m)}{U_m - \alpha_m \gamma}. \quad (17)$$

We assume that the following condition hold true:

$$\sum_{m=1}^M E \xi_{2m} = \frac{\sigma^2}{2(W-\gamma)} \sum_{m=1}^M \frac{\alpha_m (W_m - U_m)}{U_m - \alpha_m \gamma} \leq C, \quad (18)$$

where C is the given total capacity of warehouses for final products storage.

The additional constraints are just the stability conditions

$$U_m < \alpha_m \gamma, m = \overline{1, M}. \quad (19)$$

The stochastic optimization problem (17)-(19) may easily be solved by the Lagrange multipliers method. Its solution is given by

$$U_m = W_m \left[\frac{\gamma}{W} + \sigma \sqrt{\frac{c_m + \mu}{2e_m W_m W}} \right], \quad m = \overline{1, M},$$

where μ is Lagrange multiplier which may be found as the unique root of the equation

$$\sum_{m=1}^M \alpha_m \sqrt{e_m W_m / (c_m + \mu)} = \sigma \sqrt{W / 2} [1 + 2C(W - \gamma) / \sigma^2] / (W - \gamma).$$

4. CONCLUSIONS

The results obtained show that it is possible to investigate by analytical means the stochastic models of storage networks on the basis of classical models for single storehouse. The further development of our approach may concern the following directions: a) Consideration of several kinds of raw materials; but here we must take into account the following circumstance: once a warehouse for storage of any kind of raw materials has been empty, then corresponding technological lines (machines) which process these raw materials must be stopped. b) Taking into account the irregularity of raw materials delivery at enterprise and random fluctuation of demand for final product. Here, in principal, it is possible to use the mathematical technique given in the book [3] (Markov-compound Poisson input and Markov-modulated demand). c) Investigation of models of manufacturing systems by representation their as stochastic storage networks with more complex topology.

REFERENCES

- [1] Kelly, F.P.: Reversibility and Stochastic Networks. J.Wiley&Sons, New York (1979)
- [2] Neuts, M.F.: Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models: An Algorithmic Approach. 2nd Ed. Dover Publ., Boston (1995)
- [3] Kulkarni, V.G.: Modeling and Analysis of Stochastic Systems. Chapman&Hall, London (1995)
- [4] Prabhu, N.U.: Stochastic Storage Processes: Queues, Insurance Risk, Dams, and Data Communication. 2nd Ed. Springer Verlag, New York (1998)
- [5] Ost, A.: Performance of Communication Systems - A Model-Based Approach with Matrix-Geometric Methods. Springer Verlag, Berlin (2001)
- [6] Ryzhikov Yu.I.: Queueing Theory and Inventory Control. Piter, St. Petersburg (2001) (in Russian)
- [7] Voevodskiy, E.N., Postan, M.Ya.: Stochastic Model of Multi-Phase Storage System. Communications of Academy of Science of USSR. 318, #1, 51-56 (1991)
- [8] Postan, M.Ya.: On Application of Stochastic Processes of the Stock Theory to Modeling Computerized Information Networks. Prob. Inform. Transm., 31, #3, 262-283 (1995)
- [9] Postan, M.Ya.: Theory of Stochastic Storage Networks: Present State and Perspectives. In: Proc. of 16th IMACS World Congress 2000 on Scientific Computation, Applied Mathematics, and Simulation, CD, File CP 216-5. Lausanne (2000)
- [10] Postan, M.Ya.: Economic-Mathematical Models of Multimodal Transport, Astroprint, Odessa (2006) (in Russian)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ДВУХФАЗНАЯ МУЛЬТИНОМЕНКЛАТУРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДСТВА / ХРАНЕНИЯ СО СЛУЧАЙНЫМ ВВОДОМ

Д.т.н. Постан М.

Аннотация. Рассматривается математическая модель производственной системы с несколькими видами конечного продукта и одним видом сырья. Эта производственная система интерпретируется как двухфазная система хранения со случайным входным потоком сырья, который описывается процессом Леви с неумещающимися путями отбора проб и нулевым дрейфом. Первая очередь состоит из одного склада для хранения сырья, а вторая - из промышленного оборудования и нескольких параллельных складов для хранения готовой продукции. Производительность и скорость вывоза продукции со складов постоянны. Совместное распределение уровней хранения сырья и любого вида конечного продукта на складах находится в закрытой форме. Сформулирована и решена задача оптимальных значений скоростей съема изделий.

Ключевые слова: двухфазная производственная система, случайный ввод сырья, процесс Леви, несколько видов конечной продукции, набор складов, производительность, уровни хранения, вероятностное распределение.

ДВОФАЗНА БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНА МОДЕЛЬ ВИРОБНИЦТВА / ЗБЕРІГАННЯ З СЛУЧАЙНИМ ВХІДОМ

Д.т.н. Постан М.

Анотация. Розглядається математична модель виробничої системи з кількома видами кінцевого продукту та одним видом сировини. Ця виробнича система інтерпретується як двофазна система зберігання із випадковим входним потоком сировини, яка описується процесом Леві з не зменшуваними шляхами зразків та нульовим дрейфом. Перший етап складається з одного складу для зберігання сировини, а другий - з промислового обладнання та декількох паралельних складів для зберігання кінцевої продукції. Норми виробництва та темпи вивезення продукції зі складів постійні. Спільний розподіл рівнів зберігання сировини та будь-якого виду кінцевої продукції на складах знаходиться у закритому вигляді. Сформульовано та вирішено проблему оптимальних значень швидкості вивезення продукції.

Ключові слова: Двофазна виробнича система, випадкове введення сировини, процес Леві, кілька видів кінцевої продукції, набір складів, норми виробництва, рівні зберігання, імовірнісний розподіл.

**THE STABILIZATION PROBLEM THE FLOW PARAMETERS OF
THE PRODUCTION LINE**

Dr.Sci. Pihnastyi O.M., Dr.Sci. Khodusov V.D.

Annotation. The problem of designing a system for optimal control of random deviations of flow parameters of a production line from the planned value is considered. The PDE-model of the production line was used as a foundation for the development of an algorithm for optimal control of the parameters production line. The method of Lyapunov functions was used to construct a system of operational control of flow parameters of production lines. The problem of stabilization of the value flow parameters of the production line (the task of operational control of the flow production) is formulated. The equations for the production line parameters in small disturbances are obtained. To assess the technological resources of the production system, which spent on the formation of control actions, the integral of the production line quality was introduced, the minimum value of which corresponds to the rapid damping of the flow parameters disturbance. Taking into account the specified quality criterion, the Lyapunov function of the production line is determined. Control actions are found that ensure the asymptotic stability of a given planned state of the production line flow parameters for a steady and transient mode of operation.

Keywords: production line, production control system, PDE-model, flow production.

1. THE PROBLEM FORMULATION

The main task of operational planning and control of production lines flow parameters is to ensure the rhythm of production. The changing the work tempo of a separate technological section in the production line requires a change in the work schedule of the production line, procurement shops and other departments [1, p.113]. Ensuring the continuous nature of production is reduced to the issue of synchronization of generalized technological operations sequentially located along the technological route.

It is known that increasing the performance of production line control is achieved by reducing costs and reducing the volume of work in progress [2]. On the other hand, with an increase in the production volume, an increase in the value of interoperation backlogs is required to smooth out differences in the productivity of individual technological equipment. No matter how stable the production programs and operational tasks for the product segment are, in the production process, the deviations arise that require adjustment [3]. There is a need to stabilize the production line flow parameters to ensure the rhythm of the production process [1, p.181]. An important issue is to determine the frequency of use of control actions to stabilize the production line flow parameters. The dispatch service, which constantly monitors the production progress, collects the necessary information about the actual execution of shift tasks, the presence of interaction delays and the speed of movement of parts

along the technological route of the production line. To obtain operational information about the production progress, an alert and alarm system is used, which is a variety of sensors and recording devices that automatically transmit actual readings from workplaces [4]. Information about the state of the production line parameters during a regulated period of time is accumulated, processed, compared with planned targets and transmitted to production units in the form of managerial actions: recommendations and orders. The purpose of these influences is to eliminate deviations from the planned result [5].

The presence and relevance of the above-considered problems associated with ensuring the continuous nature of production and synchronizing the productivity of individual technological operations of the production line determined the purpose of the research: setting and solving the problem of stabilizing the production line flow parameters. To construct optimal controls that ensure the stabilization of the production line flow parameters, the class of PDE-models of the production line was used [6].

2. THE RESEARCH METHODS

To describe the state of the production flow line, most researchers have used two flow parameters with a sufficient degree of accuracy: the value of interoperation backlogs before a technological operation; the tempo of processing of parts in a technological operation [1,2,6].

In the PDE-model, the interoperation backlogs before a technological operation and the tempo of processing parts in a technological operation are determined through the functions $[\chi]_0(t,S)$ and $[\chi]_1(t,S)$ [5,7], where the S coordinate determines the technological position of the part in the technological route at time t [5,7]. The flow parameters $[\chi]_0(t,S)$, $[\chi]_1(t,S)$ of a production line without additional control cannot be in a stable stationary state for a long time [8]. Therefore, the main task of the production line flow parameters operational control is to form control actions that provide a stable state of the flow parameters for a sufficiently long time. At the same time, the consumption of technological resources for control the flow parameters $[\chi]_n(t,S)$ deviations from their unperturbed planned values

$[\chi]_n^*(t,S)$ should not exceed the specified values. An equally important task is to ensure that the transition of the production system from one state with one production plan to another state with another production plan was carried out in the shortest possible time with a minimum deviation of the flow parameters from the required standard values [7]. To construct a system of operational control of production lines flow parameters, the method of Lyapunov functions is used. The disturbing factors are meant the impact on the flow parameters of the production line $[\chi]_n(t,S)$, which were not taken

into account when modelling the production process due to their smallness in comparison with the main factors that affect production.

They can act as instantly, which is reduced to a small change in the current state of the production line flow parameters, as continuously. This means that the equations for determining the state of the flow parameters of the technological process differ from the true ones by some small correction terms. Let us supplement the balance equations [5]

$$\frac{\partial[\chi]_0(t,S)}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1(t,S)}{\partial S} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial[\chi]_n(t,S)}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_{n+1}(t,S)}{\partial S} = n f(t,S)[\chi]_{n-1}(t,S), \quad n=1,2,3,\dots, \quad (2)$$

that determine the state of the production line flow parameters with control functions $Y_n(t,S)$

$$\frac{\partial[\chi]_0(t,S)}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1(t,S)}{\partial S} = Y_0(t,S), \quad (3)$$

$$\frac{\partial[\chi]_n(t,S)}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_{n+1}(t,S)}{\partial S} - n f(t,S)[\chi]_{n-1}(t,S) = Y_n(t,S), \quad n=1,2,3,\dots, \quad (4)$$

Let the system of equations (3), (4) correspond to an unperturbed solution [8]:

$$[\chi]_n = [\chi]_n^*(t,S), \quad Y_n(t,S) = Y_n^*(t,S), \quad (5)$$

and the flow parameters of the production line will receive at the current moment in time previously unknown random small disturbances: $[y]_n$:

$$[y]_n = [\chi]_n - [\chi]_n^*, \quad (6)$$

for the elimination of which control actions are required $u_m = u_m(t, [y]_n)$. Let us linearize the system of equations (3), (4) for the production line flow parameters taking in account to small perturbations (6) in the vicinity of the unperturbed state of the flow parameters (5):

$$\frac{\partial[y]_0}{\partial t} + \frac{\partial[y]_1}{\partial S} = \sum_{m=0}^{N_k} q_{0m} u_m, \quad n=0,1,\dots,N_n, \quad (7)$$

$$\frac{\partial[y]_n}{\partial t} + \frac{\partial[y]_{n+1}}{\partial S} = n f(t,S)[y]_{n-1} + \sum_{m=0}^{N_n} \left(n[\chi]_{n-1}(t,S) \frac{\partial f(t,S)}{\partial [\chi]_m(t,S)} \right) \Big|_0 [y]_m + \sum_{m=0}^{N_n} q_{nm} u_m, \quad (8)$$

$$\sum_{m=0}^{N_n} q_{nm} u_m = Y_n(t,S) - Y_n^*(t,S), \quad \sum_{m=0}^{N_n} q_{nm} u_m \ll Y_n^*(t,S).$$

The symbol $\big|_0$ denotes that the Taylor series expansion was carried out in the vicinity of the unperturbed state of flow parameters $[\chi]_n^*(t, S)$ (5).

Let us formulate the problem of operational control (the problem of stabilizing the production line flow parameters) by the flow parameters of a production line. It is required to find such control actions $u_m = u_m(t, [y]_n)$ on the deviations of the flow parameters (6) arising as a result of the production process, which will ensure the asymptotic stability of the steady (unperturbed) planned state of the flow parameters (5) of the production line. It is assumed that the dispatching service measures the current values of the flow parameters $[\chi]_n$, the data on which is received at the dispatching point by means of production signalling. On the basis of this measurement, the control device generates a control $u_m = u_m(t, [y]_n)$ that affects the pace of processing parts and the control the stocks. These influences should ensure the asymptotic stability of the given planned state of the flow parameters (5). The functions $u_m = u_m(t, [y]_n)$ are assumed to satisfy the equalities

$$u_m(t, 0) = 0 \quad (9)$$

are defined and continuous in the considered domain, and are also not constrained by any additional inequalities.

3. MAIN RESULTS

Applied problems of stabilization of flow parameters of a production line along with the requirements of asymptotic stability of the unperturbed state of flow parameters (5) contain wishes about the best quality of the transient process during the transition to the unperturbed state at $t \rightarrow \infty$. At the same time, wishes were expressed about the lowest possible cost of technological resources (energy, raw materials, materials, labour resources, etc.) spent on the formation of control actions. $u_m = u_m(t, [y]_n)$. We express these wishes in the form of a condition for the minimality of some integral:

$$I = \int_{t_0}^{\infty} \omega(t, [y]_n, u_m) dt. \quad (10)$$

The function $\omega(t, [y]_n, u_m)$ is a non-negative function, when choosing which one should take into account: a) the condition of the minimum of the quality integral (10) should ensure a sufficiently fast decay of the arisen disturbance of the flow parameter $[y]_n$; b) the value of the quality integral (10) should satisfactorily assess the technological resources of the production system spent on the formation of control actions $u_m = u_m(t, [y]_n)$; c) the

function $\omega(t, [y]_n, u_m)$ should provide a simple solution to the problem and, if possible, in a closed-form.. In many cases, interesting from a practical point of view, these requirements are met by a function $\omega(t, [y]_n, u_m)$ chosen in the form of a definitely positive quadratic form

$$\omega = \sum_{n,m=0}^{N_n} \alpha_{n,m} [y]_n [y]_m + \sum_{n,m=0}^{N_n} \beta_{n,m} u_n u_m . \quad (11)$$

where $\alpha_{n,m}, \beta_{n,m}$ the coefficients characterizing the costs associated with the presence of the flow parameters deviations and the costs associated with the control actions necessary to eliminate these deviations. The problem of stabilizing the production line flow parameters under the condition of the minimum quality criterion (10) is the problem of optimal operational control of the production line flow parameters. The problem is formulated as follows: let the quality criterion be chosen for the mode of operation of the production line in the form of an integral (10). It is required to find such control actions $u_m = u_m(t, [y]_n)$ that will ensure the asymptotic stability of the given state of the production line flow parameters $[\chi]_n(t, S)$ due to the balance equations in small perturbations (8). In this case, whatever other control actions $u_m = u_m(t, [y]_n)$ that solve the problem, the inequality must be satisfied

$$I = \int_{t_0}^{\infty} \omega(t, [y]_n^0, u_m^0) dt \leq \int_{t_0}^{\infty} \omega(t, [y]_n^*, u_m^*) dt \quad (12)$$

for all initial conditions in the domain of existence of solutions to the system of equations (3), (4).

The functions $u_m = u_m(t, [y]_n)$ that solve the problem (8) are the optimal operational control of the deviations $[y]_n(t, S)$ of the flow parameters $[\chi]_n(t, S)$ of the production line from the given undisturbed state $[\chi]_n^*(t, S)$ (5). The solution to the problem (3), (4), as a rule, has a unique solution [9]. The set of functions $u_m = u_m(t, [y]_n)$ that solve the problem contains a lot of arbitrariness. For the problem of stabilization of the production line flow parameters, as well as for the general problem of stability, a research theory can be developed in the first approximation [10]. There are cases when the solution to the problem is determined by the first approximation, as well as critical cases when the possibility of solving the problem and the desired actions $u_m = u_m(t, [y]_n)$ themselves are determined by terms of higher-order of smallness in the system of equations (3), (4). Let us investigate the problem

of stabilizing the production line flow parameters for the linearized system of equations (3), (4). As a quality criterion, let's choose:

$$\omega(t) = \frac{1}{S_d} \int_0^{S_d} \left(\sum_{n,m=0}^{N_n} \alpha_{nm} [y]_n [y]_m + \sum_{n,m=0}^{N_n} \beta_{nm} u_m u_n \right) dS, \quad (13)$$

where S_d is the coordinate of the technological position of the final product manufacturing operation. The choice of the type of quality criterion (13) is due to the wishes about the least expenditure of technological resources of the enterprise for the formation of control actions with the requirements to ensure the least deviation $[y]_n(t, S)$ of the flow parameters from $[\chi]_n(t, S)$ the

undisturbed state $[\chi]_n^*(t, S)$. Let's use the expansion of small perturbations $[y]_n(t, S)$ of flow parameters $[\chi]_n(t, S)$ and control actions $u_m(t, S)$ in a Fourier series with coefficients $\{y_n\}_0, \{y_n\}_j, [y_n]_j, \{u_n\}_0, \{u_n\}_j, [u_n]_j$:

$$[y]_n = \{y_n\}_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \{y_n\}_j \sin[k_j S] + \sum_{j=1}^{\infty} [y_n]_j \cos[k_j S], \quad k_j = \frac{2\pi j}{S_d}$$

$$[u]_n = \{u_n\}_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \{u_n\}_j \sin[k_j S] + \sum_{j=1}^{\infty} [u_n]_j \cos[k_j S], \quad (14)$$

The integrand $\omega(t)$ (13) of the quality integral has the form

$$\begin{aligned} \omega(t) = & \sum_{n,m=0}^{N_n} \alpha_{n,m} \left(\{y_n\}_0 \{y_m\}_0 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} \{y_n\}_j \{y_m\}_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} [y_n]_j [y_m]_j \right) + \\ & + \sum_{n,m=0}^{N_n} \beta_{n,m} \left(\{u_n\}_0 \{u_m\}_0 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} \{u_n\}_j \{u_m\}_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} [u_n]_j [u_m]_j \right), \end{aligned} \quad (15)$$

$\beta_{mn} = \beta_{nm}.$

Let us define the Lyapunov function $V^0(t, \{y_n\}_0, \{y_n\}_j, [y_n]_j)$ as a quadratic form:

$$V^0(t, [y]_n) = \frac{1}{S_d} \int_0^{S_d} \sum_{m,n=0}^{N_n} c_{nm} [y]_n [y]_m dS =$$

$$= \sum_{n,m=0}^{N_n} c_{n,m} \left(\{y_n\}_0 \{y_m\}_0 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} \{y_n\}_j \{y_m\}_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} [y_n]_j [y_m]_j \right). \quad (16)$$

Let's compose an expression:

$$B[V^0, t] = \sum_{n=0}^{N_n} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\partial V^0}{\partial [y_n]_j} \frac{d[y_n]_j}{dt} + \omega \quad (17)$$

which by $u_m = u_m(t, [y]_n)$ must have a minimum and tend to zero in this case. Hence the first equation for constructing the Lyapunov function $V^0(t, \{y_n\}_0, \{y_n\}_j, [y_n]_j)$ and optimal control actions $u_m = u_m(t, [y]_n)$:

$$B[V^0, t] = 0. \quad (18)$$

Substituting instead of small perturbations and the corresponding control actions their expansion (14), equation (18) is obtained in the following form:

$$\begin{aligned} B[V^0, t] = & \sum_{n,m=0}^{N_n} \frac{dc_{n,m}}{dt} \left(\{y_n\}_0 \{y_m\}_0 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} \{y_n\}_j \{y_m\}_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} [y_n]_j [y_m]_j \right) + \\ & + \sum_{n,m=0}^{N_n} c_{n,m} \left(2\{y_n\}_0 \frac{d\{y_m\}_0}{dt} + \sum_{j=1}^{\infty} \{y_n\}_j \frac{d\{y_m\}_j}{dt} + \sum_{j=1}^{\infty} [y_n]_j \frac{d[y_m]_j}{dt} \right) + \\ & + \sum_{n,m=0}^{N_n} \alpha_{n,m} \left(\{y_n\}_0 \{y_m\}_0 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} \{y_n\}_j \{y_m\}_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} [y_n]_j [y_m]_j \right) + \\ & + \sum_{n,m=0}^{N_n} \beta_{n,m} \left(\{y_n\}_0 \{y_m\}_0 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} \{y_n\}_j \{y_m\}_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} [y_n]_j [y_m]_j \right) = 0 \quad (19) \end{aligned}$$

Differentiating $B[V^0, t]$ on $\{u_m\}_0, \{u_m\}_j, [u_m]_j$ and equating the results to zero, we obtain the missing equations for determining the Lyapunov function $V^0(t, \{y_n\}_0, \{y_n\}_j, [y_n]_j)$ and control actions $u_m = u_m(t, [y]_n)$:

$$\frac{B[V^0, t]}{\partial \{u_n\}_0} = \sum_{m=0}^{N_n} \frac{\partial V^0}{\partial \{y_n\}_0} \cdot \frac{\partial \left[\frac{d\{y_m\}_0}{dt} \right]}{\partial \{u_n\}_0} + 2 \sum_{m=0}^{N_n} \beta_{mn} \{u_m\}_0 = 0;$$

$$\frac{B[V^0, t]}{\partial \{u_n\}_j} = \sum_{m=0}^{N_n} \frac{\partial V^0}{\partial \{y_n\}_j} \frac{\partial \left[\frac{d\{y_m\}_j}{dt} \right]}{\partial \{u_n\}_0} + \sum_{m=0}^{N_n} \beta_{mn} \{u_m\}_j = 0;$$

$$\frac{B[V^0, t]}{\partial [u_n]_j} = \sum_{m=0}^{N_n} \frac{\partial V^0}{\partial [y_m]_j} \frac{\partial \left[\frac{d[y_m]_j}{dt} \right]}{\partial [u_n]_0} + \sum_{m=0}^{N_n} \beta_{mn} [u_m]_j = 0. \quad (20)$$

The resulting equations can be to solve for $\{u_m\}_0$, $\{u_m\}_j$, $[u_m]_j$:

$$\{u_m\}_0 = -\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_n} \frac{\Delta_{km}}{\Delta} \sum_{n=0}^{N_n} \frac{\partial V^0}{\partial \{y_n\}_0} \frac{\partial \left[\frac{d\{y_n\}_0}{dt} \right]}{\partial \{u_k\}_0}, \{u_m\}_j = -\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_n} \frac{\Delta_{km}}{\Delta} \sum_{n=0}^{N_n} \frac{\partial V^0}{\partial \{y_n\}_j} \frac{\partial \left[\frac{d\{y_n\}_j}{dt} \right]}{\partial \{u_k\}_j},$$

$$[u_m]_j = -\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_n} \frac{\Delta_{km}}{\Delta} \sum_{n=0}^{N_n} \frac{\partial V^0}{\partial [y_n]_j} \frac{\partial \left[\frac{d[y_n]_j}{dt} \right]}{\partial [u_k]_j}, \quad (21)$$

where Δ_{km} is the algebraic complement of the element of the k-th row and m-th column, and Δ is the determinant of the system of equations (20).

