

Труды МАИ. 2022. № 123
Trudy MAI, 2022, no. 123

Научная статья
УДК 004.021
DOI: [10.34759/trd-2022-123-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-19)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Алексей Евгеньевич Куренных

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 125993, Россия
alexey.kurennykh@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы поддержки решений и выработки рекомендаций с применением компьютерного моделирования и методов повышения согласованности суждений, а также вопросы передачи данных между информационными системами. Предложена методика использования множеств параметров и результатов прогона компьютерных моделей в процессе многокритериальной оценки альтернатив. Формализовано и разработано математическое и программное обеспечение для повышения согласованности суждений на примере метода парных сравнений.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, информационный обмен, выработка рекомендаций

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 20-31-90043.

Для цитирования: Куренных А.Е. Разработка программного обеспечения для интеграции моделей поддержки принятия решений // Труды МАИ. 2022. № 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-19)

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR THE INTEGRATION OF DECISION SUPPORT MODELS

Alexey E. Kurennykh

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

alexey.kurennykh@gmail.com

Abstract. The article deals with the issues of decision support and development of recommendations using computer modeling and methods for increasing the consistency of judgments, as well as issues of integration between information systems. The method for using sets of parameters and results of computer modelling in the process of multi-criteria evaluation of alternatives is proposed and formalized. This paper regards a possible solution to the problem of usage of simulation models in the process of decision-making support carried out with enterprises information systems. The integration of simulation models and models of decision support is set-theoretically formalized. Developed software form a separate module in the decision support system that makes it possible to rank alternatives submitted by simulation models. Designed architecture allows applying this approach for variable scientific and technical civil and military problems due to its universality.

In addition, in this paper the author formalized and developed mathematical and software to improve the consistency of judgments on the example of the method of paired comparisons, providing a sketch for an effective method to increase the consistency of judgments in a pairwise comparison matrix. Initially, there were identified criteria that are of great importance for experts who make judgments and then proposed a multi-criteria optimization task and a way to solve it. Basically, the method is based on well-known properties of matrixes containing paired comparisons marks, such as transitivity of judgments or consistency index for example. The use of both methods: integration of computer models and judgments consistency allows carrying out multicriteria analysis effectively with high precision.

Keywords: decision support, integration, recommender development

Funding: this research is supported by RFBR, project 20-31-90043.

For citation: Kurennykh A.E. Software Development for the Integration of Decision Support Models. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-19)

1. Введение

В настоящее время на многих отечественных предприятиях наблюдается тенденция к внедрению цифровых решений по автоматизации учетных процессов. Такой тренд обусловлен двумя факторами: продолжающейся волной импортозамещения [1], когда зарубежные информационные системы (ИС) замещаются аналогичными от Российских поставщиков программного обеспечения (ПО), а также необходимостью, исходящей от самих предприятий, в получении

различных видов отчетности, прозрачности учета и строгими требованиями к выполнению государственных и государственных оборонных заказов (ГЗ и ГОЗ). Важно отметить, что к 2022 году многие отечественные предприятия уже прошли этап первичного или повторного внедрения ИС, что дает возможность их дальнейшему информационному развитию путем разработки и внедрения систем более высокого уровня – систем поддержки принятия решений (СППР) и рекомендательных систем. Цель внедрения систем такого класса заключается в автоматизации и упрощении задач анализа большого объема данных, который накапливается в учетных системах предприятия, обеспечении принятия рациональных (оптимальных) управленческих решений.

Кроме анализа текущих фактических данных, получаемых по результатам финансово-хозяйственной деятельности предприятия, отдельный интерес представляет техническая задача осуществления планирования и анализа его результатов. Современные возможности ИС позволяют выполнять имитационные эксперименты (ИМЭ), например, при осуществлении производственного планирования на длительный горизонт. По результатам ИМЭ получается большое количество качественных и количественных показателей, которые затруднительны для анализа человеком, поэтому для их корректной и достоверной обработки необходимо использовать специальные системы для многокритериального анализа объектов. Также немаловажным является тот факт, что анализом результатов и процессом их формирования занимаются люди, поэтому особое место занимает проблема человеческого фактора, которую необходимо решать на уровне системы,

например, посредством использования методов повышения согласованности суждений.

В данной статье рассматривается решение задачи проектирования информационного пространства ИС производственного предприятия, целью которой является помощь лицам, принимающим решения в сложных условиях, для полного и объективного анализа предметной области. Рассматриваемая задача состоит в разработке архитектуры проектируемой системы, разработке ее основных модулей, а также в реализации интеграционных процессов между ИС с целью обеспечения непрерывного информационного обмена между ними и многокритериального анализа альтернатив на основе получаемых данных.

Важно отметить, что рассматриваемые в статье вопросы актуальны не только для отечественных предприятий, но и за пределами России [2]. Так, например, существуют исследования применения имитационного моделирования для повышения производительности в легкой промышленности [3], в производстве строительных материалов [4] и в других сферах промышленности [5]. Компьютерные методы ранжирования объектов, основанные на математических моделях, применяются при решении стратегически-важных задач, например, для оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций [6]. Применение методов компьютерного моделирования полезно для рационализации производственного процесса, и исследователи предлагают в своих работах практически-значимые модели, которые могут найти широкую сферу применения, однако процесс моделирования стоит обособленно от основных ИС предприятия, что приводит к дополнительным трудностям в процессе информационного обмена, необходимости двойного ввода

информации, ручных операций. Поэтому особенную важность представляет не сам процесс моделирования процессов, а его результаты в совокупности с интеграционными механизмами, обеспечивающими автоматизированную обработку и передачу данных. В настоящее время вопросы передачи данных между ИС актуальны во многих сферах деятельности [7, 8], предлагая различные технологии и протоколы для информационного обмена [9, 10], что позволяет выбрать допустимые способы передачи данных, а также выбрать наиболее рациональный для рассматриваемого типа задач, однако большинство интеграционных решений предлагаются для обмена электронными документами и справочниками.