Substituting the obtained values $\{u_m\}_0$, $\{u_m\}_j$, $[u_m]_j$ into equations (8) taking into account the expansion (14), we obtain an equation for determining the Lyapunov function $V^0(t, \{y_n\}_0, \{y_n\}_j, [y_n]_j)$. Equating the coefficients of the products $\{y_n\}_0 \{y_m\}_0$, $\{y_n\}_j \{y_m\}_j$, $[y_n]_j [y_m]_j$ linearly independent quantities $\{y_n\}_0$, $\{y_n\}_j$, $[y_n]_j$ to zero, we obtain equations for determining the coefficients $c_{nm}(t)$. In the case of a steady production process, the Lyapunov function $V^0(\{y_n\}_0, \{y_n\}_j, [y_n]_j)$ может быть представлена квадратичной can be represented by a quadratic form with constant coefficients $c_{n,m} = const$:

$$V^0 = \sum_{n,m=0}^{N_n} c_{n,m} \left(\{y_n\}_0 \{y_m\}_0 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} \{y_n\}_j \{y_m\}_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} [y_n]_j [y_m]_j \right) \quad (22)$$

Sufficient conditions for the solvability of the problem on the definitely positiveness of form (22) are determined by the rank of the matrix

$W = \{Q, QB_j\}$, where Q is the matrix $\{q_{nm}\}$, B_j the matrix for the coefficients at $\{y_n\}_0$, $\{y_n\}_j$, $[y_n]_j$ in the system of equations (8). In the case when the matrix $W = \{Q, QB_j\}$ has a rank equal to the order of system (8), then the problem of stabilizing the flow parameters of the production line has a unique solution.

4. CONCLUSIONS AND RESEARCH PROSPECTS

In this paper, a method for designing optimal control systems for the parameters of production flow lines is proposed, which ensures the asymptotic stability of their state. The prospect for further research is the development of algorithms for optimal control of the productivity of technological equipment of the production line for transient and stationary modes of operation.

REFERENCES

- [1] Shkurba V.V. Discrete production planning in an automated control system. / V.V.Shkurba et al. - Kiev: Technics, 1975. - P. 296.(In Russian)
- [2] Kempf K. Optimization models for production planning. Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise: A State of the Art Handbook. / K.Kempf, P.Keskinocak, R.Uzsoy –Springer-Verlag, New York, 2010. – P. 587.
- [3] Hopp W.J. Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management. / W. J. Hopp, M.L. Spearman. – Irwin/McGraw-Hill, Boston, 2001. – P. 698.
- [4] Sinitsa L.M. Organization of production. / L.M. Tit. - Minsk: UP IVC Minfin, 2003. –C. 512. (In Russian)
- [5] Korobetsky Yu.P. Simulation models in flexible systems. / Yu.P. Korobetsky, S.K. Ramazanov. - Lugansk: Ed. VNU, 2003. - P. 280 (In Russian)
- [6] Pihnastyi O.M. Statistical theory of control systems of the flow production / O.M. Pihnastyi. –LAP LAMBERT Academic Publishing. –2018. - 436 p. –ISBN: 978-613-9-95512-1.
- [7] Berg R. Partial differential equations in modelling and control of manufacturing systems/ Netherlands, Eindhoven Univ. Technol., 2004. –P. 157
- [8] Phnastyi O.M. Questions of stability of macroscopic parameters of technological processes of mass production / V.P. Demutskiy, O.M.Phnastyi // Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. –Kiev: Publishing House "Academpriodika". - 2006. –№ 3. –C. 63-67. (In Russian)
- [9] Malkin I.G. The theory of stability of motion / I.G. Malkin. - Moscow: Nauka, 1966. -- P. 531. (In Russian)
- [10] Lyapunov A.M. General problem of motion stability / A.M. Lyapunov. - M. : Gostekhizdat, 1950. -- P. 395. (In Russian)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ЗАДАЧА СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ

Д.т.н. Пихнастый О.М., д.ф-м.н. Ходусов В.Д.

Аннотация. Рассмотрена задача проектирования системы оптимального управления случайными отклонениями потоковых параметров производственной линии от планового значения. В качестве фундамента для разработки алгоритма оптимального управления параметрами производственной линии использована PDE-модель производственной линии. Для построения системы оперативного управления потоковыми параметрами производственных линий использован метод функций Ляпунова. Сформулирована задача стабилизации значений потоковых параметров производственной линии (задача оперативного управления поточным производством). Получены уравнения для параметров производственной линии в малых возмущениях. Для оценки технологических ресурсов производственной системы, затрачиваемых на формирование управляющих воздействий, введен интеграл качества производственной линии, минимальное значение которого соответствует быстрому затуханию возникшего возмущения потоковых параметров. С учетом заданного критерия качества определена функция Ляпунова производственной линии. Найдены управляющие воздействия, которые обеспечивают асимптотическую устойчивость заданного планового состояния потоковых параметров производственной линии для установившегося и переходного режима функционирования.

Ключевые слова: производственная линия, система оперативного управления производством, PDE-модель, поточное производство.

ЗАВДАННЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОТОКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ

Д.т.н. Піхнастий О.М., д.ф-м.н. Ходусов В.Д.

Анотація. Розглянуто задачу проектування системи оптимального управління випадковими відхиленнями потокових параметрів виробничої лінії від планового значення. В якості фундаменту для розробки алгоритму оптимального управління параметрами виробничої лінії використана PDE-модель виробничої лінії. Для побудови системи оперативного управління потоковими параметрами виробничих ліній використаний метод функцій Ляпунова. Сформульовано задачу стабілізації значень потокових параметрів виробничої лінії (завдання оперативного управління поточним виробництвом). Отримано рівняння для параметрів виробничої лінії в малих збуреннях. Для оцінки технологічних ресурсів виробничої системи, що витрачаються на формування управляючих впливів, введений інтеграл якості виробничої лінії, мінімальне значення якого відповідає швидкого загасання виник обурення потокових параметрів. З урахуванням заданого критерію якості визначена функція Ляпунова виробничої лінії. Знайдено, що управляють, які забезпечують асимптотическую стійкість заданого планового стану потокових параметрів виробничої лінії для сталого та перехідного режиму функціонування.

Ключові слова: виробнича лінія, система оперативного управління виробництвом, PDE-модель, потокове виробництво.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУЗОПОТОКОВ В
МЕЖДУНАРОДНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ**

Д.т.н. Васянин В.А., Заяц Ю.В., Ушакова Л.П.

Аннотация. В статье приводится пример математического моделирования задач оптимизации иерархической структуры и распределения потоков грузов в реальной автотранспортной сети международных перевозок. Приведены математические формулировки основных задач оптимизации. Показано, что в результате решения оптимизационных задач удалось снизить затраты на обработку и транспортировку заданных потоков грузов на 21 %. Важной особенностью разработанных компьютерных программ является их универсальность, что позволяет проводить моделирование и оптимизацию функционирования не только традиционных логистических систем, но и производственных транспортно-складских систем, включающих узлы поставщиков сырья, производства товаров, склады и конечных потребителей.

Ключевые слова: математическое моделирование, иерархические автотранспортные сети, оптимизация структуры сети и распределения потоков грузов

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для существующих автотранспортных сетей в различных отраслях хозяйства характерно то, что на всех уровнях управления уже введены различные автоматизированные и информационные системы. Предусматривается дальнейшее их развитие с использованием новейших информационных технологий; современного методического, технического и математического обеспечений; систем поддержки принятия решений, рационально сочетающих формальные и неформальные методы принятия решений и интерактивный режим анализа и выбора оптимальных решений. Оптимизация структуры и распределения грузовых потоков в государственных и корпоративных (частных) автотранспортных сетях и автоматизация процессов управления в них являются актуальными и перспективными направлениями в достижении качественно нового уровня развития транспортной отрасли и интенсификации рыночных преобразований в Украине. Практические исследования показывают, что на протяжении последних лет объемы перевозок грузов в контейнерах и на поддонах в транспортных сетях Украины увеличиваются недостаточно интенсивно, мало работ, посвященных математическому моделированию задач перевозки мелкопартионных грузов, в то время как за рубежом, уже давно, таким задачам уделяется постоянное и пристальное внимание [1-9]. Так, например, в США в год перевозится более 15 миллиардов тонн мелкопартионных грузов на общую сумму более 9 триллионов долларов,

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

а доходы от транспортировки таких грузов составляют около 11% от валовой национальной продукции США [9]. Основными причинами этого являются организационно-техническая неподготовленность государственных и частных транспортных предприятий к внедрению современных информационно-аналитических систем, технологий и инструментальных средств автоматизированного проектирования, управления и поддержки принятия решений, в том числе и с использованием ситуационных центров обработки и представления информации. Кроме того, в большинстве существующих в настоящее время автоматизированных транспортных системах не реализованы научно обоснованные методы математического моделирования перевозки мелкопартионных грузов в контейнерах и на поддонах и отсутствуют инструментальные средства для управления такими перевозками. Поскольку физическая пространственная структура большинства автотранспортных сетей уже сложилась, в первую очередь, наибольший интерес представляет решение задач тактического планирования и оперативного управления, нацеленных главным образом на оптимизацию их функционирования при имеющихся ресурсах.

Цель исследования настоящей работы заключается в том, чтобы показать, как можно повысить экономическую эффективность функционирования реальной автотранспортной сети перевозок за счет математического моделирования и оптимизации ее структуры и процессов обработки и распределения потоков грузов. Моделирование выполняется с помощью компьютерных программ, которые входят в состав инструментальных программных средств информационно-аналитической системы поддержки принятия решений (ИАС ППР), разрабатываемой в Институте телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины.

2. ПОСТАНОВКА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ СЕТИ И СХЕМЫ СОРТИРОВКИ ПОТОКОВ.

Существующие и проектируемые территориально-распределенные автотранспортные сети являются многоуровневыми и состоят из децентрализованной распределенной магистральной сети и низовых фрагментарных сетей — зональных и внутренних на нижних уровнях иерархии. В работе рассматриваются автотранспортные многопродуктовые сети, для которых характерно наличие множества источников и стоков потоков грузов унифицированного размера. В многопродуктовой сети каждый узел может обмениваться потоками грузов со всеми остальными узлами. Потоки грузов могут быть заданы матрицей, в которой строки соответствуют узлам-источникам, столбцы

— узлам-стокам, а элементы матрицы определяют величину потока. В сети имеется четыре типа территориально расположенных узлов с известными географическими координатами. Узлы первого, второго и третьего типов называются магистральными и образуют магистральную сеть, а узлы четвертого типа находятся во внутренней зоне каждого магистрального узла и подчинены этому узлу. Узлы первого типа могут сортировать потоки грузов во все магистральные узлы в зоне своего обслуживания и во все другие узлы первого типа в магистральной сети. В узлах второго и третьего типа число магистральных направлений сортировки грузов ограничено числом узлов, находящихся внутри и на границе их зон обслуживания. В узлах магистральной сети все грузы перед отправкой должны сортироваться и упаковываться в транспортные блоки (контейнеры, поддоны) заданного размера. Размер транспортного блока измеряется количеством вмещающихся в него единиц груза. Поскольку количество грузов, адресованных в какой-либо магистральный узел сети, может быть значительно меньше размера транспортного блока, то они при сортировке могут несколько раз и в разных узлах объединяться с грузами, имеющими другие адреса назначения. При таком объединении грузов в узлах сети уменьшается количество направлений их сортировки и количество транспортных блоков, необходимых для их упаковки, но в отдельных узлах появляются дополнительные объемы сортировки грузов, не достигших адресов своего назначения. Кроме того, увеличивается время доставки получателю тех грузов, которые проходят дополнительную сортировку в транзитных узлах следования. В узлах четвертого типа потоки грузов не сортируются, а непосредственно отправляются в соответствующий магистральный узел. Узлы второго и третьего типа отличаются от узлов первого типа функциональными возможностями, уровнем технической оснащенности, числом обслуживающего персонала, функциями затрат на обработку потоков и пр. В этих узлах запрещена сортировка транзитных потоков грузов, а в узлах третьего типа также запрещена обработка транзитных потоков транспортных блоков. Типы узлов и зоны их обслуживания могут задаваться проектировщиком сети или определяться в автоматизированном режиме. В любом случае решается задача выбора оптимальной структуры сети по критерию минимума приведенных затрат на ее функционирование и устанавливается состав и количество узлов каждого типа. Описание принципов и технологии обработки и транспортировки потоков в иерархической сети, а также описание состава и работы ИАС ППР приведено в работе [10]. В работах [11, 12] рассмотрена математическая модель NP-трудной задачи упаковки и распределения потоков, в которой учтены особенности сортировки и транспортировки грузов в иерархической многопродуктовой сети и

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

предложен эвристический подход к ее решению, основанный на дискретном аналоге метода локального спуска. Следуя этим работам, запишем математическую модель задачи в следующем виде.

Пусть $G(N, P)$ — иерархическая магистральная сеть с множеством неориентированных дуг P , $p = |P|$ и множеством узлов $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$, $n = |N|$, где N_1, N_2, N_3 — множества узлов первого, второго и третьего типа соответственно. Узлы сети соответствуют пунктам сортировки, отправления, назначения и перегрузки потоков грузов, а дуги — участкам дорог транспортных сетей, связывающим узлы сети. Задана целочисленная матрица $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$, в которой значения a_{ij} равны сумме потоков грузов между узлами четвертого типа внутренней сети i -го узла. Эти потоки не подлежат распределению по магистральной сети, но должны учитываться при расчете затрат на сортировку потоков грузов в магистральных узлах. Принимается, что число узлов четвертого типа во внутренней сети каждого i -го магистрального узла, а значит, и число направлений сортировки q_{in}^i из этих узлов на внутренние узлы четвертого типа известны и относительно постоянны. Предполагается, что потоки между узлами четвертого типа, подчиненными разным магистральным узлам, учтены в потоковой матрице A . Процедура преобразования внешних потоков из узлов и в узлы четвертого типа в потоки на магистральной сети выполняется в компьютерной программе при решении задачи редукции полной сети к магистральной. Грузы a_{ij} из источников i в стоки j , $i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$ упаковываются в транспортные блоки размера $\omega \gg a_{ij}$ и отправляются получателям. Предполагается, что при сортировке в узлах, грузы могут объединяться с другими грузами только целиком.

Введем переменные x_{ij} и u_{ij} , определяющие соответственно величину потока грузов из i в j в исходных единицах и в транспортных

блоках, $u_{ij} = \left\lceil \frac{x_{ij}}{\omega} \right\rceil$, где знаки $\lceil \cdot \rceil$ означают округление числа до

большого целого. Обозначим S — множество пар индексов (i, j) корреспондирующих узлов в сети. Для выбора оптимальной иерархической структуры магистральной сети для различных составов типов узлов будем многократно решать задачу (1)-(3) до тех пор, пока не будет найдена такая структура, при которой достигается минимум

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

суммарных приведенных затрат на ее функционирование. Требуется найти минимум функции

$$F = \sum_{ij \in S} C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) + \sum_{i=1}^n C_{sort}^i(x_i, q_i) + \sum_{i=1}^n C_{load}^i(u_i) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ji} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ji}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} \leq h_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Здесь $x_{ij} = a_{ij} + \sum_{rs} a_{rs}^*$, если поток грузов a_{ij} не объединялся ни с каким другим потоком, где $\{a_{rs}^*\}$ — множество потоков, объединенных с потоком a_{ij} и $x_{ij} = 0$, если поток a_{ij} объединялся с каким-либо другим потоком или $i = j$; $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij})$ — дискретная функция транспортных затрат, зависящая от грузоподъемности транспортного средства W , количества транспортных блоков u_{ij} и длины d_{ij} — пути их транспортировки между узлами i и j ; $C_{sort}^i(x_i, q_i)$ — нелинейная функция затрат от суммарного объема $x_i = a_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (a_{ij} + a_{ji}) + \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}$ и количества направлений сортировки $q_i = q_{in}^i + \sum_{j=1}^n \delta_{ij}$ грузов, обрабатываемых в узле i ($\delta_{ij} = 1$, если $x_{ij} \neq 0$, и $\delta_{ij} = 0$, если $x_{ij} = 0$, а q_{in}^i определяет заданное количество направлений сортировки для обработки грузов a_{ii} , $i = \overline{1, n}$); $C_{load}^i(u_i)$ — нелинейная функция затрат от суммарного количества транспортных блоков $u_i = \sum_{j=1}^n (u_{ij} + u_{ji})$, обрабатываемых в узле i ; h_i , $i = \overline{1, n}$, — максимальная пропускная способность i -го узла по обработке транзитных грузов. Пропускная способность задается для транзитных потоков грузов, так как исходящие и входящие потоки для каждого узла должны быть обработаны безусловно. Для узлов второго и третьего типа $h_i = 0$.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

При решении задачи также учитываются дополнительные ограничения на время доставки $t_{ij} \leq T_{ij} \quad \forall ij \in S$ и число транзитных объединений $v_{ij} \leq v_{\max} \quad \forall ij \in S$ грузов при их транспортировке из узлов отправления в узлы назначения, где T_{ij} и $v_{\max}$ — соответственно заданное время доставки грузов получателю и максимально допустимое число транзитных объединений грузов. При расчете времени доставки используются параметры, явно не входящие в модель: заданное время на сортировку грузов и время на транзитную перегрузку транспортных блоков в узлах сети, средняя скорость движения транспортных средств и др. (см. разд. 3). Первая составляющая функции (1) определяет транспортные затраты, вторая — затраты на сортировку, а третья — затраты на обработку транспортных блоков. Выражения (2) и (3) представляют условия баланса и ограничения на пропускные способности узлов. В [13] показано, что при решении задачи выбора структуры сети дискретная функция $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij})$ может быть заменена на функцию удельной стоимости транспортировки потока грузов величиной u_{ij} на расстояние d_{ij} от грузоподъемности транспортного средства W .

Например, можно считать, что $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) = u_{ij}(k_1^\xi + k_2^\xi d_{ij})/W \quad \forall ij \in S$, где k_1^ξ, k_2^ξ — заданные коэффициенты, а $W \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$, $\xi = \overline{1, \alpha}$ — различная грузоподъемность транспортных средств в транспортных блоках размера ω . При этом структура сети не зависит от выбора значения W , а транспортные затраты рассчитываются для заданного значения W . Решение задачи (1)-(3) может выполняться в двух режимах: при экспертном задании и автоматическом выборе типов и зон обслуживания узлов. При экспертном задании структура сети определяется проектировщиками на основании опыта и практических знаний. В любом случае будет итеративно решаться задача (1)-(3) для различных составов типов узлов и зон их обслуживания до тех пор, пока не будет найдена структура, при которой достигается минимум целевой функции (1). Помимо структуры сети, основными результатами решения задачи (1)-(3) являются потоковые матрицы $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$ и $U = \|u_{ij}\|_{n \times n}$ грузов в исходных единицах и в транспортных блоках; матрица $T = \|T_{ij}\|_{n \times n}$ предварительных оценок времени доставки грузов получателям; справочная матрица объединения потоков грузов. Справочная матрица объединения потоков полностью определяет схему сортировки грузов во всех узлах сети и адресует потоки транспортных блоков, которые будут распределены по маршрутам транспортных

средств. В узлах реальной транспортной сети справочная матрица используется для автоматизированного управления оборудованием, осуществляющим процессы сортировки адресных грузов.

При решении задачи оптимизации структуры сети транспортные затраты и затраты на обработку транспортных блоков рассчитываются предварительно. Реальные оценки этих затрат и фактическое время доставки грузов получателю могут быть получены только после решения задачи распределения и маршрутизации сформированных транспортных блоков на транспортной сети [14].

3. ПОСТАНОВКА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И МАРШРУТИЗАЦИИ ПОТОКОВ

Содержательная постановка задачи заключается в выборе такой схемы распределения и маршрутизации потоков транспортных блоков, сформированных при решении задачи выбора иерархической структуры магистральной сети и схемы сортировки грузов в узлах сети, при которой максимально снижаются приведенные затраты на обработку и транспортировку потоков. Решение задачи должно осуществляться в интерактивном режиме и определять основные технико-экономические показатели функционирования магистральной сети при изменении исходных данных, параметров и ограничений транспортной модели.

В [15, 16] предложены математические модели NP-трудной задачи распределения и маршрутизации транспортных блоков с упакованными в них грузами или сообщениями. Следуя этим работам, рассмотрим математическую модель задачи в такой постановке.

Потоки грузов заданы исходной целочисленной матрицей $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$ и преобразованной целочисленной матрицей $A' = \|a'_{ij}\|_{n \times n}$, которая совпадает с матрицей $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$, полученной после решения задачи оптимизации структуры сети. Пусть $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|_{n \times n}$, $\tilde{a}_{ij} = \left\lceil \frac{a'_{ij}}{\omega} \right\rceil$ — матрица потоков транспортных блоков, совпадающая с матрицей $U = \|u_{ij}\|_{n \times n}$. Кроме того на вход задачи поступает матрица предварительных оценок времени доставки грузов получателям $T = \|T_{ij}\|_{n \times n}$, элементы которой выступают в качестве начальных ограничений на время доставки при решении задачи распределения и маршрутизации потоков транспортных блоков.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Обозначим через $\{m_k\}$, $k = \overline{1, l}$, — заданное множество проектируемых маршрутов транспортных средств, каждый из которых состоит из последовательности узлов и дуг сети G , соединяющей начальный и конечный узлы маршрута. Предполагается, что множество $\{m_k\}$ для каждой неориентированной дуги сети G содержит прямой и обратный маршруты, и в процессе решения задачи во множество $\{m_k\}$ могут включаться новые маршруты, генерируемые по определенным правилам. Множество $\{m_k\}$ может содержать несколько маршрутов, соединяющих любую пару узлов. С каждым маршрутом транспортной сети связаны его характеристики: функция среднегодовых приведенных затрат на эксплуатацию и содержание маршрута или тарифы за перевозку единицы груза на маршруте; грузоподъемность и периодичность движения транспортных средств; время прибытия и отправления транспортного средства для каждого узла в маршруте и др. Определим маршрутную мультисеть $G_M(N, P_M)$, построенную транзитивным замыканием узлов всех маршрутов из $\{m_k\}$, где N — множество узлов сети, P_M — множество ее ориентированных маршрутных дуг. Между любыми узлами α и β сети G_M существует маршрутная дуга, если они связаны хотя бы одним маршрутом транспортного средства из $\{m_k\}$. Введем переменные: $u_{ij,k}^{\alpha\beta}$ — неизвестный поток транспортных блоков из i в j , проходящий по дуге $p_{\alpha\beta} \in P_M$, полученной из маршрута m_k ($u_{ij,k}^{\alpha\beta}$ определяют дуговые потоки в транспортных блоках на маршрутной сети G_M); $u_{ij,k}^{\eta\xi}$ — неизвестный поток транспортных блоков из i в j , проходящий по дуге $p_{\eta\xi} \in P$ на маршруте m_k . Требуется минимизировать функцию

$$F = \sum_{k=1}^l C_{tr}^k \left(\left(\sum_{\eta\xi \in q_k} \sum_{ij \in S} u_{ij,k}^{\eta\xi} \right), d_k \right) + \sum_{\beta=1}^n C_{load}^{\beta} \left(\sum_{\alpha=1}^n \sum_{k=1}^l \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) \right) \quad (4)$$

при ограничениях:

$$\sum_{\beta=1}^n \sum_{k=1}^l u_{ij,k}^{\alpha\beta} - \sum_{\beta=1}^n \sum_{k=1}^l u_{ij,k}^{\beta\alpha} = \begin{cases} \tilde{a}_{ij} & \text{при } i = \alpha, \\ 0 & \text{при } i \neq \alpha, j \neq \alpha, \\ -\tilde{a}_{ij} & \text{при } j = \alpha, \text{ для } \alpha = \overline{1, n}, ij \in S; \end{cases} \quad (5)$$

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

$$\sum_{\alpha=1}^n \sum_{k=1}^l \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) - \sum_{j=1}^n (\tilde{a}_{\beta j} + \tilde{a}_{j\beta}) \leq 2b_{\beta}, \quad \beta = \overline{1, n}; \quad (6)$$

$$\sum_{ij \in S} u_{ij,k}^{\eta_{\xi}^k} \leq W_{\eta_{\xi}^k}^k \text{ для всех } \eta_{\xi}^k \in q_k, \quad k = \overline{1, l}; \quad (7)$$

$$\sum_{\beta=1}^n \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) \leq b_{\alpha}^k, \quad \alpha \in \nu_k, \quad k = \overline{1, l}; \quad (8)$$

$$u_{ij,k}^{\alpha\beta} \geq 0, u_{ij,k}^{\eta_{\xi}^k} \geq 0 - \text{целые числа.} \quad (9)$$

Предполагается, что имеется оператор $\Phi: u_{ij,k}^{\alpha\beta} \Rightarrow \{u_{ij,k}^{\eta_{\xi}^k}\}$, $p_{\alpha\beta} \in P_M$, $p_{\eta_{\xi}^k} \in P$, $ij \in S$, $k = \overline{1, l}$, отображающий поток по маршрутной дуге маршрута m_k в сети G_M на соответствующее подмножество дуг маршрута m_k в сети G ; учитываются ограничения на время доставки грузов получателю $t_{ij} \leq T_{ij}$, $ij \in S$.

В конкретных случаях решения задачи к указанным ограничениям могут быть добавлены ограничения на запрет разветвления потоков:

$$u_{ij,k}^{\alpha\beta} = \begin{cases} \tilde{a}_{ij}, & \text{если поток проходит по дуге } \alpha\beta \in m_k, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (10)$$

В формулах (4)-(8) введены обозначения: C_{tr}^k — нелинейная функция, определяющая зависимость транспортных затрат от количества транспортных блоков, передаваемых по маршруту m_k , и от длины маршрута d_k ; q_k — упорядоченное множество дуг из P , составляющих маршрут m_k ; C_{load}^{β} — нелинейная функция затрат на обработку транспортных блоков в узле β ; b_{β} , $\beta = \overline{1, n}$ — максимальная пропускная способность β -го узла в транспортных блоках, пропускная способность задается для транзитных потоков, так как исходящие и входящие потоки для каждого узла должны быть обработаны безусловно. Для узлов третьего типа $b_{\beta} = 0$; $W_{\eta_{\xi}^k}^k$ — грузоподъемность транспортного средства на маршруте m_k на дуге $\eta_{\xi}^k \in P$ в транспортных блоках, $W_{\eta_{\xi}^k}^k \in \{w_1, w_2, \dots, w_v\}$, где $w_1, w_2, \dots, w_v$ — целые, упорядоченные по возрастанию положительные числа; b_{α}^k — ограничения на максимальное суммарное число транспортных блоков, которое можно обработать в транзитном узле α на маршруте m_k ; ν_k —

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

упорядоченное множество узлов из N на маршруте m_k ; t_{ij} , T_{ij} , $ij \in S$ — расчетное и заданное время на доставку грузов a_{ij} из i в j .

В связи со сложностью сформулированной задачи в [15] предложен метод ее преобразования к некоторой совокупности более простых линейных многомерных задач о ранце со связующими ограничениями. Для решения преобразованной задачи разработаны алгоритмы, существенно использующие специфику ее структуры, абстрактные типы данных и приемы, характерные для эвристических алгоритмов решения многомерной задачи о ранце.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

По существу, моделирование иерархической структуры и распределения грузопотоков в автотранспортной сети представляет собой компьютерную технологию, состоящую из сценариев действий проектировщика и программной системы при выборе структуры, входных данных и параметров проектируемой сети. Проектировщик в режиме диалога может изменять значения исходных данных и параметров задачи, получать множество решений и выбирать из них наиболее подходящее. При этом он всегда может сравнить варианты решения по оценке технико-экономических показателей функционирования сети в зависимости от выбранных параметров и критериев предпочтения. Описание работы программ оптимизации структуры сети и распределения и маршрутизации потоков транспортных блоков приведено в [17, 18]. Приведем результаты решения задач оптимизации структуры и распределения грузопотоков на реальной автотранспортной сети международных перевозок. Моделирование проводилось на сети узлов Украины (Киев), России (Москва, Санкт-Петербург), Турции (Стамбул, Измир, Бурса, Анкара), Молдавии (Кишинев), Словакии, Польши, Чехии, Венгрии, Болгарии, Италии, Германии (Берлин, Франкфурт-на-Майне, Мюнхен), Франции (Париж, Лион). Принимались следующие значения исходных данных и параметров: количество узлов в сети $n = 24$; размер одного европоддона (транспортного блока) $\omega = 3$ единицам грузов; время на сортировку грузов в узлах сети - 24 ч; грузоподъемность автотранспортных средств на всех маршрутах $\{m_k\}$, $k = \overline{1,60}$ выбиралась равной $W = 33$ и $W = 45$ (33 и 45 европоддонов в одном 20 т. транспортном средстве; время на транзитную перегрузку транспортных блоков в узлах сети - 12 ч; время стоянки транспортных средств в конечных узлах маршрутов - 22 ч; средняя скорость движения транспортных средств - 80 км/час; пропускные способности узлов по обработке транзитных потоков

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

единичных грузов и транспортных блоков не ограничивались (h_i и b_i , $i = \overline{1,24}$); время доставки грузов получателю t_{ij} рассчитывалось в сутках, поэтому максимальное время доставки задавалось в сутках и принималось $T_{ij} = 15$ сут. для всех $ij \in S$; максимальное число $v_{\max}$ объединений грузов в транзитных узлах не ограничивалось; разветвление потоков транспортных блоков было запрещено. Движение на маршрутах $\{m_k\}$, $k = \overline{1,60}$ транспортных средств разрешалось в обе стороны. Для расчета затрат на обработку и транспортировку заданных потоков грузов (исходная матрица A) использовались формулы транспортной компании.

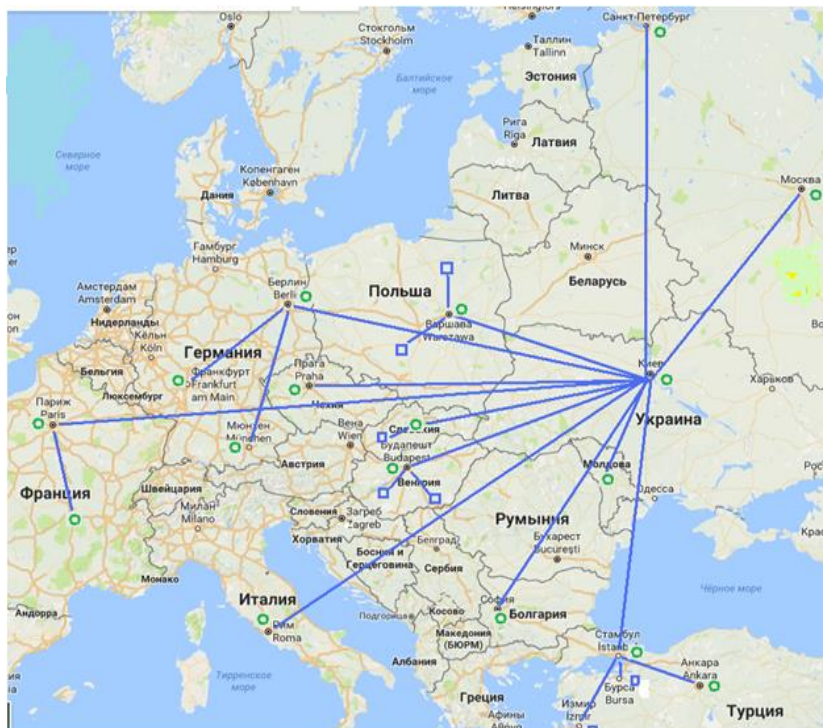


Рис.1- Зеленые окружности - узлы первого типа, синие квадраты - узлы второго типа

В начальной структуре сети все узлы были узлами первого типа, и потоки формировались и распределялись в соответствии с принятой в

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

компании логистической схемой. Задачи оптимизации структуры сети и распределения грузопотоков решались для грузоподъемности транспортных средств $W = 33$ и $W = 45$. После оптимизации структуры сети, в нее было включено 17 узлов первого типа и 7 узлов второго типа для $W = 33$ и $W = 45$, рис. 1.

Таблица 1. Результаты решения задач на исходной и оптимизированной сети для грузоподъемности транспортных средств $W = 33$ и $W = 45$

Результаты решения	Исходная сеть			
	$W = 33$		$W = 45$	
	$n_1 = 24,$ $n_2 = 0$	$n_1 = 17,$ $n_2 = 7$	$n_1 = 24,$ $n_2 = 0$	$n_1 = 17,$ $n_2 = 7$
Полные затраты (млн. грн.)	2,433	1,922	1,861	1,475
Транспортные затраты	2,155	1,664	1,583	1,217
Затраты на сортировку	0,135	0,128	0,135	0,128
Затраты на погрузку-выгрузку	0,143	0,130	0,143	0,130
Общее снижение затрат	0,511 (21 %)		0,386 (20,74 %)	
Количество маршрутов	60	60	60	60
Дополнительно введенные маршруты	0	0	0	0
Всего маршрутов	60	60	60	60
Рабочий парк транспортных средств	179	179	179	179
Средняя загрузка транспортного средства на маршруте	0,226	0,175	0,166	0,127
Рабочий парк европоддонов	1722	1446	1725	1443
Средняя загрузка европоддонов	0,937	0,897	0,941	0,898
Среднее количество направлений сортировки в узле	17	12	17	12
Минимальное время доставки	2,52	2,52	2,52	2,52
Максимальное время доставки	9,46	8,64	9,46	8,64
Среднее время доставки	4,14	4,16	4,16	4,16

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Результаты решения задач на исходной и оптимизированной сети для грузоподъемности транспортных средств $W = 33$ и $W = 45$ приведены в табл. 1 и на рис. 2. Из таблицы видно, что в результате решения задач оптимизации для $W = 33$ и $W = 45$ общее снижение затрат на обработку и транспортировку заданных потоков грузов составило порядка 21 %, затраты уменьшились соответственно на 0,511 и 0,386 млн. гривен. Все потоки были распределены по заданным маршрутам транспортных средств без введения дополнительных маршрутов. Для бесперебойного функционирования сети при ежесуточной отправке заданных потоков грузов потребителям, в обоих случаях потребовалось 179 транспортных средств. Рабочий парк европоддонов соответственно уменьшился на 276 и 282 единицы при достаточно высоком среднем коэффициенте их загрузки. Среднее количество направлений сортировки в узле уменьшилось до 12. Особо следует отметить, что в обоих случаях - до оптимизации и после нее, получен очень низкий коэффициент загрузки транспортных средств. Это свидетельствует о том, что транспортное предприятие могло бы уменьшить грузоподъемность своих транспортных средств и значительно снизить производственные издержки. Выбор большей грузоподъемности оправдан только в случае сильного колебания грузопотоков на отдельных промежутках времени.

Время решения задач не превышало 112 секунд на ПК с процессором Intel Core 2 Duo с тактовой частотой 2,66 ГГц и оперативной памятью 2 Гб. Все программы написаны в среде Microsoft Developer Visual Studio под управлением ОС Windows XP.

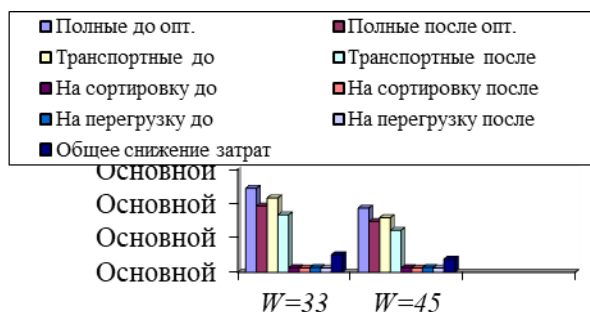


Рис. 2 - Результаты решения задач на исходной и оптимизированной сети для грузоподъемности транспортных средств

5. ВЫВОДЫ

Предложенная компьютерная технология моделирования распределения грузопотоков на автотранспортной сети включает

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

решение задач оптимизации иерархической структуры сети и схемы распределения и маршрутизации потоков грузов. Технология позволяет в интерактивном режиме моделировать различные варианты сети, изменяя топологию, иерархическую структуру, потоки, параметры и ограничения задач, и из семейства полученных результатов выбирать наилучший вариант с учетом выбранной функции цели и принятых ограничений; рассчитывать технико-экономические показатели функционирования сети при заданных и прогнозных значениях потоков, оценивать стоимость дополнительных ресурсов и планировать величину потребных инвестиций на модернизацию рабочего парка транспортных средств, что в конечном итоге дает возможность повысить эффективность функционирования сети за счет оптимизации использования ее ресурсов и снижения производственных затрат на обработку и транспортировку потоков. Снижение затрат позволяет уменьшать тарифы на перевозку грузов, привлекать дополнительную клиентуру и обеспечивать постоянный прирост прибыли. Так, в результате решения оптимизационных задач на реальной автотранспортной сети международных перевозок удалось снизить затраты на обработку и транспортировку заданных потоков грузов на 21 %.

Важной особенностью разработанного инструментария является то, что с его помощью можно проводить моделирование и оптимизацию функционирования не только традиционных логистических систем, но и производственных транспортно-складских систем, включающих узлы поставщиков сырья, производства товаров, склады и конечных потребителей.

При этом транспортная сеть может быть представлена различными сочетаниями автомобильных, железнодорожных, авиационных, морских и речных маршрутов транспортных средств с перевозкой грузов в контейнерах, пленочной упаковке и на поддонах. В случае наличия нескольких видов потоков грузов, транспортируемых в сети и отличающихся такими характеристиками как скорость доставки (срочные или скоропортящиеся грузы), категория качества обслуживания (особо ценные грузы), негабаритные грузы, для каждого вида потока грузов может быть использована отдельная модель транспортной сети со своей функцией цели и ограничениями, что обеспечивается универсальностью разработанного инструментария.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Cohn A., Barnhart C. Improving Crew Scheduling by Incorporating Key Maintenance Routing Decisions / A. Cohn, C. Barnhart // Operations Research. – 2003. – Vol. -51. – P. 387 - 396.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- [2] Cordeau J., Stojković G., Soumis F., Desrosiers J. Benders Decomposition for Simultaneous Aircraft Routing and Crew Scheduling / J. Cordeau, G. Stojković, F. Soumis, J. Desrosiers // *Transportation Science*. – 2001. – Vol. – 35. – P. 375 - 388.
- [3] Cordeau J., Soumis F., Desrosiers J. A Benders Decomposition Approach for the Locomotive and Car Assignment Problem / J. Cordeau, F. Soumis, J. Desrosiers // *Transportation Science*. – 2000. – Vol. 34. – P. 133 - 149.
- [4] Klabjan D., Johnson E., Nemhauser G., Gelman E., Ramaswamy S. Airline Crew Scheduling with Time Windows and Plane-Count Constraints / D. Klabjan, E. Johnson, G. Nemhauser, E. Gelman, S. Ramaswamy // *Transportation Science*. – 2002. – Vol. – 36. – P. 337 - 348.
- [5] Lohatepanont M., Barnhart C. Airline Schedule Planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment / M. Lohatepanont, C. Barnhart // *Transportation Science*. – 2004. – Vol. – 38. – P. 19 - 32.
- [6] Lübbecke M., Zimmermann U. Engine Routing and Scheduling at Industrial In-Plant Railroads / M. Lübbecke, U. Zimmermann // *Transportation Science*. – 2003. – Vol. – 37. – P. 183 - 197.
- [7] Newman A., Yano C. Scheduling Direct and Indirect Trains and Containers in an Intermodal Setting / A. Newman, C. Yano // *Transportation Science*. – 2000. – Vol. – 34. – P. 256 - 270.
- [8] Wu P., Hartman J., Wilson G. An Integrated Model and Solution Approach for Fleet Sizing with Heterogeneous Assets / P. Wu, J. Hartman, G. Wilson // *Transportation Science*. – 2005. – Vol. - 39. – P. 87 - 103.
- [9] Cohn A., Root S., Wang A., Mohr D. Integration of the Load-Matching and Routing Problem with Equipment Balancing for Small Package Carrier // *Transportation science*. – 2007. – **41**(2). – P. 238-252.
- [10] Васянин В.А., Трофимчук А.Н. Автоматизация процессов принятия решений в многопродуктовых коммуникационных сетях с мелкопартионными дискретными потоками // *Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць*. — Київ, 2010. – Вип. 5. – С. 172-213
- [11] Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A., Kuzmenko V.N. Complexity of One Packing Optimization Problem // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2016. – **52**(1). — P. 76-84.
- [12] Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A., Kuzmenko V.N. Optimization Algorithms for Packing of Small-Lot Correspondence in Communication Networks // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2016. – **52**(2). – P. 258-268.
- [13] Васянин В.А., Трофимчук А.Н. Задача выбора иерархической структуры многопродуктовой коммуникационной сети с мелкопартионными дискретными потоками // *Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць*. – Київ, 2012. – Вип. 10. – С. 182-204.
- [14] Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A. Simulation of Packing, Distribution and Routing of Small-Size Discrete Flows in a Multicommodity Network // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2015. – **47**(7). – P. 15-30.
- [15] Vasyanin V.A. Problem of Distribution and Routing of Transport Blocks with Mixed Attachments and Its Decomposition // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2015. – **47**(2). – P. 56-69.
- [16] Васянин В.А., Трофимчук А.Н., Ушакова Л.П. Экономико-математические модели задачи распределения потоков в многопродуктовой коммуникационной сети

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

// Математичне моделювання в економіці. – 2016. – № 2. – С. 5–21.

[17] Трофимчук А.Н., Васянин В.А. Компьютерное моделирование иерархической структуры коммуникационной сети с дискретными многопродуктовыми потоками // УСиМ. – 2016. – № 2. – С. 48–57.

[18] Васянин В.А. Компьютерное моделирование распределения и маршрутизации дискретных многопродуктовых потоков в коммуникационной сети // УСиМ. – 2016. – № 3. – С. 43–53.

MATHEMATICAL MODELING OF CARGO FLOWS IN THE INTERNATIONAL TRANSPORT NETWORK

Dr. Sci. Vasyanin V.A., Zaiats Y.V., Ushakova L.P.

Abstract. The article provides an example of mathematical modeling of optimization problems for the hierarchical structure and distribution of cargo flows in a real road transport international network. Mathematical formulations of the main optimization problems are given. It is shown that as a result of solving optimization problems, it was possible to reduce the cost of processing and transportation of given cargo flows by 21%. An important feature developed computer programs is their versatility, which allows modeling and optimizing the functioning of not only traditional logistics systems, but also production transport-storage systems, which are including nodes of suppliers of raw materials, production of goods, a warehouses and end consumers.

Keywords: mathematical modeling, hierarchical transport networks, optimization of structure of network and distribution of cargo flows

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАНТАЖОПОТОКІВ В МІЖНАРОДНІЙ ТРАНСПОРТНІЙ МЕРЕЖІ

Д.т.н. Васянін В.О., Заяць Ю.В., Ушакова Л.П.

Анотація. У статті наводиться приклад математичного моделювання задач оптимізації ієрархічної структури і розподілу потоків вантажів в реальному автотранспортній мережі міжнародних перевезень. Наведено математичні формулювання основних завдань оптимізації. Показано, що в результаті рішення оптимізаційних задач вдалося знизити витрати на обробку і транспортування заданих потоків вантажів на 21%. Важливою особливістю розроблених комп'ютерних програм є їх універсальність, що дозволяє проводити моделювання та оптимізацію функціонування не тільки традиційних логістичних систем, а й виробничих транспортно-складських систем, що включають вузли постачальників сировини, виробництва товарів, склади і кінцевих споживачів.

Ключові слова: математичне моделювання, ієрархічні автотранспортні мережі, оптимізація структури мережі і розподілу потоків вантажів

**ВИВЕДЕННЯ МАТРИЦІ ЖОРСТКОСТІ ДЛЯ ТЕТРАІДАЛЬНОГО
СКІНЧЕНОГО ЕЛЕМЕНТА МЕТОДОМ МССЕ**

Лаврик В.В., д.т.н. Гоменюк С.І., д.т.н. Межуєв В.І.

Анотація. Основним етапом розрахунку конструкцій з еластомерних матеріалів методом скінчених елементів (МСЕ) в переміщеннях є виведення матриць жорсткості. Властивості еластомерів багато в чому визначають існування, стійкість і збіжність рішень МСЕ, а також ефективність методів їх вирішення в цілому.

Багаторічний досвід вирішення різних задач механіки деформованих твердих тіл на основі МСЕ показав, що традиційний варіант МСЕ нерідко має порівняно повільну збіжність, особливо для оболонок і та масивних тіл складних криволінійних форм. Науково доведено, що уповільнена збіжність характерна для тих випадків, коли прийнятий варіант апроксимації переміщень не дозволяє точно описати зміщення СЕ.

Для вирішення цієї проблеми були розроблені на підставі моментної схеми скінчених елементів (МССЕ) варіаційні співвідношення для тетраїдального скінченного елемента, які вирішують перераховані вище проблеми механіки еластомерів.

Ключові слова: метод скінчених елементів, момент схеми скінчених елементів

1. ВСТУП

Гуми і гумо-подібні матеріали – еластомери – широко застосовуються в різних галузях промисловості і техніки. У зв'язку з їх розповсюдженням використанням в народному господарстві виникає потреба у раціональному проектуванні конструкцій, виготовлених на їх основі, з урахуванням ефективності та високої якості роботи [1]. До конструкцій, виготовлених на базі еластомерів, відносять гумові ущільнювачі рухомих і нерухомих з'єднань; прокладки довільного перетину зі складною геометрією; пластини, диски, муфти, демпфери, підвіски, підшипники, кільця, шарніри, які застосовуються в різних областях техніки. Численні приклади використання тонкошарових гумо-металевих елементів – ТГМЕ в техніці представлені у статті [2], а також у наукових роботах [3,4]. Як правило, сучасні конструкції складаються з різноманітних матеріалів. При цьому значні навантаження відчувають еластомерні частини. Отже, актуальним є дослідження їх жорсткості, міцності, теплоутворення при циклічному деформуванні. Гумо - подібні матеріали мають свою індивідуальну структуру побудови. Вона заснована на багаторазових повторюваних однакових ланках і їх довжина в десятки тисяч разів перевершує поперечні розміри. Це обумовлює

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

гнучкість молекулярних ланцюгів, що приводить до появи високо-еластичних властивостей. Отже, еластомери мають деякі особливості [5]:

1. Здатність під впливом зовнішнього як постійного, так і циклічно мінливого у часі навантаження відчувати значні деформації без руйнувань. 2. Слабка стисливість еластомеру, врахування якої викликає деякі обчислювальні труднощі в порівнянні зі звичайними матеріалами. 3. При деформації і високо-еластичному стані рівновага між зусиллями і переміщеннями встановлюється протягом деякого проміжку часу і носить явно виражений релакційний характер.

Хоча фізичні дослідження еластомерів розпочались більше ста років тому, на даний момент немає універсальних аналітичних методів дослідження їх напружено-деформованих станів. Це пов'язано зі складністю розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, що описують їх поведінку [6]. Реалізація поширених чисельних методів для обліку наведених вище особливостей еластомерів робить актуальними зміни вже існуючих розрахункових схем, розробку нових ефективних чисельних методів і алгоритмів дослідження з використанням сучасних ЕОМ. Це пов'язано з тим, що в механіці еластомерів при знаходженні компонент матриці жорсткості (1) розраховують матрицю пружних постійних матеріалу (2).

$$\left[K^{s't'} \right] = [A]^T \left[F_{ij}^{s'} \right]^T \left[H^{ijkl} \right] \left[F_{kl}^{t'} \right] [A] + [A]^T \left[F_{\theta}^{s'} \right]^T \left[H^{\theta} \right] \left[F_{\theta}^{t'} \right] [A] \quad (1)$$

$$[C] = \frac{E}{(1+\lambda)(1-2\lambda)} \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda & 0 \\ \lambda & 1-\lambda & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\lambda}{2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де E -модуль пружності Пуассона, λ - коефіцієнт Пуассона. (У формулі (2) приведено співвідношення матриці $[C]$ для двовимірного випадку).

При прагненні λ до 0,5 матриця $[C]$ становиться виродженою. Тому, у механіці еластомерів існують певні класи задач, в яких виникають істотні труднощі, що призводить до виродження коефіцієнтів матриці системи рівнянь. Методи, які дозволяли б знаходити правильне рішення, розвивалися в різних напрямках. Першому напрямку властиві роботи з аналізу нелінійних задач (геометрична нелінійність, великі деформації) на базі поєднання методу штрафних функцій і МСЕ в конкретних завданнях [6-9]. В основі другого методу покладено спосіб скороченого інтегрування [10]. Він полягає у тому, що поля переміщень і величини, які відповідалі за слабку стисливість еластомера, апроксимуються різними функціями. Як правило, ступінь полінома для другої функції на одиницю менше, ніж для першої. Четвертий напрямок характеризується

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

розробкою змішаних варіаційних принципів, в яких апроксимувались незалежні поля переміщень і поля деформацій або поля переміщень і поля напружень [8]. В основі його методу лежить принцип варіювання компоненти переміщень і середньої напруги. Цей варіаційний принцип знайшов широке застосування в розрахунках конструкцій з еластомерів. А. С. Сахаровим запропонована так звана моментна схема методу скінченних елементів [11]. Вона ґрунтується на тому, що апроксимуючу функцію розкладають в ряд Тейлора і згодом відкидають n -е члени ряду, які реагують на зміщення і фіктивні зрушення при деформаціях. Це дозволяє врахувати основні властивості жорстких зміщень для ізопараметричних і криволінійних скінченних елементів ізотропних пружних тіл. При цьому точні рівняння зв'язку деформації і переміщень замінюються наближеними. Таким чином, аналіз представлених в цьому огляді робіт свідчить про те, що в даний час багато питань, які належать до проблеми вирішення завдань механіки еластомерів, розглянуті на недостатньому рівні [12-15]. Це виражається в тому, що існуючі методи зводять розрахунки конструкцій до системи спрощення гіпотез (зведення тривимірної задачі до двовірної лінійності деформації, нестисливі або слабо-стисливого матеріалу) або представлені в такому вигляді, що є незручними для практичних розрахунків [16]. У першу чергу ці проблеми відносяться до вирішення завдань в просторовому поданні СЕ. У зв'язку з цим актуальною є проблема розробки і розвитку універсальних методів розрахунків на основі МСЕ із залученням ЕОМ в тривимірній постановці [17]. При вирішенні задач механіки еластомерів виникає проблема вибору найбільш вдалої (по можливості оптимальної) обчислювальної схеми, що базується на цілому ряді конкретних методів обчислювальної математики [18]. На жаль, на даному етапі, в силу недостатніх наукових досліджень, говорити про оптимальність тієї чи іншої обчислювальної схеми важко, і ця обставина часто змушує просто будувати різні обчислювальні алгоритми і потім порівнювати їх позитивні та негативні сторони. Отримані кінцеві і деякі проміжні результати обчислень повинні досліджуватися на відповідність їх механічному змісту задачі [19,20]. Це також є необхідною частиною розрахунку, так як похибки округлення і прояв нестійкості деяких обчислювальних алгоритмів може значно спотворити результат. Процес аналізу результатів є дуже трудомістким. Іноді на нього витрачається часу більше ніж на сам розрахунок [21-25]. Метою дослідження є виведення матриці жорсткості методом МССЕ для тетраїдального скінченного елемента. Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано такі основні задачі: - вивести математичну модель матриці жорсткості конструкції зі слабкостисливих матеріалів для

тетраїдального скінченного елемента; - розрахувати напружено-деформований стан такої еластомерної конструкції як гумова зірочка.

Об'єкт дослідження – інженерні конструкції та споруди з еластомерів. Предмет дослідження – моделювання напружено-деформованого стану еластомерних конструкцій. Методи дослідження. При розробці моделі для розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій використовувався модифікований метод скінченних елементів – моментна схема скінченного елемента для слабкостисливих матеріалів. Також у процесі дослідження використовувалися методи, що базуються на математичному моделюванні, математичному аналізі, аналітичній геометрії, обчислювальній математиці, об'єктно-орієнтованому програмуванні.

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Виведення варіаційних співвідношень в статистиці для тетраїдального СЕ

Припустимо, що область, яку займає елемент, зображена в тетраедр. У центр «ізопараметричного» СЕ помістимо початок місцевої системи координат Охуз. Виведемо формули матриці жорсткості для тетраїдального скінченного елемента (рис. 1).

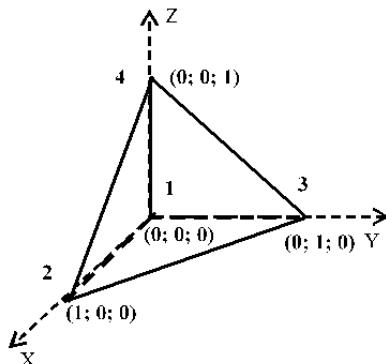


Рис. 1– Розподіл вузлів у лінійному тетраїдальному елементі

Матриця перетворень $[A]$ буде мати наступний вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Матриця $[F_{ij}^{s'}]$ набуває наступний вираз:

$$[F_{ij}^{s'}] = \begin{bmatrix} F_{11}^1 & F_{11}^2 & F_{11}^3 \\ F_{22}^1 & F_{22}^2 & F_{22}^3 \\ F_{33}^1 & F_{33}^2 & F_{33}^3 \\ F_{12}^1 & F_{12}^2 & F_{12}^3 \\ F_{13}^1 & F_{13}^2 & F_{13}^3 \\ F_{23}^1 & F_{23}^2 & F_{23}^3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Підматриці матриці $[F_{ij}^{s'}]$ знаходяться за наступними формулами:

$$\begin{aligned} [F_{11}^{s'}] &= \begin{bmatrix} 0 & b_{100}^{s'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & [F_{22}^{s'}] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & b_{010}^{s'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & [F_{33}^{s'}] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & b_{001}^{s'} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ [F_{12}^{s'}] &= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & b_{010}^{s'} & b_{100}^{s'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & [F_{13}^{s'}] &= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & b_{001}^{s'} & 0 & b_{100}^{s'} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & [F_{23}^{s'}] &= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & b_{001}^{s'} & b_{010}^{s'} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Матрицю степеневих функцій для формули переміщень $[H^{ijkl}]$ представимо у вигляді:

$$[H^{ijkl}] = |J| \cdot \begin{bmatrix} 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} = 2\mu \cdot |J| \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Наступним кроком виведемо формулу для знаходження питомої енергії деформації для функції зміни об'єму. Матриця зв'язку між матрицею вузлових зміщень та матрицею степеневих функцій $[F_{\theta}^{s'}]$ має наступний вигляд:

$$[F_{\theta}^s] = \begin{bmatrix} F_{\theta}^1 & \theta & \theta \\ \theta & F_{\theta}^2 & \theta \\ \theta & \theta & F_{\theta}^3 \\ \theta & \theta & \theta \\ \theta & \theta & \theta \\ \theta & \theta & \theta \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\text{де } [F_{\theta}^1] = \begin{bmatrix} 0 & b_{100}^s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [F_{\theta}^2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & b_{010}^s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[F_{\theta}^3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & b_{001}^s \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Матрицю степеневих функцій для формули зміни об'єму $[H^{\theta}]$ представимо у вигляді:

$$[H^{\theta}] = |J| \cdot \begin{bmatrix} \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Таким чином, підставивши у формулу (1) формули (3-8) отримаємо значення матриці жорсткості для тетраїдального скінченного елемента, використовуючи тільки сталі μ , λ , та координати z_k^{ij} .

Дослідження стискання гумової зірочки

У наступному прикладі проведемо порівняння двох методів: методу скінчених елементів та моментній схемі скінченного елемента на базі інструментальної системи FORTU- FEM [26]. Для цього розглянемо наступний об'єкт. Пружна кулачкова муфта з зірочкою призначена для співвісного з'єднання валів механізмів, наприклад, таких як редуктора і електродвигуна (рис. 2). Дана муфта виготовлена з двох напівмуфт, з внутрішніх сторін оснащена маточинами-кулачками між якими укладено

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІОННИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

елемент гумова зірочка. Зубці зірочки працюють на стиск. При передачі моменту в кожен сторону працює половина зубців.



Рис. 2 - Представлення гумової зірочки а) Зовнішній вигляд); б) У пружній муфті

Працездатність резинової зірочки визначається величиною напружень зминання. Зірочки для пружних кулачкових муфт призначені для з'єднання співвісних циліндричних валів при передачі крутного моменту від 2,5 до 400 Н/м і зменшення динамічних навантажень. Розрахунок об'єкта буде проводитися з направленням крутного моменту проти годинної стрілки. Сила навантаження прикладена до кожного зубця у точках, які максимально віддалені від центра зірочки. Характеристики матеріалу бралися з техпластини ТМКЩ-С Гост 7338-90. Дискретизація тривимірної області на скінченні елементи здійснювалася модифікованим алгоритмом Рапперта для тривимірного випадку. Він полягає в тому, що спочатку модель «грубо» розбивається на окремі елементи. Поверхня тривимірної області представляється як сукупність багатокутних областей - полігонів. Іншими словами, спочатку відбувається дискретизація поверхні тривимірної області. Потім все вершини триангульованої поверхні цієї області вставляються всередину супертетраїдра [27]. У процесорі системи FORTU-FEM для точного розв'язку системи рівнянь застосовується модифікований метод Холецького [28]. Скінчено - елементна дискретизація в цьому дослідженні проводилася тетраїдальними та паралелепіпедними елементами (рис.3)

У таблиці 1 представлені результати розрахунку дії навантаження, яке прикладене до кожного зубця зірочки у верхній точці. Крутий момент для дослідження брався проти годинної стрілки та дорівнював 10 Н/м. Об'єкт у випадку МСЕ розбитий на 15169 вузлів (74154 скінчених елементів), у випадку МССЕ- 15169 вузлів (12359 скінчених елементів).

Розглянутий приклад дозволяє зробити висновок, що результати, отримані по МССЕ з використанням варіаційного принципу Лагранжа, при коефіцієнті Пуассона, який змінюється від 0,470 до 0,4999, хорошо узгоджується з розв'язками, отриманими за допомогою традиційної схеми МСЕ. З приведених рішень видно, що при дослідженні конструкції

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІОННИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

моментна схема дає кращі результати в порівнянні з методом стандартних скінченних елементів (рис. 4).

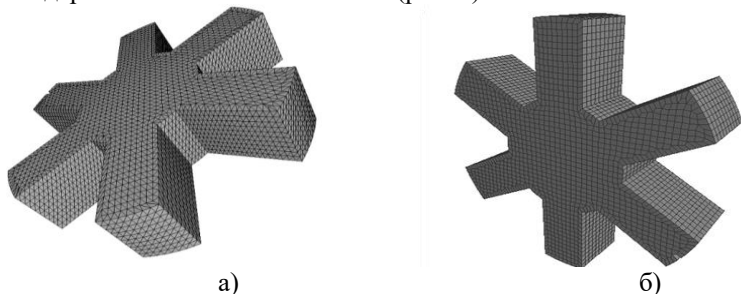


Рис. 3 - Скінчено- елементне представлення гумової зірочки
а) тетраїдальними СЕ; б) параллелепіедними СЕ

Таблиця 1. Результати розрахунку зірочки

Коефіцієнт Пуасона, ν	Модуль Юнга, Па	Максимальний осад зірочки, (звичайна схема МСЕ), 10^{-5}	Максимальний осад зірочки, (МССЕ), 10^{-5}
0,470	90000	4,784	4,221
0,473	90000	4, 685	4, 145
0, 478	100000	5,103	4,999
0, 480	100000	5,035	4,837
0, 482	100000	5,012	4,821
0, 488	100000	5,001	4,801
0, 490	100000	4, 957	4,789
0, 492	100000	4,942	4,752
0, 496	100000	4,901	4,723
0, 499	110000	5,309	5,123
0, 4999	110000	5,267	5,089

Використання МССЕ для розрахунку конструкцій з слабостисливих матеріалів значно покращує результати чисельного розрахунку, наближаючи їх до аналітичних.

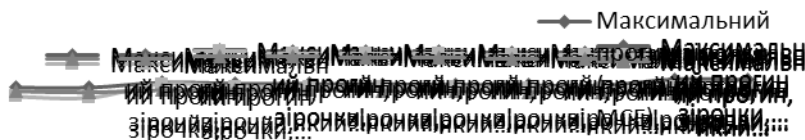


Рис. 4 - Результати обчислень за різними схемами. Залежності від коефіцієнта Пуасона та модуля Юнга для різних типів зірочки ($m \cdot 10^{-5}$)

3. ВИСНОВОК

У роботі представлені варіативні співвідношення для тетраїдального СЕ на основі моментної схеми методу скінчених елементів. Результати дозволяють врахувати основні властивості жорстких переміщень для ізопараметричних та криволінійних скінчених елементів. У подальший роботі запропонований метод буде використаний для обчислення напружено-деформованому стану еластомерних конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Marcin Kamiński, Bernd Lauke, Chapter Four- Statistical and Perturbation-Based Analysis of the Unidirectional Stretch of Rubber-Like Materials, Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposites Fundamentals and Applications 2019, Pages 65-73.
- [2] Maziar Ramezani, Zaidi M. Ripin, Characteristics of elastomeric materials, Rubber-Pad Forming Processes, Technology and Applications, 2012, Pages 43-64.
- [3] Külcü, İ.D. A hyperelastic constitutive model for rubber-like materials. Arch Appl Mech 90, 615–622 (2020).
- [4] H. Lee S, J. Shin K, S. Msolli et al. “Prediction of dynamic equivalent stiffness for rubber bushing using the finite element method and empirical modeling,” International Journal of Mechanics and Materials in Design, vol. 15, no. 1, pp. 77–91, 2019.
- [5] F. Zhao, “Continuum constitutive modeling for isotropic hyperelastic materials,” Advances in Pure Mathematics, vol. 06, no. 09, pp. 571–582, 2016.
- [6] Zihan Zhao, Xihui Mu, Fengpo Du, Modeling and Verification of a New Hyperelastic Model for Rubber-Like Materials, Volume 2019, Article ID 2832059, 10 pages.
- [7] Y. Chandra, S. Adhikari, E.I. Saavedra Flores, L. Figiel. Advances in finite element modelling of graphene and associated nanostructures. Materials Science and Engineering: R: Reports 2020, 140,
- [8] Grebenyuk S.N. The shear modulus of a composite material with a transversely isotropic matrix and a fiber. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Vol. 78 No. 2, 2014. P. 270-276.
- [9] FabioGalbusera, FrankNiemeyer, Mathematical and Finite Element Modeling, Biomechanics of Spine, Basic Concepts, Spinal Disorders and Treatments, 2018, Pages 239-255.
- [10] Erik R. Denlinger, Thermo-Mechanical Modeling of Large Electron Beam Builds, Thermo-Mechanical Modeling of Additive Manufacturing, 2018, Pages 167-181..
- [11] Bazhenov, B.A., Sakharov, A.S., Solovei, N.A. et al. Moment scheme of the finite-element method in problems of the strength and stability of flexible shells subjected to the action of forces and thermal factors. Strength Mater 31, 499–504 (1999).
- [12] V. Mezhuyev, V. Lavrik, Improved Finite Element Approach for Modeling Three-Dimensional Linear-Elastic Bodies, Indian Journal of Science and Technology, Vol 8 (30), November 2015, Pages 1-11.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- [13] S.Kasas, T.Gmur, G.Dietler, Chapter Eleven - Finite-Element Analysis of Microbiological Structures, The World of Nano-Biomechanics (Second Edition), 2017, Pages 199-218.
- [14] Naman Saklani, Zhenhua Wei, Alain Giorla, Benjamin Spencer, Subramaniam Rajan, Gaurav Sant, Narayanan Neithalath, Finite element simulation of restrained shrinkage cracking of cementitious materials: Considering moisture diffusion, ageing viscoelasticity, aleatory uncertainty, and the effects of soft/stiff inclusions, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 173, June 2020, 103390
- [15] G.D.Huynh, X.Zhuang, HGBui, G.Meschke, H.Nguyen-Xuan, Elasto-plastic large deformation analysis of multi-patch thin shells by isogeometric approach, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 173, June 2020.
- [16] Subrato Sarkar, I.V.Singh, B.K.Mishra, A.S.Shedbale, LHPoh, A comparative study and ABAQUS implementation of conventional and localizing gradient enhanced damage models, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 160, August 2019, Pages 1-31.
- [17] Marek Klimczak, Witold Cecot, Towards asphalt concrete modeling by the multiscale finite element method, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 171, April 2020, 103367.
- [18] Aurélien DOltrand, Eric Martin, Dominique, Leguillon. Numerical implementation of coupled criterion: Matched asymptotic and full finite element approach, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 168, January 2020.
- [19] T.R.Walker, C.J.Bennett, T.L.Lee, A.T.Clare, A novel numerical method to predict the transient track geometry and thermomechanical effects through in situ modification of process parameters in Direct Energy Deposition, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 169, February 2020.
- [20] M.R.Javanmardi, Mahmoud R. Maheri Extended finite element method and anisotropic damage plasticity for crack propagation modeling in concrete, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 165, 1 November 2019, Pages 1-20
- [21] Behrouz Takabi, Bruce L. Tai Finite Element Modeling of Orthogonal Machining of Brittle Materials Using an Embedded Cohesive Element Mesh, Journal of Manufacturing and Materials Processing Materials, Volume 3, Issue 2, May 2019.
- [22] Butt, J.; Ghorabian, M.; Mohaghegh, V.; Shirvani, H. Finite Element Modeling and Mechanical Testing of Metal Composites Made by Composite Metal Foil Manufacturing. J. Manuf. Mater. Process. 2019, 3, 81. DOI:10.3390/jmmp3020036/
- [23] Dey A.; Yodo N. A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. J. Manuf. Mater. Process. 2019, 3, 64.
- [24] Hussein, R.; Sadek, A., Elbestawi, M, Attia, H, An Investigation into Tool Wear and Hole Quality during Low-Frequency Vibration-Assisted Drilling of CFRP / Ti6Al4V Stack. J. Manuf. Mater. Process. 2019, 3, 63.
- [25] Handoko, W.; Pahlevani, F.; Hossain, R.; Sahajwalla, V. Stress-Induced Phase Transformation and Its Correlation with Corrosion Properties of Dual-Phase High Carbon Steel. J. Manuf. Mater. Process. 2019, 3, 55.
- [26] Vladimir Lavrik, José Italo Cortez, Vitaliy Mezhyuev, Liliana Cortez, Anna Alekseeva, Gregorio T. García, Pedro G. Juarez, Javier Poblano. Development of the CAD system for de-signing non-standard constructions from elastomers. International

Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Vol. 3, Issue 3, March 2014. Pp. 10717-10726.

[27] Kibbou, EM; Dellagi, S.; Majdouline, I.; Moufki, A. Prediction of Surface Quality Based on Non-Linear Vibrations in Orthogonal Cutting Process: Time-Domain Modeling. J. Manuf. Mater. Process. 2019, 3, 53.

[28] Vitaliy Mezhuiev, Vladimir Lavrik. Improved finite element approach for modelling three-dimensional linear-elastic bodies. Indian Journal of Science and Technology, Vol. 8(30), November 2015. Pp. 1-7.

**A DERIVATION OF THE STIFFNESS MATRIX FOR A TETRAHEDRAL
FINITE ELEMENT BY THE METHOD OF MOMENT SCHEMES**

Lavrik V., Dr.Sci. Homenyuk S., Dr.Sci Mezhuiev V.

Abstract. The main stage in the computation of structures made of elastomers by the displacement-based finite element method (FEM) is a derivation of the stiffness matrices. Their properties define the existence, stability and convergence of the FEM solutions, as well as the effectiveness of the method. At the same time, based on the FEM displacement-based methods for modelling elastomers often have a slow convergence, especially for massive bodies having complex curvilinear forms. The slow convergence is typical for the cases, where the approximation of shifts cannot be accurately modelled by considering displacements of the finite elements as a rigid whole. To solve this problem, the paper proposes variational relations for the tetrahedral finite element, which are developed on the base of the moment scheme of the FEM.

Keywords: finite-element method (FEM), elastomers, moment scheme, tetrahedral finite element.

**ВЫВОД МАТРИЦЫ ЖЕСТКОСТИ ДЛЯ ТЕТРАИДАЛЬНЫХ конечных
элементов МЕТОДОМ МСЭ**

Лаврик В.В., д.т.н. Гоменюк С.И., д.т.н. Межуев В.И.

Аннотация. Основным этапом расчета конструкций из эластомерных материалов методом конечных элементов (МКЭ) в перемещениях является вывод матриц жесткости. Свойства эластомеров во многом определяют существование, устойчивость и сходимость решений МСЭ, а также эффективность методов их решения в целом. Многолетний опыт решения различных задач механики деформируемых твердых тел на основе МСЭ показал, что традиционный вариант МСЭ нередко имеет сравнительно медленную сходимость, особенно для оболочек и массивных тел сложных криволинейных форм. Научно доказано, что замедленная сходимость характерна для тех случаев, когда принят вариант аппроксимации перемещений не позволяет точно описать смещение СЕ.

Для решения этой проблемы были разработаны на основании моментной схемы конечных элементов (МСЭ) вариационные соотношения для тетраидального конечного элемента, которые решают перечисленные выше проблемы механики эластомеров.

Ключевые слова: метод конечных элементов, момент схемы конечных элементов

**СУЧАСНЕ РОЗУМІННЯ БІЗНЕС-АНАЛІЗУ ТА ЙОГО
СКЛАДОВИХ В ІТ-ПРОЕКТАХ**

К.т.н. Гобов Д.А.

Анотація. Провідну роль в проектах по розробці інформаційних технологій відіграє бізнес-аналіз як нова дисципліна, що використовується для виявлення потреб бізнесу та допомагає знайти найкраще для них рішення, виходячи з існуючих технологічних, економічних та інших обмежень. Розуміння повного циклу бізнес-аналітичних робіт є запорукою повноти вхідної інформації для наступних етапів проекту: проектування, реалізація, тестування та впровадження. Об'єктом дослідження було поняття «бізнес-аналіз» та його складові. Мета роботи - визначення терміну «бізнес-аналіз» та його складових, визначення множини проектних та позапроектних робіт, пов'язаних із зоною відповідальності бізнес-аналітика. Метод. Порівняльний аналіз зводів знань від провідних міжнародних професіональних асоціацій «Міжнародний Інститут Бізнес Аналізу» (ІБА), «Інститут Управління Проектами» (PMI) та «Британське Комп'ютерне Товариство» (BCS) з точки зору ключових задач бізнес-аналітика та виявлення спільних рис та відмінностей у концепціях бізнес-аналізу. Результати. Визначені загальні риси та ключові складові терміну «бізнес-аналіз», визначено загальне бачення сфери відповідальності бізнес-аналітика. Визначено, що бізнес-аналітик відіграє ключову роль у визначенні потреби, формування бажаного стану підприємства і забезпечення проведення змін. Висновки. Кожен із зводів знань від ІБА (Міжнародний Інститут Бізнес Аналізу), PMI (Інститут Управління Проектами), BCS (Британське Комп'ютерне Товариство BCS) пропонує в цілому схожий підхід до основних галузей знань бізнес-аналітика, що підкреслює їхню універсальність. Якщо узагальнити та привести ці галузі знань до єдиного вигляду, відображуючи їхню сутність, такими складовими є Планування бізнес-аналізу, Виявлення вимог, Аналіз стратегії, Визначення вимог та дизайну рішення, Керування життєвим циклом вимог, та Оцінка рішення. Подальші дослідження можуть полягати у вивченні конкретних технік бізнес-аналізу та їх використання в ІТ-проектах.

Ключові слова: бізнес-аналіз, ІБА, PMI, BCS, галузь знань бізнес-аналізу.

1. ВСТУП

У сучасній практиці побудови складних інтегральних рішень для трансформації та оптимізації бізнес-діяльності провідну роль відіграє бізнес-аналіз, як дисципліна по виявленню бізнес-потреб об'єкта дослідження та сприяння пошуку найкращого їх вирішення. Згідно з [1] найбільш впливовими чинниками, що призвели до невдач проектів по розробці програмного забезпечення були: зміни в пріоритетах організацій (41%), помилки на етапі збору вимог (39%), зміни цілей проекту (36%), неадекватне бачення або мета проекту (30%) тощо. Схожі показники дають і інші галузеві дослідження [2, 3]. Всі вищеперераховані проблеми є результатом неправильно організованого процесу бізнес-аналізу.

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

Частково це можливо пояснити тим, що на даний момент роль бізнес-аналітика зведена до керування інженерією вимог, що означає фактично виявлення вимог та визначення відповідності цих вимог даній системі і корегування їх у разі необхідності. Але фактично у даний момент обов'язки бізнес-аналітика є набагато ширшими. Поширення технік, практик та підходів до виконання бізнес-аналізу в проектній діяльності призвело до необхідності визначення поняття та рамок бізнес-аналізу [4, 5]. Дана робота присвячена огляду, аналізу та порівняльному аналізу зводів знань, розробленими провідними профільними міжнародними організаціями «Міжнародний Інститут Бізнес Аналізу (International Institute of Business Analysis, ІІВА)», «Інститут Управління Проектами (Project Management Institute, PMI)» та «Британське Комп'ютерне Товариство (British Computer Society, BCS)» щодо визначених питань.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ускладнення задач, що постають при трансформації або створення інформаційних систем та інших рішень, направлених на підвищення ефективності бізнесу, призвело до розширення переліку ролей в проектній команді. До стандартної тріади «керівник проекту-розробник-фахівець з тестування» додалась нова роль – «бізнес-аналітик». Згідно з [6] ця роль несе відповідальність за виявлення, аналіз, документування і перевірку вимог до проекту. Існують і інші назви для цієї ролі: інженер з вимог, системний аналітик, процесний аналітик, аналітик підприємства, тощо. Враховуючи, що ця роль, на відміну від, наприклад, ролі керівника проектів сформувалась нещодавно, залишаються питання, щодо її зони відповідальності, до переліку задач, що притаманні бізнес-аналітиці, а також до самого терміну «бізнес-аналіз». Визначення відповідей на ці питання, дозволить забезпечити єдине розуміння щодо необхідних навичок, переліку проектних та позапроектних робіт, що мають бути виконані бізнес-аналітиком задля забезпечення успішності проекту.

3. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Проблема визначення терміну «бізнес-аналіз» розглянуто в численних публікаціях. Деякі автори, визначають бізнес-аналіз як розширення дисципліни «інженерія вимог», [4, 5]. Ряд досліджень зосереджені на вивченні професійних стандартів по бізнес-аналізу від International Institute of Business Analysis [7, 8] та від British Computer Society [9], та присвячені аналізу ролі та впливу бізнес-аналізу на цифрову економіку. Фундаментальною працею по бізнес-аналізу з точки зору проектів по розробці програмного забезпечення, є [6], яка містить перелік задач бізнес-аналізу та практичних рекомендацій щодо їх виконання. Роботи [10, 11] присвячені вивченню питання взаємодії бізнес-аналітика та керівника проекту. В результаті дослідження відомих публікацій по проблемі визначення зони відповідальності бізнес-

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

аналітика можна зробити наступний висновок. Експертне середовище фахівців з бізнес-аналізу на сьогоднішній день зосереджені в трьох профільних міжнародних організаціях: «Міжнародний Інститут Бізнес Аналізу, «Інститут Управління Проектами» та «Британське Комп'ютерне Товариство». Кожна з них розробила свій професійний стандарт, що визначає бізнес-аналіз, роль бізнес-аналітика та зони його відповідальності. Таким чином, порівняльний аналіз цих стандартів, визначення загальних рис та відмінностей є актуальною задачею, вирішення якої дозволить сформулювати єдине бачення щодо ролі бізнес-аналітика, границь його відповідальності та може виступити базис для продовження розвитку цієї дисципліни.

4. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНУ «БІЗНЕС-АНАЛІЗ»

Згідно з [12, 13] бізнес-аналіз є практикою забезпечення можливостей змін в контексті роботи підприємства шляхом визначення потреб та рекомендації рішення, яке приносить цінність зацікавленим сторонам. Порівнюючи його з визначенням з [14] «Бізнес-аналіз це сукупність задач та технік, що використовуються для забезпечення взаємодії між зацікавленими особами для розуміння структури, політики та діяльності організації та вибору рішень, які дають змогу організації досягти її цілей», можна сказати, що ПБА більше не розглядає бізнес-аналіз як сукупність заходів і технік. Наразі цей термін уявляє собою узагальнене відображення моделі основних понять – BACCM (Business Analysis Core Concept Model). Відповідно до цієї моделі існує шість ключових сутностей, що визначають природу бізнес-аналізу [12, 13].

Зміна - акт трансформації у відповідь на потребу. Зміна направлена на контрольоване поліпшення ефективності підприємства. **Потреба** - це проблема або відсутня можливість підприємства. Потреби спричиняють необхідність змін, мотивуючи зацікавлені сторони діяти. При цьому зміни можуть також викликати потреби, розмиваючи або посилюючи цінність, надану існуючими рішеннями. **Рішення** - це конкретний спосіб задоволення однієї або декількох потреб в рамках контексту. Рішення задовольняє потребу шляхом вирішення проблеми, з якою стикаються зацікавлені сторони. В більшості випадків рішення включає в себе програмне забезпечення як центральний елемент. **Зацікавлені сторони** – особа або група осіб, що мають відношення до зміни, потреби або рішення, і часто можуть бути згруповані за цією ознакою. Зацікавлені сторони визначаються з точки зору зацікавленості, впливовості і впливу на зміни. **Цінність** - це значимість, важливість або корисність чогонебудь для зацікавлених сторін в рамках контексту. Цінність може розглядатися як потенційна або реалізована, прибуток, і потенційні поліпшення. У деяких випадках цінність може бути визначена в абсолютному вираженні, однак найчастіше вона оцінюється в

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

співвідношенні одне рішення або варіант більш цінний, ніж інший, з точки зору даного набору зацікавлених сторін. **Контекст** - це обставини, які впливають на процес або знаходяться під впливом будь-яких чинників і забезпечують розуміння змін. Зміни відбуваються в рамках контексту. Також, контекст це все прояви залежності змін і навколишнього середовища. Контекст може включати в себе відносини, поведінку, переконання, конкурентів, культуру, демографічний стан, цілі, уряд, інфраструктуру, мови, втрати, процеси, продукти, проекти, продажі, термінологію, технології, навіть пори року і погоду, і будь-який інший елемент, що відповідає визначенню.

Для роботи по ВАССМ потрібно визначити положення компанії і проекту шляхом постановки питань по кожній зі складових концепції такими як "до яких змін ми прагнемо", "які потреби ми намагаємося задовольнити", "які рішення ми можемо запропонувати для внесення змін", "хто є зацікавленими особами в даному випадку", "що є цінностями для наших зацікавлених осіб" і "в якому контексті ми працюємо". Таким чином, ми отримуємо найбільш чітке з усіх можливих уявлення про поточний стан і перспективи, і зводимо до мінімуму ймовірність упустити значимий аспект. PMI в [15, 16] визначає бізнес-аналіз наступним чином: «Бізнес-аналіз це застосування знань, навичок, інструментів та технік для: Визначення проблем та можливостей; Визначення потреб бізнесу та рекомендації життєздатного рішення для задоволення цих потреб й підтримки процесу прийняття стратегічних рішень; Виявлення, аналізу, специфікації, обговорення та керування вимогами й іншою інформацією; Визначення переваг та підходів до вимірювання та реалізації цінності та аналізу цих результатів.»

Також в [15] сформульоване наступне скорочене визначення бізнес-аналізу: «Бізнес-аналіз це набір заходів, що проводяться для підтримки реалізації рішень, які відповідають цілям бізнесу та надають постійну цінність для організації. Нескладно помітити суттєву схожість визначення терміну «бізнес-аналіз» в [13] та [15] та відповідно перевагу розкриття цього терміну у ВАВОК, оскільки розуміння бізнес-аналізу як стратегічної практики є ширшим, ніж набір технік та методів, а забезпечення потреб зацікавлених сторін є набагато більш точним відображенням цілей бізнес-аналітика, чим надання цінності організації. Слід зазначити, що PMI не вводить визначення концептуальної моделі, але спираючись на визначення бізнес-аналізу, можна виділити наступні ключові сутності [15]: рішення; цілі бізнесу – аналог потреб з ВАССМ; цінність; організація. Можна провести певні паралелі між сутністю «організація» та «зацікавлені особи», але враховуючи, що до зацікавлених осіб ініціативи можуть відноситись і представники державних інституцій, клієнти бізнесу, інші підрядники тощо, сутність

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

«зацікавлені особи» є більш широкою і точною. Нажаль, у визначенні терміну «бізнес-аналіз» [15, 16] не згадує окремо «контекст» та «зміну». Але в подальшому вивченню контексту приділяється значна увага, а «зміна» подається як сукупність проектних заходів [15]. BSC підходить до визначення терміну «бізнес-аналіз», виходячи з сфери відповідальності бізнес-аналітика: «Бізнес-аналітик - це дорадча роль, яка несе відповідальність за дослідження та аналіз бізнесу, визначення та оцінку варіантів вдосконалення бізнес-систем, розробку та визначення вимог та забезпечення ефективного впровадження та використання інформаційних систем відповідно до потреб бізнесу» [17]. Аналізуючи це визначення можна виділити наступні ключові сутності: контекст («дослідження та аналіз бізнесу»); потреба; зацікавлені особи (обмежені лише «бізнесом»); рішення («варіанти вдосконалення бізнес-систем, розробка та визначення вимог та забезпечення ефективного впровадження та використання інформаційних систем»). Суттєва відмінність від перших двох визначень полягає в тому, що BCS виділяє окрему роль бізнес-аналітика в ІТ [9, 17]. З точки зору бачення BCS робота аналітика в ІТ сфері має певну специфіку і потребує від аналітика додаткових навиків, таких як тісна співпраця із командою розробників та глибоке занурення у аналіз системних процесів. Також, важливою компетенцією є базове розуміння процесу розробки з точки зору програміста для того щоб аналітик усвідомлював успішність рішень розробників, реалістичність та терміни виконання тих чи інших задач. BCS не наполягає на саме такої організації роботи, але дає усвідомлення, що якщо у ці задачі не буде залучений бізнес-аналітик, відповідальним за розуміння стану розробки та коригування розвитку проекту відповідно до нього має стати хтось інший. Враховуючи вищевикладене, можемо прийти до висновку, що модель ВАССМ найповніше розкриває сутність бізнес-аналізу, визначаючи 6 ключових понять, на яких зосереджена увага бізнес-аналітика в ході підготовки та проведення трансформації бізнесу [12].

Таблиця 1. Співвідношення базових понять відносно бізнес-аналізу

ПВА	PMI	BCS
Зміна		
Потреба	Цілі бізнеса	Потреба
Рішення	Рішення	Рішення
Зацікавлені сторони	Організація	Бізнес
Цінність	Цінність	
Контекст		Контекст

5. РАМКИ БІЗНЕС-АНАЛІЗУ

Визначення рамок та безпосередньо сутність бізнес-аналізу можна провести, виходячи з переліку задач, що відносяться до бізнес-аналітичної діяльності. ПБА в [12, 13] виділяє 6 груп задач, якими опікується бізнес-аналітик та які названі галузями знань: Планування та Моніторинг бізнес-аналізу (Business Analysis Planning and Monitoring); Виявлення та Співпраця (Elicitation and Collaboration); Керування Життєвим Циклом Вимог (Requirements Life Cycle Management); Аналіз Стратегії (Strategy Analysis); Аналіз Вимог та Визначення Дизайну (Requirements Analysis and Design Definition); Оцінка рішення (Solution Evaluation). Залежно від ситуації, завдання і проекту, бізнес-аналітик може приступити до роботи на будь-якому етапі, але жоден етап не повинен бути повністю опущений. Таким чином, слід зазначити, що ПБА не пропонує готових рішень і чіткого плану дій, але визначає перелік необхідних для кожного проекту видів діяльності. При цьому можна виділити базовий цикл: Аналіз стратегії – Аналіз Вимог та Визначення Дизайну – Оцінка рішення, який відповідає трьом фазам проекту: Передпроектне дослідження – Виконання проекту – Оцінка результатів проекту. Задачі з трьох інших галузей знань виконуються протягом всього проекту. Безумовно, методологія виконання проекту буде впливати на часові рамки та інтенсивність виконання робіт з кожної галузі, але в широкому розумінні запропонована модель виконується для кожної з них. ПБА наголошує на тому, що послідовність виконання бізнес-аналітичних задач в кожному проекті може бути різною. Але зазвичай, на першому етапі виконуються задачі, що дозволяють визначити поточний стан організації, виявити бізнес-потреби або оцінити ефективність поточного рішення (галузі знань – аналіз стратегії та оцінка рішення). Крім того, в [13] визначено 5 перспектив бізнес-аналізу: agile; бізнес-аналітика; інформаційні технології; бізнес-архітектура; керування бізнес-процесами. Перспективи передбачають фокус на певних задачах та методах, специфічних для контексту ініціативи. Вони не є взаємовиключними, більш того, зазвичай один проект передбачає застосування декількох перспектив. Згідно з [15] діяльність з бізнес-аналізу описується наступними 6 галузями знань: Оцінка потреб (Needs Assessment); Залучення зацікавлених сторін (Stakeholder Engagement); Виявлення (Elicitation); Аналіз (Analysis); Трасування та Моніторинг (Traceability and Monitoring); Оцінка рішення (Solution Evaluation). Також, PMI, як і ПБА, передбачає модель постійного взаємозв'язку між галузями знань. Ця концепція полягає у постійному процесі аналізу та виявлення вимог, які вдосконалюються завдяки трасуванню і моніторингу, що може призвести до залучення зацікавлених сторін та визначенню потреб. Цей процес створює

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

додатковий об'єм задач та потребує зусиль від команди розробників та можливо зацікавлених сторін, але допомагає зробити продукт, який буде максимально задовольняти потребам. BCS на відміну від ПБА та РМІ намагається визначити модель процесу бізнес-аналізу з визначеною послідовністю кроків: дослідження ситуації (Investigate Situation); розгляд перспектив (Consider Perspective); аналіз потреб (Analyse Needs); оцінка варіантів (Evaluate Option); визначення вимог (Define Requirements); впровадження змін (Deliver Changes). Ця модель є за своїм змістом деталізованим представленням кореневого циклу з [13] – «Аналіз стратегії» - «Аналіз вимог та визначення дизайну» - «Оцінка рішення». Окремо в [17] виділений фреймворк інженерії вимог, який призначений для підвищення якості артефактів, що створює бізнес-аналітик. Перший етап – виявлення вимог, на якому від бізнес-аналітика отримує інформацію від зацікавлених осіб та інших джерел інформації. До фіксації цим вимог в документах, бізнес-аналітик має виконати їх аналіз та організувати відповідним чином (в термінах [13] – провести їх верифікацію). Наступний етап – валідація вимог – передбачає перевірку вимог предмет відповідності цілям бізнесу. При визначенні відповідності вимог цілям бізнесу проводиться докладне вивчення сфери, при чому може бути знайдена та проаналізована додаткова інформація, в результаті цього вивчення деякі вимоги часто переходять у категорію непотрібних або дублюючих [17]. Тому цей ітераційний процес має повторюватися, доки вимоги не досягнуть такого рівня деталізації та якості, який задовільнить бізнес-аналітика, зацікавлені сторони та усіх членів команди. Схематично робота за моделлю інженерії вимог має 3 етапи, які повторюються у вигляді циклу: визначення вимог (requirements elicitation); аналіз вимог (requirements analysis); валідація вимог (requirements validation). Дві інших аспекти – документування вимог (в [13] – формування архітектури вимог) та керування вимогами в частині опрацювання запитів на зміну. Також в [17] сформульовано Business Analysis Maturity Model (BAMM), яка визначає залежність між границями рішення, над яким працює бізнес-аналітик та рівнем його впливу. Перший рівень – зміни в межах існуючих ІТ-систем, другий рівень – зміни на рівні процесів, третій рівень – зміни на рівні бізнесу в цілому. Таким чином дана модель визначає границі рішення та контексту, в якому рішення буде розроблятися та використовуватись.

Чіткої структури задач бізнес-аналітика BCS не формулює, але умовно можна виділити наступні: аналіз стратегії (Strategy Analysis); аналіз бізнес-процесів (Business Processes Analysis); аналіз взаємодії із зацікавленими сторонами та менеджмент (Stakeholder Analysis and management); визначення рішення (Defining the Solution); формування економічного та фінансового обґрунтування (Making a business and

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

financial case); визначення вимог (Establishing requirements); документування та керування вимогами (Documenting and Managing Requirements); моделювання вимог (Modelling requirements).

Можна зробити висновок, що BCS більшу увагу приділяє задачам, які бізнес-аналітик виконує на фазі передпроектного дослідження [9,19]. Порівнюючи галузі знань і виходячи із задач, з яких вони складаються, можна сформувати наступні відповідності

Таблиця 2. Відповідність галузей знань бізнес-аналізу згідно зводів знань від ПБА, PMI, BCS

ПБА	PMI	BCS
Планування та Моніторинг бізнес-аналізу	Залучення зацікавлених сторін	Аналіз взаємодії із зацікавленими сторонами та менеджмент
Виявлення та Співпраця	Виявлення	Визначення вимог
Керування Життєвим Циклом Вимог	Трасування та Моніторинг	Керування вимогами
Аналіз Стратегії	Оцінка потреб	Аналіз стратегії Аналіз бізнес-процесів Формування економічного та фінансового обґрунтування
Аналіз Вимог та Визначення Дизайну	Аналіз	Моделювання вимог Документування вимог Визначення рішення
Оцінка рішення	Оцінка рішення	Оцінка рішення

5. ВИСНОВКИ

Термін «бізнес-аналіз» в зводах знань від ПБА, PMI та BCS передбачає ключову роль бізнес-аналітика у визначенні бізнес-потреб замовника, формуванні бажаного стану та забезпечення проведення змін за рахунок організації сумісної роботи зацікавлених осіб для створення найкращого доступного рішення. ПБА та PMI розуміють «бізнес-аналіз» як процес із чіткими рамками, цілями та критеріями успішності роботи бізнес-аналітика, а BCS радше визначає перелік рекомендацій для підвищення ефективності бізнес-аналізу. Професійні стандарти від ПБА та PMI є багаторівневими зводами знань, які містять у своїй структурі більш глобальну загальну модель, яка визначає питання взаємопов'язаних задач бізнес-аналітика, які він виконує в межах проекту. Кожен із зводів знань від ПБА, PMI, BCS пропонує в цілому

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

схожий підхід до основних галузей знань бізнес-аналітика, що підкреслює їхню важливість та універсальність. Якщо узагальнити та привести ці галузі знань до єдиного вигляду, відображуючи їхню сутність, такими пунктами є Планування бізнес-аналізу, Виявлення вимог, Аналіз стратегії, Визначення вимог та дизайну рішення, Керування життєвим циклом вимог, та Оцінка рішення. Формулювання назв цих галузей знань у оригінальних джерелах дещо відрізняється, але загальний зміст є незмінним. Подальші дослідження можуть полягати у вивченні переліку задач бізнес-аналітиків та особливості використання технік та методів, рекомендованих в зводах знань міжнародних профільних інститутів, в реаліях ІТ-проектів, що виконуються в Україні.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] The Standish Group, “CHAOS Report,” The Standish Group, 2014.
- [2] Sanchez O. P. et al. Cost and time project management success factors for information systems development projects //International Journal of Project Management. – 2017. – №. 8. – P. 1608-1626.
- [3] Nelson R. R. IT project management: Infamous failures, classic mistakes, and best practices //MIS Quarterly executive. – 2007. – №. 2.
- [4] Rubens J. Business analysis and requirements engineering: the same, only different? //Requirements Engineering. – 2007. – №. 2. – P. 121-123.
- [5] Aoyama M. Bridging the requirements engineering and business analysis toward a unified knowledge framework //International Conference on Conceptual Modeling. – Springer, Cham, 2016. – P. 149-160.
- [6] Wiegers, K., Beatty, J.: Software requirements. 3rd edn. Microsoft Press, Richmond, Washington, 2013.
- [7] Milani F. Digital Business Analysis. – Springer, 2019. – P. 1-429.
- [8] Chernysheva Y. G., Shepelenko G. I. The new profession of “business analyst” and the new occupational standards: the case of Russia. – 2018.
- [9] Paul, Debra. Defining the role of the business analyst: the business analysis service framework. Diss. University of Reading, 2018
- [10] Tallon P. P. A process-oriented perspective on the alignment of information technology and business strategy //Journal of Management Information Systems. – 2007. – №. 3. – P. 227-268.
- [11] WYSOCKI K. R. The business analyst/Project manager //New Jersey: Hoboken. – 2011
- [12] IIBA Global Business Analysis Core Standard A Companion to A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge (BABOK® Guide) Version 3 // International Institute of Business Analysis – 2017. – P. 42
- [13] Kevin Brennan A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge Version 3.0 // International Institute of Business Analysis – 2015. – P. 514
- [14] Kevin Brennan A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge Version 2.0 // International Institute of Business Analysis – 2009. – P. 271
- [15] Project Management Institute. The PMI Guide to BUSINESS ANALYSIS // Project Management Institute – 2017. – P.444

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[16] PMI Business Analysis for Practitioners: A Practice Guide //Project Management Institute – 2015. – P. 206

[17] Paul D. Y., Cadle J. Business Analysis. Third edition// British Computer Society Learning & Development Ltd – 2014. – P.401

MODERN UNDERSTANDING OF BUSINESS ANALYSIS AND ITS COMPONENTS Ph.D. Gobov D.

Abstract. Nowadays business analysis is a new key success factor in software development projects. It is a new discipline that allows the project team to define business needs and to find the best available solution based on technical, economical and other constraints. The definition of whole scope business analysis activities is required for providing a high-quality basis for the next project phases: design, construction, testing, and implementation. The object of the study was to define the statement “business analysis” and its elements. Each of the analyzed bodies of knowledge offers a generally similar vision of business analysis. The generalized set of business analysis areas contains Business analysis planning, Requirement Elicitation, Strategy analysis, Requirement Analysis and Design definition, Requirements life cycle management, Solution assessment. Further studies may include examining the list of particular business analysis techniques and their using in IT projects.

Keywords: business analysis, IIBA, PMI, business analysis knowledge area.

СОВРЕМЕННОЕ ПОНИМАНИЕ БИЗНЕС-АНАЛИЗА И ЕГО КОМПОНЕНТОВ К.Т.н. Гобов Д.А.

Аннотация. Сегодня бизнес-анализ - новый ключевой фактор успеха в проектах по разработке программного обеспечения. Это новая дисциплина, которая позволяет команде проекта определять потребности бизнеса и находить наилучшее доступное решение с учетом технических, экономических и других ограничений. Определение всего объема бизнес-анализа необходимо для обеспечения высококачественной основы для следующих этапов проекта: проектирования, строительства, тестирования и внедрения. Объектом исследования было определение понятия «бизнес-анализ» и его элементов. Каждая из проанализированных совокупностей знаний предлагает в целом схожее видение бизнес-анализа. Обобщенный набор областей бизнес-анализа включает планирование бизнес-анализа, выявление требований, анализ стратегии, анализ требований и определение дизайна, управление жизненным циклом требований, оценку решения. Дальнейшие исследования могут включать в себя изучение списка конкретных методов бизнес-анализа и их использование в ИТ-проектах.

Ключевые слова: бизнес-анализ, IIBA, PMI, область знаний бизнес-анализа.

УДК 004.056.55: 004.032: 004.93

**THE BLOCK PARAMETRIC MATRIX AFFINE-PERMUTATION
CIPHERS (BP_MAPCs) WITH ISOMORPHIC REPRESENTATIONS
AND THEIR RESEARCH**

Ph.D. Krasilenko V.G., Ph.D. Lazarev A.A., Nikitovich D.V.

Abstract. First, we will give a brief overview of the proposed multifunctional block parametric MAPSs, their subspecies of vector affine permutation ciphers (VAPSSs), and show that to achieve the goal it is advisable to use the isomorphism of various representations of permutations (matrices or vectors), which act as the main and block-wise, vector matrix keys. Modeling confirms the adequacy of the proposed block parametric ciphers (MAPS) with isomorphic representations of the MP of significant dimensions and blocks and their good characteristics, their advantages, including increased stability and enhanced functionality. The processes of crypto-transformations, generation of MP, main MP and turn-key processes, their advantages are clearly shown by a number of model experiments. The models are simple, convenient, adapted for multi-format and color images, implemented by matrix processors, have high efficiency, stability, and speed.

Keywords: block parametric matrix affine permutation cipher, vector affine permutation cipher, isomorphism of various representations, simulation, matrix processor, matrix key, encrypted, decrypted, methods of image crypto-processing.

**1. INTRODUCTION, ANALYSIS OF RECENT PUBLICATIONS,
FORMULATION OF THE PROBLEMS**

In the era of electronic communications, the need to transmit and cryptographic transformations (CTs) specific text and graphic documents (TGDs) in the form of table data, 2-D, 3-D, 4-D arrays, drawings, diagrams, resolutions has essentially increased [1-7]. In identification, biometric systems, intelligent management it is necessary to transmit in encrypted form a large number of various images. Many TGDs contain restricted access information that should be reported to government agencies, in a timely manner and in encrypted form, to transmit over communication channels, providing only authorized access, to certify their digital signatures. Authorized access many resources can be provided with appropriate technologies of cryptography and measures with the issuance of certificates and access keys. For such security purposes, methods and tools for CTs of images [1-22] and procedures and protocols for the formation of keys and their exchange [1, 8, 19, 23-24] are used, but among their variety [1-7, 22] only a small part is devoted to methods and algorithms oriented on matrix models [24-31] and tools. At the same time, the emergence of parallel matrix (image-type) processors [3, 21] contributed to the reorientation in the study of image CTs and the creation and models of matrix type (MT) [24-34]. That is why the search and research of new matrix models (MM) of CT, improvement of existing matrix ciphers and means for their realization are an actual strategic

task. In works [25, 26] more generalized matrix algorithms for CTs of images and so-called matrix affine-permutation ciphers (MAPCs) [28] based on of more generalized matrix affinity ciphers (MACs), as modifications of known affine ciphers [27], were proposed. The results of simulation [24-27] of processes of CTs of color images [31] on the basis of such models have shown their significant advantages such as: greater stability, increase in speed. In work [26] on the basis of MACs the algorithm and the procedure for creating a digital blind signature (DBS) is proposed on the TGD, and the results of simulation. The results of modeling algorithms for creating a 2D key are also known [23]. Paper [24] is devoted to creation of DBS on TGD, but on the basis of other models of matrix type. One of the main components of MAPCs [28], is matrix permutation model (MM_P), which has obvious simplicity. Further application and improvement of matrix-type ciphers based on such MM_P is highlighted in papers [29, 30, 32, 33]. Their basic operations are elemental multiplication, matrix addition and matrix permutation models (MM_P) with multiplication matrices. But the disadvantage of these works is the large size of the matrix keys (MK) and the lack of demonstration of their effective work with blocks in the form of matrices, which split multi-page data. However, as shown in papers [29, 30], the CTs on their basis, without additional operations, do not modify histograms of TGDs. At the same time, for most of the above-mentioned works, there is a common significant disadvantage, especially for work related to MAC [27, 31], MAPCs [28] and the like [24-26, 30, 32-34], which requires the use of at least two MK, if implemented in models multiplicative and additive matrix components. Therefore, the search to improve especially the multi-step MAC, MAPCs [28] while maintaining stability and other characteristics, in order to reduce the number of MKs to one, and their experimental verification is a necessary urgent task. The emergence of parallel algorithms, and especially the matrices of multiprocessor means, requires the creation of appropriate matrix-algebraic models (MAM), matrix-type systems (MT) for CT. The promise of the MAM, its modifications for the CT is evidenced by the ability to check the integrity of the cryptograms and the presence of distortions in them [32, 34], increasing the crypto-stability and expanding their functionality for very specific characteristic histograms of scanned TGDs, as experimentally shown in [35]. The generalization of the MAM to a matrix-block view is necessary in terms of the versatility of block algorithms and independence on data volumes. Thus, the actual purpose of this section is the development of block modifications of the MAPCs with a minimum length of 2048 bits, with the possibility of choosing its parameters and cyclic or block keys of similar length, their simulation on real information objects (IO) and demonstration, evaluation of their advantages, characteristics and durability, application possibilities.

2. PRESENTATION OF RESEARCH RESULTS

The CT algorithm for encryption based on BP_MAPCs consists of the following steps: 1) the partition of IO into blocks in the form of matrices with a dimension $2^m \times 2^m$, where $m = 4, 5, 6, \dots$ and with element-bytes in a digital format that at $m = 4$ is equivalent to the length of the block $256 \times 8 = 2024$ bits; 2) the permutation of the bytes of each current block using the current key, which is formed synchronously from the main key by the selected procedure according to the parametric model, the argument of which is index of block, 3) matrix affine/affine-permutation transformations (MAPTs) of bytes in block using the current key, the same as on stage 2 or similar, but according to another parametric model, 4) concatenation of received blocks for formation of cryptogram of IO. The decryption process has the following steps: 1) decomposing the cryptograms on blocks, 2) using MAPT for reversing of blocks based on the reversed current keys; 3) reversing the permutation of the bytes of blocks by current keys (vectors); 4) concatenating the transformed blocks into the restored IO. The steps of permutations and affine transformations can change and repeat in different sequences. Modeling of block parametric MAPC was done with Mathcad. Windows with formulas for modeling the CT of the image by the algorithm of block MAPTs are shown in Fig. 1-14. In the first experiment, a random permutation bitmap KPX ($256 \times 256 \times 1$) generated in any way is used to rearrange bytes in each k -th block. The block is represented by 256 component VID vectors (C_VID) or C_M_V (16×16) with 8-bit levels matrices, and KPX cards are also isomorphically represented by vectors or matrices in the same format. This allows you to use them as keys for affine conversions. Current MK can be uniquely represented in the form of a matrix of M_V (16×16) bytes, which is either its parametric model and is used in the next stage. The essence of MAPT is to apply to blocks, as a collection of bytes (PIC_S, PIC_Doc images), procedures pixel by pixel modulo multiplication or additions by the corresponding 8-bit MKs (direct or inverse) of the same dimensions (KeyA, KeyAO or KeyM (qa), KeyMO(qo)), depending on the parameters and formation modules, which are shown in Fig. 2, 7, 9. As can be seen from Fig. 1, the simulation results of the processes of direct and reverse CT TGDs and images elements are confirmed the correct work of the models. The cryptographic blocks processing is accompanied by the simultaneous mixing of their elements and their subsequent replacements, but, as it was shown by researches with histograms of images, TGDs and their cryptogram, shown in Fig. 1, for TGDs, in contrast to the image of a person, several iterative multiplications of the data (MD) on the MK P or permutations to may not be sufficient, especially with the application of the same MK.



Fig. 1 - Fragments of Mathcad windows with the results of CT modeling the block MAPC for block with 16x16 bytes.

Therefore, in order to improve the algorithm, we propose applying various current MKs to blocks and increasing the dimension of MK and blocks to 256x256 bytes. Thus, the idea and essence of parametric block MAP-ciphers of CTs consists in using the functional dependencies of their parameters on block indices and additional scalar-vector keys (VK). In this case, the MP in the generally accepted form should be square with $N \times N$ elements ("0" or "1"), where $N = 2^{16}$. The power of the set of possible such MPs, that is, their number is estimated as $N!$, which gives huge values. But each byte address of a block can be represented using two bytes, indicate two coordinates (row and column) of the block. This enables us to represent any permutation with two blocks (256 x 256 elements) of bytes, putting in each identical address of these blocks the corresponding high byte (in the first block) and the least significant byte (in the second block) the coordinates of the new address of the byte selected for permutation. Show The Mathcad software module for generating the base (main) MK (MP) and the type of its components KeyA and KeyB in the format of two gray images is shown in Fig. 2. The histograms of images, keys, its cryptograms after each CT affine components of this MP are shown in Fig. 3. The analysis of histograms before and after the CT confirms that the proposed models give better results. The TGD entropy was 0.738, and the cryptogram entropy increased 10.6–10.8 times and became equal to 7.82–7.999. The entropy of cryptogram has become almost equal to 8 bits per element: 7,999 (- 0.009 %!). Without knowledge of MK it is impossible to restore MD and, as was shown in [26, 28], already with a dimension of 32x32 MK of type **P**, the stability is ensured, and with dimension 256x256 8-bit elements of key, gives a substantial gain (the power of keys set is estimated 256^2 !!). The power of the set of possible keys has increased by many orders of magnitude!! Therefore, stability has increased

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

significantly. For MAM, it is urgently necessary to form a whole series of permutation matrices (MP) from the main MK, which would satisfy a number of requirements. In works [36, 37], only the main MK of the general type was considered, but not the MP series.

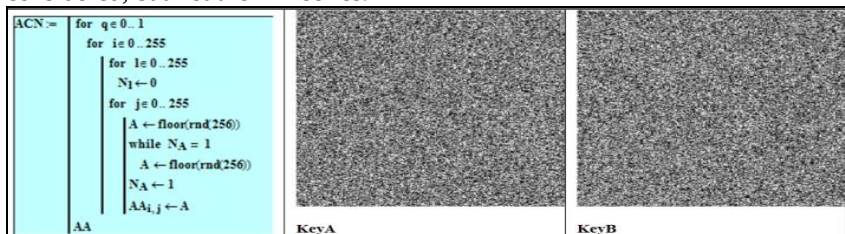


Fig. 2 - The program module for the generation of the basic (head) MK (MP) and KeyA and KeyB warehouse views in the format of two black-and-white images (Mathcad window)

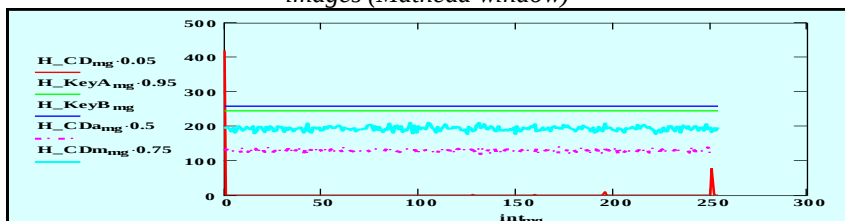


Fig. 3 - Histograms H_{KeyA} and H_{KeyB} respectively components KeyA and KeyB MP, histogram H_{CD} after only permutation cryptogram explicit Im after only permutation (coincides with histogram Im), corresponding histograms H_{CDA} and H_{CDm} cryptograms after additive and multiplicative affine CT using the same KeyA and KeyB.

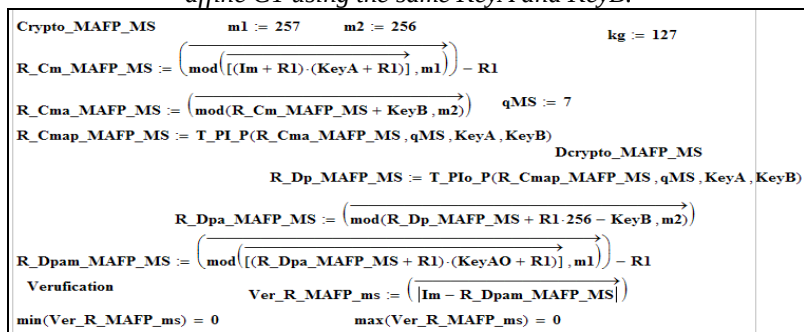


Fig. 4 - A fragment of the Mathcad window with parametric models (formulas) of forward and reverse cryptographic transformations (pixel-by-pixel affine encryption / decryption and multiple permutations of block byte-pixels) and model verification formulas.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

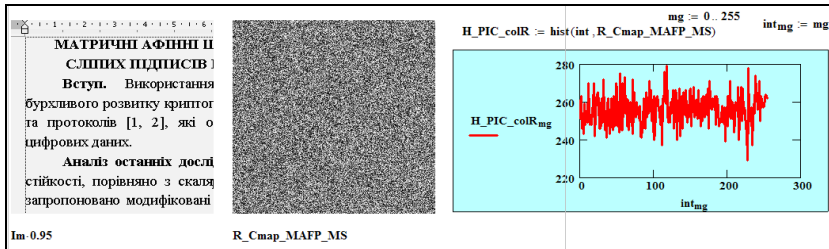


Fig. 5 - Fragments of Mathcad windows with the results of the simulation of cryptographic image Im conversion using BP_MAPC: the original image (block), its cryptogram, and histogram of cryptogram.

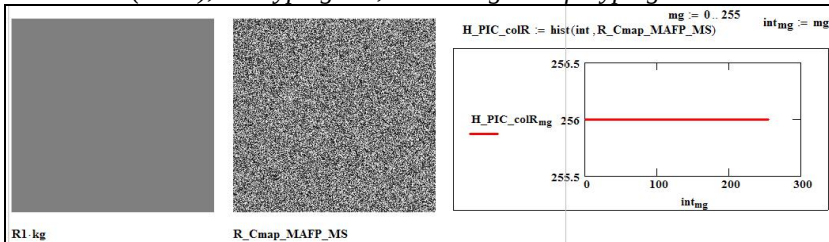
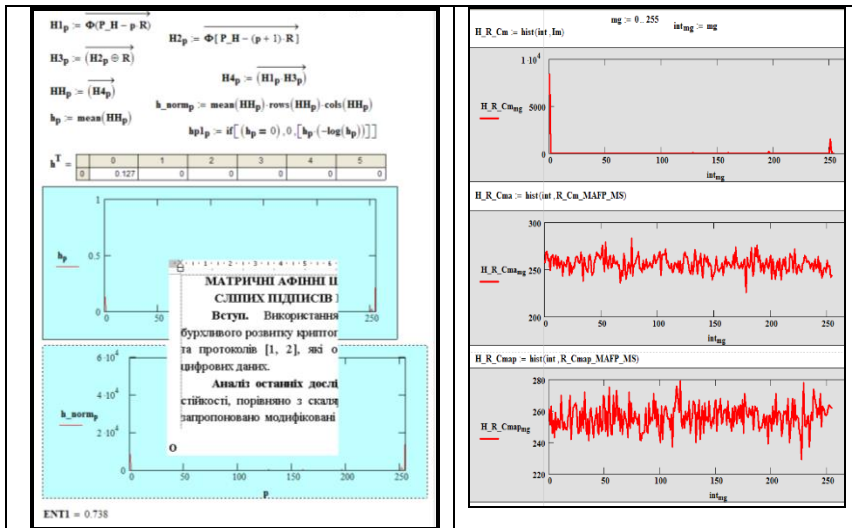


Fig. 6 - Fragments of Mathcad windows with the results of the simulation of cryptographic single-level image R1 conversion using BP_MAPC: the original image (block), its cryptogram, and histogram of cryptogram.



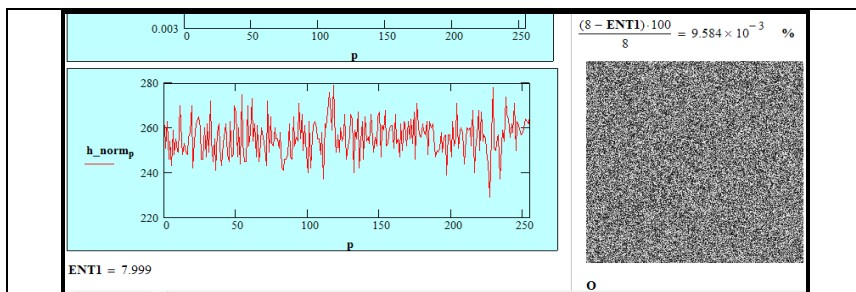


Fig. 7 - Fragments of Mathcad windows with modules and formulas for calculating the entropy of image pixels and plotting a histogram

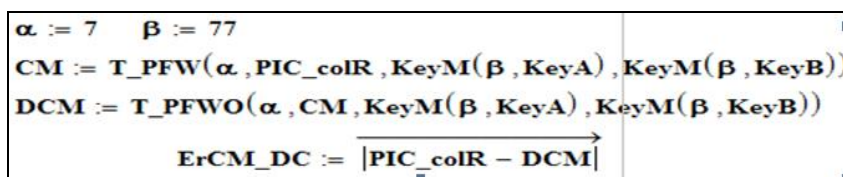


Fig. 8 - Fragment of a Mathcad window with parametric models (formulas) of forward and reverse cryptographic transformations (multiple permutations of block bytes and pixels) and the formation of a stream-MK (larger-dimensional permutation) in an isomorphic representation, and model verification formula

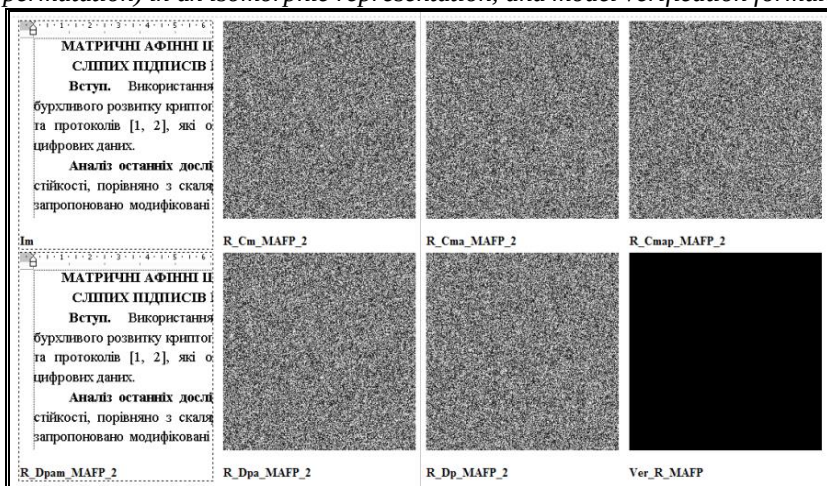


Fig. 9 - Fragment of a Mathcad window with the results of simulation of direct and reverse cryptographic transformations of a block in the form of a gray image with a block parametric matrix affine permutation cipher.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

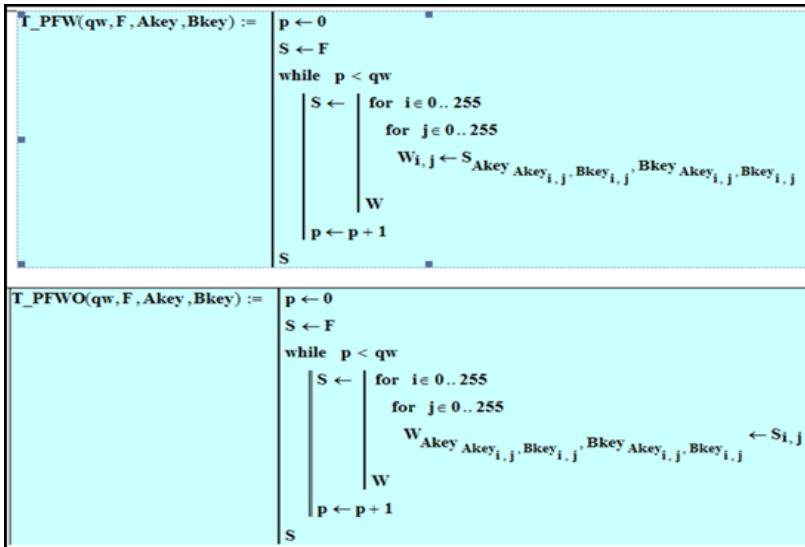


Fig. 10 - Fragment of a Mathcad window with parametric program modules of forward and reverse cryptographic transformations (qw-multiple permutations of block F bytes and pixels) and stream-MKs (larger-dimensional permutation) Akey, Bkey in an isomorphic representation.

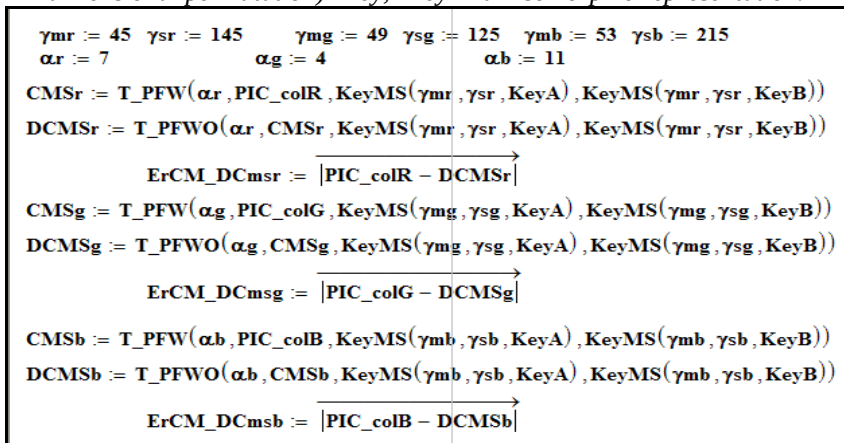


Fig. 11 - Window with parametric models of forward and reverse CTs of color image (multiple permutations) and of stream-MKs formation in an isomorphic representation and with parameters and verification formulas

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

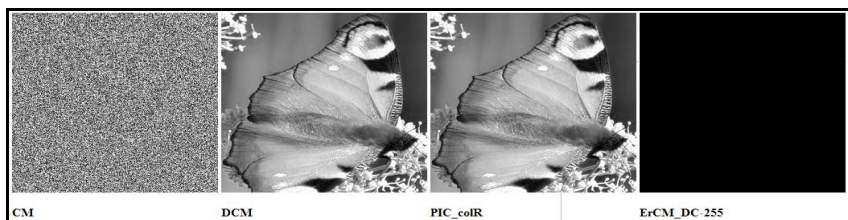


Fig. 12 - The result of direct and reverse CT of block, in form of gray image PIC_colR, using models of multiple permutations in Fig.7



Fig. 13 - The simulation results of direct and reverse CTs of color image, using parametric models of multiple permutations in Fig.10

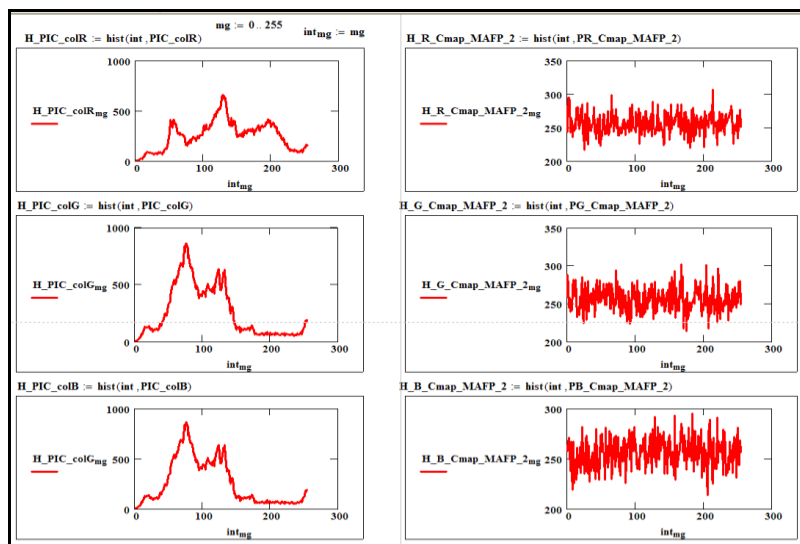


Fig. 14 - Histograms of components of color image (left) and histograms their cryptograms, obtained using the BP_MAPC models in Fig.3.

The aim of the work is to study the processes of formation of the MP flow for CTs of images, and to check their properties. And in [38], questions were

considered of creating by the parties a secret main MK of type P with isomorphic representations and the synthesis of a number of sub-keys of a similar type from it, therefore they are not considered in detail here, but will be covered in the report.

3. CONCLUSION

New block parametric matrix-algebraic models and matrix affine-permutation ciphers for CTs are proposed and modulated. The results of their modeling are presented using direct and inverse CT scans over images as an example, which indicates their correct operation and effectiveness. The entropy-histogram analysis of the obtained cryptograms, the advantages of the proposed modifications of ciphers with an increased permutation matrix are shown. The aspects of creating existing MKs are considered. Models can be implemented on matrix processors and have high speed, stability of transformations, and are more resistant to attacks.

REFERENCES

- [1] Yemets V. Modern cryptography. Basic concepts / V. Yemets, A. Melnyk, R. Popovich. - Lviv: Baku, 2003. - 144 p.
- [2] Khoroshko V.O. Methods and means of information protection: Teaching. manual / V.O. Khoroshko, A.O. Chetkov - K.: Junior, 2003. - 502 p.
- [3] Korkishko T.A. Algorithms and Processors of Symmetric Block Encryption: Scientific Edition / T.A. Korkishko, A.O. Melnik, V.A. Melnik. - Lviv: Baku, 2003. - 168 p.
- [4] Rashkevich Yu.M. Affine transformations in modifications of the RSA image encryption algorithm / Yu.M. Rashkevich, A.M. Kovalchuk, D.D. Peleshko // Automatics. Electrotechnical complexes and systems. - 2009. - No. 2 (24). - pp. 59-66.
- [5] Deergha Rao K. A New and Secure Cryptosyze for Image Encryption and Decryption / K. Deergha Rao, K. Praveen Kumar, P.V. Murali Krishna // IETE Journal of research. - 2011. - Vol. 57. - Issue 2. - pp. 165-171.
- [6] Han Shuihua. An Asymmetric Image Encryption Based on Matrix Transformation / Han Shuihua, Yang Shuangyuan // Ecti Transactions on Computer and Information Technology. - 2005 - Vol.1, No.2. - pp. 126-133.
- [7] Chin-Chen Chang. A new encycle algorithm for image cryptosystems / Chin-Chen Chang, Min-Shian Hwang, Tung-Shou Chen // Journal of Systems and Software. - 2001. - No. 58. - pp. 83-91.
- [8] Diffie, W., Hellman, M.E.: New Directions in Cryptography. IEEE Transactions on Information Theory. Volume IT-22, Issue 6: 644 - 654 (1976).
- [9] Alvarez, G., Encinas, L.H., de-Rey, A. M.: A multi-secret sharing scheme for color images based on cellular automata. Inf. Sci. **178**, 4382–4395 (2008).
- [10] Muñoz-Rodríguez, J.A., Rodríguez-Vera R.: Image encryption based on moiré pattern performed by computational algorithms. Optics Communication 236 (4–6), 295–301 (2004).
- [11] Muñoz-Rodríguez, J.A., Rodríguez-Vera R.: Image encryption based on a grating generated by a reflection intensity map. J. Mod. Opt. 52, 1385–1395 (2005).
- [12] Zhang, Y., Xiao D.: An image encryption scheme based on rotation matrix bit-level permutation and block diffusion. Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 19 (1), 74–82 (2014).
- [13] Laiphrakpam, D.S., Khumanthem, M.S.: A robust image encryption scheme based on chaotic system and elliptic curve over finite field. Multimedia Tools Appl. 77(7), 1–24 (2017).
- [14] Zhang, W., Yu, H., Zhao, YI, Zhu, ZI: Image encryption based on three-dimensional bit matrix permutation. Sig. Process. 118, 36–50 (2016).
- [15] Pak, C., Huang L.: A new color image encryption using combination of the 1-D chaotic map. Signal Process. 138, 129–137 (2017).

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- [16] Wu, J., Liao, X., Yang, B.: Cryptanalysis and enhancements of image encryption based on three-dimensional bit matrix permutation. *Signal Process.* 142, 292–300 (2018).
- [17] Wang, H., Xiao, D., Chen, X., Huang, H.: Cryptanalysis and enhancements of image encryption using combination of the 1-D chaotic map. *Signal Process.* 144, 444–452 (2018).
- [18] Li, C.: Cracking a hierarchical chaotic image encryption algorithm based on permutation. *Signal Process.* 118, 203–210 (2016).
- [19] Sava, D., Vlad, A., Tataru, R.: A new type of keystream generator based on chaotic maps: illustration on a Hénon generalized map. *IEEE Int. Conf. on Communications (COMM 2014)*, 551–557 (2014).
- [20] Wang, Y., Lei, P., Yang, H.Q., Cao, H.Y.: Security analysis on a color image encryption based on DNA encoding and chaos map. *Comput. Electr. Eng.* **46**, 433–446 (2015).
- [21] Krasilenko V.G. Algorithms and architecture for high-precision matrix-matrix multipliers based on optical four-digit alternating arithmetic / V.G. Krasilenko // *Measuring and computing engineering in technological processes.* - 2004. - №1. - pp. 13-26.
- [22] Krasilenko V.G. A noise-immune cryptographic information protection method for facsimile information transmission and the realization algorithms / V.G. Krasilenko, A.I. Nikolsky, V. F. Bardaschenko // *Proc. SPIE*, 2006. - Vol. 6241. - pp. 316-322.
- [23] Krasilenko V.G. Algorithms for the formation of two-dimensional keys for matrix algorithms of cryptographic transformations of images and their modeling / V.G. Krasilenko, V. I. Yatskovsky, R. A. Yatskovskaya // *Systems of information processing.* - 2012. - Exp. 8. - pp. 107-110.
- [24] Krasilenko V.G. Simulation of Blind Electronic Digital Signatures of Matrix Type on Confidential Text-Graphic Documentation / V.G. Krasilenko, R. O. Yatskovskaya, S. K. Grabovlyak, // *I ISMC: VNAU*, 2012. - pp. 103-107.
- [25] Krasilenko V.G. Modifications of the RSA system for creation of matrix models and algorithms for encryption and decryption of images on its basis / V.G. Krasilenko, S.K. Grabovlyak // *Systems of information processing.* - Kh.: KhUPPS, 2012. - Vol. 8. - pp. 102-106.
- [26] Krasilenko V.G., Matrix Affine Ciphers for the Creation of Digital Blind Signatures for Text-Graphic Documents / V.G. Krasilenko, S.K. Grabovlyak // *Systems of information processing.* - Kh.: KhUPPS, 2011. - Vol. 7 (97). - pp. 60 - 63.
- [27] Krasilenko V.G. Modeling of Matrix Cryptographic Protection Algorithms / V.G. Krasilenko, Yu.A. Flavitskaya // *Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic "Computer Systems and Networks"*. - 2009. - No. 658. - pp. 59-63.
- [28] Krasilenko V.G. Matrix affine and permutation ciphers for encryption and decryption of images / V.G. Krasilenko, S.K. Grabovlyak // *Systems of information processing.* - Kh.: KhUPPS, 2012. - Vol. 3 (101). - t. 2. - pp. 53-62.
- [29] Krasilenko V.G. Matrix models of cryptographic transformations of images with matrix-bit-map decomposition and mixing and their modeling / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // *Materials of 68 NTC "Modern Information Systems and Technologies. Informational security"*. - Odessa, ONAT them O.P.Popova, 2013. - pp. 139-143.
- [30] Krasilenko V.G. Cryptographic transformations of images based on matrix models of permutations with matrix-bit-map decomposition and their modeling / V.G. Krasilenko, V.M. Dubchak // *Bulletin of Khmelnytsky University. Technical sciences.* -2014.-No.1.-pp. 74-79.
- [31] Krasilenko, V.G. Modeling of Matrix Affine Algorithms for the Encryption of Color Images / V.G. Krasilenko, K.V. Ogorodnik, Yu.A. Flavitskaya // *Computer technologies: science and education: abstracts of reports v VseUkr. sci. conf.* - K., 2010. - pp. 120-124.
- [32] Krasilenko V.G. Modeling and research of cryptographic transformations of images based on their matrix-bit-map decomposition and matrix models of permutations with verification of integrity / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // *Electronics and Information Technologies: a collection of scientific works.* - Lviv: Lviv Ivan Franko National University, 2016. - Vol. 6. – pp. 111-127.
- [33] Krasilenko V.G. Simulation of cryptographic transformations of color images based on matrix models of permutations with spectral and bit-map decompositions / V.G. Krasilenko, D.V.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Nikitovich // Computer-integrated technologies: education, science, production: sciences. journ - Lutsk: Lutsk Publishing House. nats tech Un., - 2016. - No. 23. - pp. 31-36.

[34] Krasilenko V.G. Modeling cryptographic transformations of color images with verification of the integrity of cryptograms based on matrix permutation models / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // Materials of the scientific and practical Internet conference "Problems of modeling and development of information systems". - Drohobych: DDPU them. I. Franko, 2016. - pp. 128-136.

[35] Krasilenko V.G. Cryptographic transformations (CTs) of color images based on matrix models with operations on modules / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // Modern methods, information and software management systems for organizational and technical complexes: a collection of abstracts of reports of the All-Ukrainian scientific and practical Internet conference (May 11, 2016). - Lutsk: RVB of Lutsk National Technical University, 2016. - pp. 41-43.

[36] Krasilenko V.G. Modeling Protocols for Matching a Secret Matrix Key for Cryptographic Transformations and Matrix-type Systems / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // Systems of information processing. - 2017 - Vol. 3 (149). – pp. 151-157.

[37] Krasilenko V.G. Modeling of multi-stage and multi-protocol protocols for the harmonization of secret matrix keys / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // Computer-integrated technologies: education, science, production: scientific journal. - Lutsk: LNTU, 2017. - Vol. 26. – pp. 111-120.

[38] Krasilenko VG Modeling of methods for generating flows of matrix permutations of significant dimension for cryptographic transformations of images // V.G. Красиленко, D.V. Nikitovich // Abstracts of the II All-Ukrainian Scientific and Technical Conference Computer Technologies: Innovations, Problems, Solutions (November 14 - 15, 2019). - Zhytomyr: Zhytomyr Polytechnic, 2019. - pp. 67-77.

БЛОК-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МАТРИЦА AFFINE-PERMUTATION CIPHERS (BP_MAPCs) С ИЗОМОРФНЫМИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯМИ И ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

К.т.н. Красиленко В.Г., к.э.н. Лазарев А.А., Никитович Д.В.

Аннотация. Приведен краткий обзор предлагаемых многофункциональных блочных параметрических MAPCs, их подвидов векторных аффинных перестановочных шифров (VAPS). Показано, что для достижения цели целесообразно использовать изоморфизм различных представлений перестановок (матриц или векторов).), которые действуют как основные и поблочные ключи векторной матрицы. Моделирование подтверждает адекватность предложенных блочно-параметрических шифров (MAPCs) с изоморфными представлениями МП значительных размеров и блоков и их хорошими характеристиками, их преимуществами, включая повышенную стабильность и расширенную функциональность. Процессы криптопреобразований, генерации МП, основных МП и процессов «под ключ», их преимущества наглядно продемонстрированы рядом модельных экспериментов. Модели просты, удобны, адаптированы для многоформатных и цветных изображений, реализованы на матричных процессорах, обладают высокой эффективностью, стабильностью и быстродействием.

Ключевые слова: блочный параметрический матричный аффинный перестановочный шифр, векторный аффинный перестановочный шифр, изоморфизм различных представлений, моделирование, матричный процессор, матричный ключ, зашифрованный, расшифрованный, методы криптообработки изображений.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

БЛОК-ПАРАМЕТРИЧНА МАТРИЦА AFFINE-PERMUTATION CIPHERS (BP MAPCS) З ІЗОМОРФНЕ УЯВЛЕННЯ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

К.т.н. Красиленко В.Г., к.е.н. Лазарєв А.А., Микитович Д.В.

Анотація. Наведено короткий огляд пропонованих багатофункціональних блочних параметричних MAPS, їх підвидів векторних афінних перестановки шифрів (VAPS). Показано, що для досягнення мети доцільно використовувати ізоморфізм різних уявлень перестановок (матриць або векторів).), Які діють як основні і по блоках ключі векторної матриці. Моделювання підтверджує адекватність запропонованих блочно-параметричних шифрів (MAPS) з ізоморфними уявленнями МП значних розмірів і блоків і їх хорошими характеристиками, їх перевагами, включаючи підвищену стабільність і розширену функціональність. Процеси криптоперетворень, генерації МП, основних МП і процесів «під ключ», їх переваги наочно продемонстровані поруч модельних експериментів. Моделі прості, зручні, адаптовані для багатоматричним і кольорових зображень, реалізовані на матричних процесорах, мають високу ефективність, стабільністю і швидкодією.

Ключові слова: блоковий параметричний матричний афінний перестановочний шифр, векторний афінний перестановочний шифр, ізоморфізм різних уявлень, моделювання, матричний процесор, матричний ключ, зашифрований, розшифрований, методи криптообработки зображень.

УДК: 378.09

**THE USE OF LMS MOODLE AS AN ADMINISTRATION
INSTRUMENT OF DISTANCE LEARNING OF FUTURE
MARITIME SPECIALISTS**

Ph.D. Voloshynov S., Volska O., Popova H., Yurzhenko A.

Abstract. The paper examines the role of Learning Management Systems (LMS) during distance learning. The demands to distance learning of future maritime specialists are described in the article. The importance of personalized users' access to learning management system of higher educational institution is highlighted. The article also shows the ways of solving the problem of single source to all educational materials. LMS MOODLE is described as tool which provides different educational instruments. The importance to have different random questions on e-courses while credits and exams is also shown in the paper. LMS MOODLE of Kherson State Maritime Academy is shown as an administrative tool which can meet the requirement to LMS mentioned above. Different methods were used while research – theoretical, empirical and statistical one. The research confirms positive impact of LMS as distance learning technology on future maritime specialists' training. The perspectives of future research are in the study of virtual and augmented realities as additional tools of LMS in training of future maritime specialists.

Keywords: Learning Management System, Distance Learning, Digital Competency, Higher Educational Establishments, MOODLE.

The formation and rapid development of the information society with a clear transition to innovative models of development in all spheres of society is one of the necessary aspects nowadays. There is a need to create sufficient conditions for effective management of educational and cognitive activities of its participants. Because of COVID 2019 pandemic most of educational establishments over the world changed traditional learning into distance one. The problem of distance learning management arose.

Despite the fact that much of the information is available on the Internet, in particular, on the official website of the educational institution, different social networks etc. single online platform is needed. The evolution of the most popular free messengers (FaceBook, Twitter, LinkedIn, Academy, Telegram, WhatsApp, Viber etc) has led to the fact that now they can send both text, audio and video messages, so their popularity is growing every day. But they can't give access only to personalized users, can't provide single source to visit e-courses, exams and credits, don't have educational tools and instrument. Mentioned above messengers can't give possibility to determine the start and end time of access, task execution time. The objectivity of criteria for checking the results of tasks with the active use of automated methods for assessing knowledge should be presented. Same as variability of formation of

control tasks with use of algorithms of a random questions. So, the problem of learning management system for educational establishment arose.

To choose the most appropriate LMS for higher maritime institution research of many scientists was studied. The use of LMS was investigated by Nor Azura Adzharuddin [1], Cavus N. [2], Sibusisiwe D., Elsje S. [3], Wang Q., Woo H., Quek C., Yang Y., Liu M. [4], García-Peñalvo F., Alier Forment M. [5], Schoonenboom J. [6], Sherman M. [7] etc. Nor Azura Adzharuddin provided several insights of the LMS phenomenon. He concluded that the LMS is an important instrument for higher educational institution cadets as not they can keep updated with their coursework, but get instant notifications pertaining to their everyday tasks [1]. Scientist Cavus N. says that careful evaluation is required in selecting the most appropriate LMS for use, and this is a general problem in web-based education. To solve this problem he proposes automate the evaluation process using computer-aided techniques. He carried out his research with 88 voluntary higher education instructors to test the effectiveness of the developed system [2]. Sibusisiwe D. and Elsje S. in their research devoted to the Sakai LMS tried to understand the reasons for some lecturers to be dissatisfied with the e-learning platform experience despite their benefits. Their study informed the education practitioners on the importance of training and the need for refresher training workshops for value-added use of LMSs [3]. Wang Q., Woo H., Quek C., Yang Y. and Liu M. investigated Facebook group as LMS in two courses for putting up announcements, sharing resources, organizing weekly Teacherials and conducting online discussions at a teacher education institute in Singapore and found certain limitations [4]. García-Peñalvo F. and Alier Forment M. say that LS provides set of tools that support and permit the management. They also highlight that not only higher educational establishments, but also large companies should have LMS in their eLearning initiatives [5]. Schoonenboom J. rose a question regarding whether an instructor's LMS intention level can best be explained by the combination of a specific tool, a specific instructional task, and a specific user interface [6]. Sherman M. explores LMS MOODLE as a tool to teach "Maritime English" in higher educational establishment. The scientist lists the advantages of MOODLE and says that the electronic course in LMS MOODLE has an educational potential as an effective means for forming the foreign language competency of specialists in the maritime industry. Though he doesn't describe any management tools of the system in his research [7]. One of the most problematic issues nowadays is an authorized access of cadets to LMS of higher educational establishment. We agree that world-wide globalization process should promote free access to information resources, but personal account is needed for cadets [8]. Teachers should know certain time of different assignments enter and ending, total time needed for success. Most of tasks are limited in time to make e-tasks look like class

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ones. Presence of accounts allows to create personalized intelligent interface. Cadet has only those e-courses on his account which he has in curriculum. Example of account entrance of LMS MOODLE is shown in Fig. 1.

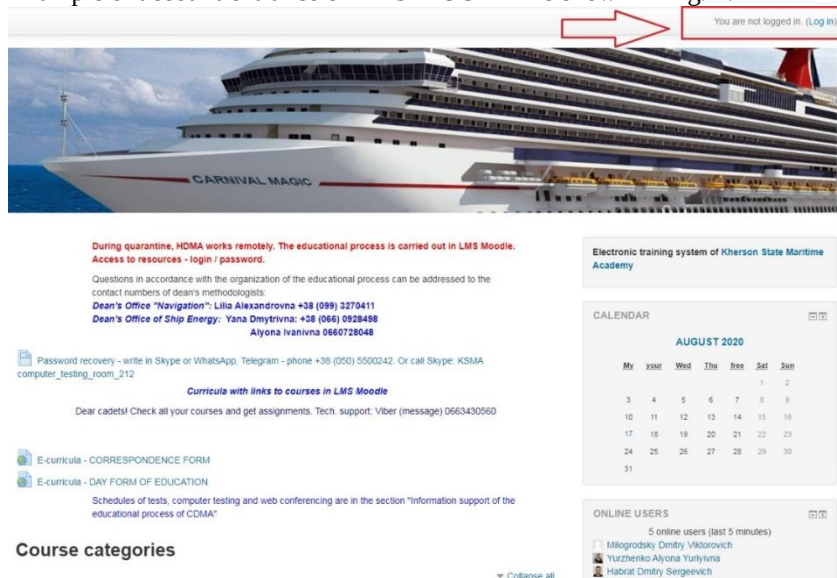


Fig. 1 - Entrance page of LMS MOODLE with the demand to enter personalized account

It is impossible to use LMS without automatical reports it provides. That is the place where teacher can easily find scope of information he searches about separate cadet or groups. The aim of reports is to check different issues (Competency breakdown, Logs, Live logs, Activity report, Course participation, Activity completion, Statistics). Competency breakdown report is connected with competency framework of the course. All competencies of higher maritime educational institution are added there by administrator of web site from IMO Model Courses and International convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) [9]. After adding competencies to the course teacher can link them to course activities and check whether they were formed or not by the end of module or course [10-12]. Competency breakdown part shows e-course list of competencies and information about them on each user of course. Example of report on Competency breakdown is shown in Fig.2. with the information from e-course of Maritime English for future ship engineers – Abridged programme.

Yurzhenko A.

Dashboard ▸ My courses ▸ Yurzhenko A. ▸ Reports ▸ Competency breakdown

NAVIGATION

- Dashboard
- Site home
- Site pages
- My courses
 - Web conference
 - Smart Control 19-20
 - Yurzhenko A.**
 - Participants
 - Badges
 - Competencies
 - Grades
 - General
 - Module 1: Shipboard Electrical Equipment
 - Topic 1: Basics of Electricity
 - Topic 2: Electrical Circuit and Ciurcuit Components
 - Topic 3: Measuring Electricity
 - Topic 4: How to use Multimeter
 - Topic 5: Electrical Safety
 - Check Your Competency Module 1
 - Module 2: Refrigeration Plant
 - Topic 1: Refrigeration Ships



Bilan Vitaliy Dmytrovych

Message Add to contacts

Competency breakdown

Competency ratings in this course are updated immediately in learning plans.

Competency	Rating
name the main components of electrical measuring devices, which ensure trouble-free operation of sh 1.1	Complies with requirements
speak about ref plant shipboard emergencies in terms of their causes, ways of preventing them and a 1.2	Complies with requirements
characterize arrangement and components of ship systems naming their working principles and prevent 1.3	Not rated
characterize the type of automatic control system in engine room and explain the principle of their 1.4	Not rated

Fig. 2 - Competency breakdown report with the information about separate cadet.

The possibility to send messages is also essential element of LMS MOODLE. They help not to use other Messengers and to keep all mailing in one place. Except messages other elements of LMS MOODLE can be used for administrational needs: forums, chats, feedbacks, questionnaires etc. Standard questionnaire of LMS MOODLE should be used by the end every course to help teachers to understand how well the course enabled cadets to study the material.

The questionnaire consists of six sections: Relevance (helps to compare ideal and actual experience of cadets by the end of the module in terms of professional practice), Reflective thinking (compares preferred and actual experience in terms of reflective thinking of cadets), Interactivity (compares ideal and actual experience in terms of interactive assignments), Teacher support (shows whether teacher's help was 100% useful or not), Peer support (shows whether groupmates' help was useful during e-course or not), Interpretation (compares preferred and actual experience in terms of feedback).

There are also extra questions which aren't included into any section. They are about time of completing the survey and about extra comments if any. Questionnaire also automatically calculates statistical results on survey responses and makes graphical representation. One more type of reports is about logs. It helps to get the logs according to different groups or participants of e-course, days or sources, actions or activities done by cadets. Teacher can

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

check the actions performed by teacher, cadet or user with a role other than teacher or cadet. Different from Logs is Live Logs Report. It shows live updates on particular time of event, user's full name, event context/name/description etc).

These logs are useful for teacher and manager to check activities of groups or separate cadets. Activity report represents e-course structure with full list of course's activities, number of their views by certain amount of users and last access time details.

The example of Activity report of "Maritime English" course for future ship engineers is shown in Fig. 3. LMS also helps to check course participation.

You can filter it by types of activities on e-course. If you have chosen the activity needed it can also be sorted out by time of access, role of user and his actions there (view or post). With the help of this type of report you can easily check cadets who have never visited certain course activities (see Fig.4).

Activity report

Yurzenko A.

Filter

Computed from logs since Sunday, 20 December 2015, 8:16 PM

Activity	Views	Related blog entries	Last access
News	21 views by 8 users	-	Monday, 29 June 2020, 1:35 AM (49 days 11 hours)
Help each other forum	9 views by 7 users	-	Monday, 29 June 2020, 1:32 AM (49 days 11 hours)
Topic 1: Basics of Electricity			
Vocabulary	4 views by 2 users	-	Monday, 29 June 2020, 1:11 AM (49 days 12 hours)
Vocabulary exercise	172 views by 33 users	-	Wednesday, 27 May 2020, 2:39 PM (81 days 22 hours)
Subatomic particles	134 views by 31 users	-	Thursday, 2 April 2020, 9:33 PM (136 days 15 hours)
Atomic structure	134 views by 28 users	-	Monday, 29 June 2020, 1:12 AM (49 days 12 hours)
Glossary Module 1 Topic 1	219 views by 29 users	-	Monday, 29 June 2020, 1:44 AM (49 days 11 hours)
Topic 2: Electrical Circuit and Ciurcuit Components			
Electrical circuit symbols	110 views by 29 users	-	Monday, 29 June 2020, 1:15 AM (49 days 12 hours)

Fig. 3 - Activity Report of LMS MOODLE "Maritime English"

One more type of report checks whether course activities were done by cadets or not. Graphical representation of LMS MOODLE report is shown in Fig. 5 where Teacher can filter it by group or alphabetic order (first name and second name). Report also represents cadet's ID, email address (all users have automatically created mail boxes on Zimbra KSMA messenger), name of

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

institution (KSMA has structural subdivisions: Lyceum, Maritime college and Academy itself), list of activities.

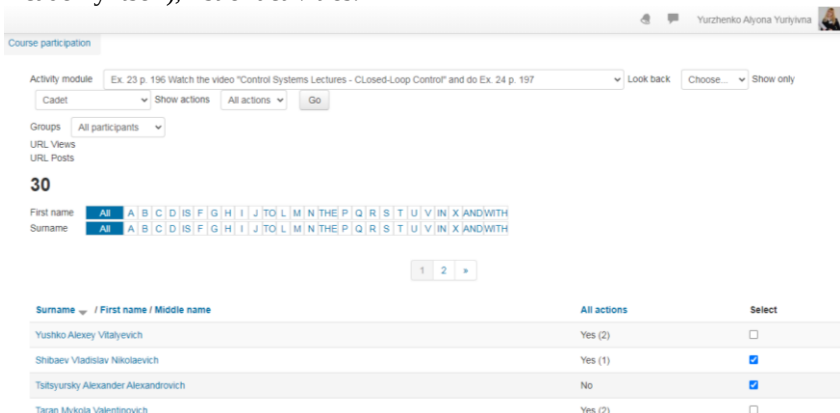


Fig. 4 - The example of Report on activity participation with list of cadets

First name / Surname	ID number	Email address	Institution	Inscription	Inscription	Help each other forum	Label	Vocabulary	Subatomic exercise	Atomic structure	Glossary Module 1 Topic 1	Label	Electrical circuit symbols	Electricity Symbols	Circuit of resistors	Electrical circuit Writing 1	Electrical circuit Writing 2	Label	Measuring devices	Forum	Measuring Electricity Project	Label	Multimeter Prozi	Vocabulary	Multimeter parts
Lupu Alexandru Vladimirovich	3959040	lupu.oleksandr@ksma.ks.ua	HDMA	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Marushchak Kirill Anatoliyovych	4116261	marushchak.kyrylo@ksma.ks.ua	HDMA	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Melnyk Dmytro Andriyovych	4784171	melnyk.dmytro@ksma.ks.ua	HDMA	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Moscow Igor Andreevich	3445046	mosku.igor@ksma.ks.ua	HDMA	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Perederiy Eduard Konstantinovich	4107978	perederiy.eduard@ksma.ks.ua	HDMA	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Rudnitsky Heorhiy Yevhenovych	4688957	rudnitskyi.heorhi@ksma.ks.ua	HDMA	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Blind Mark Vladimirovich	4643599	slipyi.mark@ksma.ks.ua	HDMA	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Yuriy Yuriyovych Strelets	4076824	striletsykyi.yuri@ksma.ks.ua	HDMA	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Suslov Vladimir Vladislavovich	4566419	suslov.volodymyr.v@ksma.ks.ua	HDMA	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Taran Mykola Valentynovich	4724096	taran.mykola@ksma.ks.ua	HDMA	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Tsitsyursky Alexander Alexandrovich	3953660	tsitsiurskyi.oleksandr@ksma.ks.ua	HDMA	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Shibaev Vladislav	4116611	shibaev.vladislav@ksma.ks.ua	HDMA	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒

Fig. 5 - The example of Activity completion Report

To know what user was doing on e-course and when it was done reports are powerful instrument of LMS MOODLE. Automatic graphical representation of the most of reports' types helps to better visualize course statistics and helps course management. Now because of COVID 2019 all teachers work with distance learning technologies. LMS is demand of our time. It is used the single platform which meets the requirements of modern

Ministries of Education not only in Ukraine, but all over the world [13-16]. LMS provides great variety of reports needed not only to cadet himself, but also to a Teacher and university administration. This system doesn't work without authorized access which eliminates security risks. It has elements to provide feedback. LMS provides communication between cadet and Teacher in asynchronous and synchronous modes with the help of Forums, Chats, Questionnaires, messages etc. Great number of random questions in questions bank enable cadets to cheat. All management tools and instruments of LMS MOODLE described above make it possible to change traditional face-to-face learning into distance one without limitation of effectiveness. Our recommendations in LMS MOODLE use are the following: compulsory authorized access (including access to e-courses on platform); reports use [17-19]; Competency Framework across all the activities of e-courses; Gradebook setting according to Teacher's needs; Calendar setting according to important events; huge Bank of questions for different control activities to create random questions of various level; compulsory feedback. The difference of LMS MOODLE use comparing non-maritime training is the following: use of competencies in Competency Framework according to international maritime convention STCW [9] and IMO Model courses; the use of Badges according to seafarers' epaulets; gradebook settling according to training program of seafarers (shipboard practice); maritime content of e-courses [20].

The perspectives of our future research are in the study of virtual and augmented realities as additional tools of LMS in training of future maritime specialists.

REFERENCES

- [1] Adzharuddin, N.: Learning Management System (LMS) among University Cadets: Does It Work?. International Journal of e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning. (2013).
- [2] Cavus, N.: Selecting a learning management system (LMS) in developing countries: instructors' evaluation. Interactive Learning Environments. 21, 419-437 (2013).
- [3] Sibusisiwe, D., Elsje, S.: An empirical study of knowledge sharing: A case of South African healthcare system. Knowledge Management & E-Learning: An International Journal. 114-128 (2019).
- [4] Wang, Q., Woo, H., Quek, C., Yang, Y., Liu, M.: Using the Facebook group as a learning management system: An exploratory study. British Journal of Educational Technology. 43, 428-438 (2011).
- [5] García-Peñalvo, F., Alier Forment, M.: Learning management system: evolving from silos to structures. Interactive Learning Environments. 22, 143-145 (2014).
- [6] Schoonenboom, J.: Using an adapted, task-level technology acceptance model to explain why instructors in higher education intend to use some learning management system tools more than others. Computers & Education. 71, 247-256 (2014).

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

[7] Sherman, M., Popova, H., Yurzhenko, A.: Interactive course "Maritime English" in the professional training of future mariners, <http://eKhSUIR.kspu.edu/handle/123456789/7171>.

[8] Agadzhanova, S., Tolbatov, A., Viunenko, O., Tolbatova, O.: Using cloud technologies based on intelligent agent-managers to build personal academic environments in e-learning system. 2017 2nd International Conference on

Advanced Information and Communication Technologies (AICT). (2017).

[9] International convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers STCW. IMO, London (2011).

[10] Popova, H., Yurzhenko, A.: Competency Framework as an Instrument to Assess Professional Competency of Future Seafarers. the 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer (2019).

[11] Gradebook - MoodleDocs, <https://docs.moodle.org/2x/ca/Gradebook>, last accessed 2020/05/14.

[12] Microsoft Excel, https://en.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Excel, last accessed 2020/05/15.

[13] Adams Becker, S., Cummins, M., Davis, A., Freeman, A., Hall Giesinger, C., & Ananthanarayanan, V. (eds.) NMC horizon report: 2017 higher Education Edition. Austin: The New Media Consortium (2017).

[14] Avramenko, A.; LMS MOODLE as a mobile platform. In: VII International Conference, vol. 1, p. 133. Russia, Moscow: MSU, (2012).

[15] Deng, L., Tavares, J.: From MOODLE to Facebook: Exploring Cadets' Motivation and Experiences in Online Communities. Journal Computers and Education, vol. 68, pp. 167-176. Oxford, UK. (2013)

[16] Universities and colleges. Ministry of Education and Science, <http://mon-covid19.info/uni>, last accessed 2020/05/14.

[17] Sherman, M., Chernikova, V.: Foreign language competence as a factor in the development of creative abilities of future navigators. Actual problems of public administration, pedagogy and psychology: collection of research papers of Kherson State Technical University 2013, vol. 1, no. 8, pp. 413-417. Kherson, Ukraine (2013).

[18] Yurzhenko, A.: An e-course based on the LMS MOODLE to teach "Maritime English for professional purpose." Information Technologies and Learning Tools. 71, 92 (2019).

[19] Huzar, V., Shalar, O., Strikalenko, Y., Yuskiv, S., Homenko, V., Novokshanova, A.: Psycho-pedagogical aspects of interaction between personality traits and physical qualities of the young gymnasts of the variety and circus studio. Journal of Physical Education and Sport. 2019, 344-347 (2019).

[20] Gritsuk, I., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., Volkov, V.: Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator, SAE Technical Paper 2016-01-0204 (2016).

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LMS MOODLE В КАЧЕСТВЕ
АДМИНИСТРАТИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДИСТАНЦИОННОГО
ОБУЧЕНИЯ БУДУЩИХ МОРСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ**

К.т.н. Волошинов С., Д. П.А. Вольская О., Попова Х., Юрженко А.

Аннотация. В статье исследуется роль систем управления обучением (LMS) во время дистанционного обучения. В статье изложены требования к дистанционному обучению будущих морских специалистов. Подчеркивается важность персонализированного доступа пользователей к системе управления обучением вуза. В статье также показаны способы решения проблемы единого источника для всех учебных материалов. LMS MOODLE описывается как инструмент, который предоставляет различные образовательные инструменты. В документе также показано, как важно задавать разные случайные вопросы на электронных курсах во время зачетов и экзаменов. LMS MOODLE Херсонской государственной морской академии показан как административный инструмент, отвечающий требованиям к LMS, упомянутым выше. При проведении исследования использовались разные методы - теоретический, эмпирический и статистический. Исследование подтверждает положительное влияние LMS как технологии дистанционного обучения на подготовку будущих морских специалистов. Перспективы будущих исследований заключаются в изучении виртуальной и дополненной реальности как дополнительных инструментов LMS в обучении будущих морских специалистов.

Ключевые слова: система управления обучением, дистанционное обучение, цифровая компетенция, высшие учебные заведения, MOODLE.

**ВИКОРИСТАННЯ LMS MOODLE ЯК ІНСТРУМЕНТУ УПРАВЛІННЯ
ДИСТАНЦІЙНИМ НАВЧАННЯМ МАЙБУТНІХ МОРСЬКИХ ФАХІВЦІВ**

К.т.н. Волошинов С., Вольська О., Попова Г., Юрженко А.

Анотація. У статті розглядається роль систем управління навчанням під час дистанційного навчання. Описано вимоги до дистанційного навчання майбутніх морських фахівців. Підкреслюється важливість доступу персоналізованих користувачів до системи управління вищого навчального закладу. У статті також показані шляхи вирішення проблеми єдиного джерела до всіх навчальних матеріалів. LMS MOODLE описується як інструмент, що забезпечує різні навчальні інструменти (зошит, тестування, завдання, календар тощо). Також важливо мати різні випадкові запитання на електронних курсах, заліках та іспитах. LMS MOODLE Херсонської державної морської академії показаний як адміністративний інструмент, який може відповідати вимогам до LMS, згаданих вище. Під час досліджень використовувались різні методи - теоретичний, емпіричний та статистичний. Дослідження підтверджує позитивний вплив LMS як технології дистанційного навчання на підготовку майбутніх морських фахівців. Перспективи майбутніх досліджень полягають у вивченні віртуальних та доповнених реальностей як додаткових інструментів LMS.

Ключові слова: система управління навчанням, дистанційне навчання, цифрова компетентність, вищі навчальні заклади, MOODLE.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

АКСАК Наталія Георгіївна, доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій і систем, просп. Науки, 14, м. Харків, 61166, *nataliia.axak@nure.ua*, orcid.org/ 0000-0001-8372-8432

АФАНАСЬЕВ Іван Александрович, Одеський національний політехнічний університет, проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, *nekaktotak2@gmail.com*, orcid.org/0000-0002-3207-5741X

БОРИСОВА Наталя Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра інтелектуальних комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, 61000, *borysova.n.v@gmail.com*, orcid.org/ 0000-0002-8834-2536

ВАСЯНИН Володимир Олександрович, доктор техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна 03186, *archukr@meta.ua*, orcid.org/0000-0003-4046-5243

ВОЛОШИН Вячеслав Степанович, доктор технических наук, профессор, ректор, Приазовский государственный университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, 87500, *SlavaSV52@outlook.com*, orcid.org/0000-0002-8423-2663

ВОЛОШИНОВ Сергей Анатольевич, кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой инновационных технологий и технических средств судовождения, Херсонская государственная морская академия, п-т Ушакова, 20, Херсон, 73009, *s_voloshinov@ukr.net*, orcid.org/0000-0001-7436-514X

ВОЛЬСЬКА Олена Михайлівна, професор кафедри публічного управління та адміністрування, ДВНЗ «Херсонський державний аграрний університет», вул. Стрітенська, 23, Херсон, 73006, *volski1945@ukr.net*, orcid.org/ 0000- 0001-5047-4579

ВОСТРОВ Георгий Николаевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий, Одесский национальный политехнический институт, Шевченко, 1, Одесса, Украина, 65044, *vostrov@gmail.com*, orcid.org/0000-0003-3856-5392

ВЫЧУЖАНИН Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, *vint532@yandex.ua*, orcid.org/ 0000-0002-6302-1832

ГОБОВ Денис Андрійович, кандидат технічних наук, старший викладач, факультет інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», п-т Перемоги, 37, Київ, 03056, *d.gobov@kpi.ua* orcid.org/ 0000-0001-9964-0339

ГОМЕНЮК Сергій Іванович, доктор технічних наук, професор, кафедра програмної інженерії, Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69600, *serega@znu.edu.ua*, orcid.org/0000-0001-7340-5947

ГРИШИН Сергей Иванович кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, *Grishin_si@ukr.net*, orcid.org/0000-0002-1933-9552

ДРОЗД Александр Валентинович, доктор технических наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, *drozdz@ukr.net*, orcid.org/0000-0003-2191-6758

ДРОЗД Юлия Владимировна, кандидат технических наук, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, *yuliia.drozdz@opu.ua*, orcid.org/0000-0001-5880-7526

ЖУРИЛЕНКО Борис Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры автоматизации и энергоменеджмента

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

аэрокосмического факультета, Национальный авиационный университет, ул. Рыбная 24а, г. Киев-138, 03138, zhurylenko@gmail.com, orcid.org/ 0000-0003-2980-5630

ЗАЩЕЛКИН Константин Вячеславович, кандидат технических наук, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, const@te.net.ua, orcid.org/0000-0003-0427-9005

ЗАЯЦЬ Юрій Васильович – директор транспортної компанії, м. Київ, zaiats.yurii@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5429-6511

КОРАБЛЬОВ Микола Михайлович, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій і систем, просп. Науки, 14, м. Харків, 61166, mykola.korablyov@nure.ua, orcid.org/ 0000-0002-8931-4350

КРАСИЛЕНКО Володимир Григорович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри електроніки та наносистем Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21000, krasvvg@i.ua, orcid.org/ 0000-0001-6528-3150

КУЗНЕЦОВ Николай Александрович, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, koliadodessa@ukr.net, orcid.org/0000-0002-3043-5924

ЛАЗАРЕВ Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21000, alexander.lazarev.vntu@gmail.com, orcid.org/ 0000-0003-1176-5650

ЛИСЕЦКИЙ Юрий Михайлович, доктор технических наук, Генеральный директор ДП “ЭС ЭНД ТИ УКРАИНА”, пр. Академика Палладина, г. Киев, Украина, 4403142, Yurii.Lysetskyi@snt.ua, orcid.org/ 0000-0002-5080-1856.

МАРТЫНЮК Александр Николаевич, кандидат технических наук, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, anmartynyuk@ukr.net, orcid.org/0000-0003-1461-2000

МЕЖУЕВ Виталий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор Института промышленного управления, Университет прикладных наук FH JOANNEUM, Капфенберг, Австрия, italiy.mezhuyev@fh-joanneum.at, orcid.org/0000-0002-9335-6131

МЕЛЬНИК Каріна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, 61000, karina.v.melnyk@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9642-5414

МИРОНЕНКО Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики, Приазовский государственный университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, 87500, miroenenko_ds@ukr.net, orcid.org/ 0000-0001-6022-7395

МИХАЙЛОВ Сергей Анатольевич, доктор технічних наук, професор, Национальный университет «Одесская морская академия», ул. Дидрихсона, 8, Одесса, Украина, 65000, smikhailov@i.ua, orcid.org/0000-0002-3218-2238

НИКІТОВИЧ Діана Вікторівна, інженер факультету інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21000, Nikitovych@i.ua, orcid.org/ 0000-0002-8907-1221

НИКОЛАЕВ Кирилл Иванович, эксперт безопасности дорожного движения, член Технического комитета DIN 226 WG3, Национальный авиационный университет, ул. Рыбная 24а, г. Киев-138, 03138, kyrylo.nikolaiev@gmail.com, orcid.org/ 0000-0002-2633-6907

ОПИАТА Роман, аспирант кафедры прикладной математики и информационных технологий, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, Одесса, Украина, 65044, roma.opyata@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5806-9615

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

ОТРАДСКАЯ Татьяна Васильевна, кандидат технических наук, директор частного учебного заведения «Одесский колледж компьютерных технологий «Сервер», Багрицкого, 126, Одеса, 65026, *tv_61@ukr.net*, *orcid.org/0000-0002-5808-5647*

ПЕТРОВ Игорь Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры морских перевозок, Национальный университет «Одесская морская академия», ул. Дидрихсона, 8, Одеса, 65029, *firmness@list.ru*, *orcid.org/0000-0002-8740-6198*

ПІГНАСТЫЙ Олег Михайлович, доктор технічних наук професор, каф. розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, 61000, *pihnastyi@gmail.com*, *orcid.org/0000-0002-5424-9843*

ПОВОРОЗНЮК Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, *ai.povoroznjuk@gmail.com*, *orcid.org/0000-0003-2499-2350*

ПОВОРОЗНЮК Оксана Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, *povoks@i.ua*, *orcid.org/0000-0001-7524-5641*

ПОСТАН Михаил Яковлевич, доктор технических наук, профессор, Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, Одесса, 65029, *postan@ukr.net*, *orcid.org/0000-0003-4891-3063*

РУДНИЧЕНКО Николай Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченко, 1, Одеса, 65044, *nickolay.rud@gmail.com*, *orcid.org/0000-0002-7343-8076*

СИТНИКОВ Валерий Степанович, доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченко, 1, Одеса, 65044, *sit-nvs@gmail.com*, *orcid.org/0000-0003-3229-5096*

СТРЕЛЬЦОВ Олег Васильевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра компьютерных систем, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченко, 1, Одеса, *ovstreltsov@gmail.com*, *orcid.org/0000-0002-4691-5703*

СТУПЕНЬ Павел Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, кафедра компьютерных систем, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченко, 1, Одеса, *stek2000@gmail.com*, *orcid.org/0000-0003-1952-6144*

УХИНА Анна Владимировна, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченко, 1, Одеса, 65044, *ukhinanna@gmail.com*, *orcid.org/0000-0003-3797-1460*

УШАКОВА Людмила Павлівна здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук, провідний інженер Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна 03186, *archukr@meta.ua*, *orcid.org/0000-0002-9020-1329*

ФАКС М., аспирант, Национальный техн. ун-т «Харьковский политехнический ин-т», ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, *orcid.org/0000-0001-7776-3311*

ФЕДОСОВА Ирина Васильевна, доктор педагогических наук, профессор, заведующая кафедрой «Компьютерные науки», Приазовский государственный университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, 87500, *irivasilevna1964@gmail.com*, *orcid.org/0000-0003-3923-8270*

ФИЛАТОВА Анна Евгеньевна, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники и программирования, Национальный техн. ун-т «Харьковский политехнический ин-т», ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, *filatova@gmail.com*, *orcid.org/0000-0003-1982-2322*

ФОМИЧОВ Александр Александрович, кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, просп. Науки, 14, м. Харків, 61166, *oleksandr.fomichov@nure.ua*,

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

orcid.org/ 0000-0001-9273-9862

ХОДУСОВ Валерій Дмитрович, д.ф.-м.н., професор кафедри теоретичної ядерної фізики та вищої математики ім. А.І. Ахизера, Харківський національний університет ім. В.Н.Каразіна, м-н Свободи, 4, Харків, 61000, vdkhodusov@karazin.ua, orcid.org/0000-0003-1129-3462

ЧУПРИНКА Віктор Іванович, доктор технічних наук, професор, кафедра комп'ютерних наук та технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, вул. Немировича-Данченка, 2, Київ, 01011, Chuprinka_V_I@ukr.net, orcid.org/0000-0001-6869-3091

ЧУПРИНА Андрій Олександрович, Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій і систем, e-mail: andrii.chuprina@nure.ua, просп. Науки, 14, м. Харків, 61166

ЧУПРИНКА Наталія Вікторівна кандидат технічних наук, асистент, кафедра комп'ютерних наук та технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, вул. Немировича-Данченка, 2, Київ, 01011, Natasha-chup@ukr.net, orcid.org/0000-0003-1507-489X

ШИБАЕВ Денис Сергеевич, аспірант кафедри технической кибернетики и информационных технологий, Одесский национальный морской университет, Мечникова 34, Одеса, 65044, denscreamer@gmail.com, orcid.org/ 0000-0002-3260-5843

ШИБАЕВА Наталья Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, Одесский национальный политехнический университет, проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, nati.shibaeva@gmail.com, orcid.org/ 0000—0002—7869—9953

ШИНКЕВИЧ Елена Станиславовна, доктор технических наук, профессор, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, Одесса, 65029, orcid.org/0000-0002-2842-1785

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

У монографії відображені результати наукових досліджень в області інформаційних систем управління, інтелектуальних систем і аналізу даних, моделювання і розробки програм. Матеріали монографії будуть корисними для аспірантів, магістрантів, викладачів вищих навчальних закладів, що спеціалізуються в області ІТ-технологій.

The monograph reflects the results of scientific research in the field of information management systems, intelligent systems and data analysis, modeling and software development. The materials of the monograph will be useful for graduate students, undergraduates, teachers of higher educational institutions specializing in the field of IT technologies.

Наукове видання

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ.

Монографія

Під науковою редакцією професора Вичужаніна Володимира

(Українською, російською, англійською мовами)

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 10,35.

Тираж 200 прим. Зам. 71 / 8.

Видавництво «Екологія».

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1873 від 20.07.2004

65091, м. Одеса, вул. Разумовська, 23 / 1;

тел. (0482) 33-07-17, 37-14-25, (048) 7-855-855

email: astro_print@ukr.net; www.astroprint.ua; www.stranichka.in.ua

Надруковано	з	готового	оригінал-макету
ФОП		Побута	М.І.
65044,	м.	Одеса,	пр-т Шевченка,
Тел.: 770-24-74,		email: pd5@ukr.net	1-а