2. Архитектура информационного пространства

При проектировании систем класса СППР или рекомендательных систем важно заранее заложить возможность их применения в различных научно-технических задачах. Так, например, в момент внедрения системы у предприятия имеется необходимость ранжирования поставщиков материально-производственных запасов, а в дальнейшем может появиться необходимость ранжирования потенциальных рынков сбыта продукции, что при неправильном подходе к проектированию системы может потребовать ее существенной переработки. Хорошим стилем при разработке таких систем является использование каркасной архитектуры с полным отказом от изначального ориентирования системы на решение задач в конкретной предметной области [11]. Таким образом, рекомендательная или поддерживающая решения система должна представлять из себя набор заложенных в нее математических алгоритмов теории принятия решений, отдельно стоящий блок оптимизационных

алгоритмов, обособленные алгоритмы, основанные на знаниях о предметной области, способов запуска имитационных, мультиагентных и других видов моделей, а также методы повышения согласованности суждений. Аналогичного подхода следует придерживаться в случае, когда СППР или рекомендательная система являются подсистемами основной ИС предприятия.

Каркасная архитектура указанного класса систем изображена на Рис. 1.

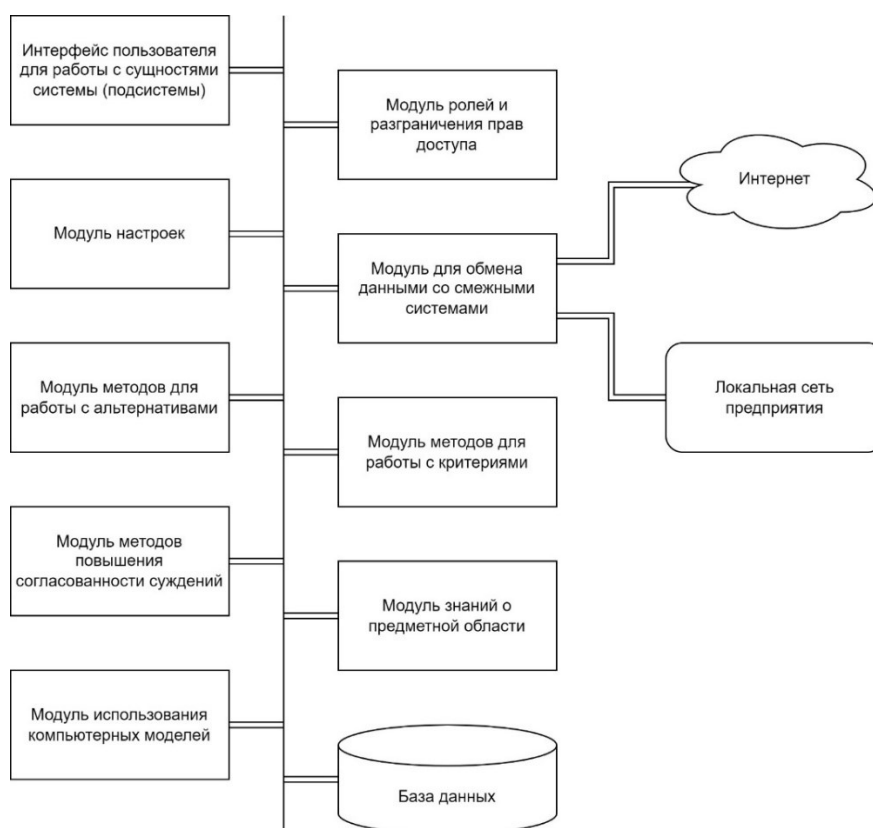


Рисунок 1. Архитектура каркасной системы

На данном рисунке изображены основные модули системы, которые реализуют весь необходимый функционал для работы пользователей при решении задач анализа предметной области с помощью СППР или рекомендательных систем. Отдельно выделены модули пользовательского интерфейса для взаимодействия с ПО, настройки и разграничения прав доступа. Модуль настройки позволяет выбирать и

настраивать методы для оценки и ранжирования сущностей, а также определяет необходимость использования смежных модулей, например, необходимость применения компьютерных моделей. Модули для работы с критериями и альтернативами содержат функционал для создания и редактирования деревьев критериев, а также методов их свертки, математические методы ранжирования альтернатив. Модуль методов повышения согласованности суждений содержит обеспечения для проверки непротиворечивости суждения, а также функционал для устранения некорректных ситуаций. Модуль использования компьютерных моделей выполняет роль инициатора прогона компьютерных моделей, передает в них набор входных параметров, а также принимает и обрабатывает результаты ИМЭ. Модуль знаний о предметной области позволяет задавать правила вывода для конкретных задач.

Одной из важнейших составляющих рассмотренного архитектурного решения является модуль для обмена данными со смежными системами, фактически, выполняющий роль адаптера для взаимодействия с информационным окружением, находящимся как в локальной сети пользователя системы, так и за ее пределами, примером такого взаимодействия может являться обмен данными с системой имитационного моделирования. Указанный архитектурный подход позволяет наращивать функционал системы путем введения дополнительных модулей, дополнительного информационного окружения и изменением направлений потоков данных без необходимости перестроения всей системы.

Рассмотрим подробнее отдельные составляющие информационного пространства, отвечающие за использование компьютерного моделирования в процессе многокритериального анализа альтернатив.

3. Использование компьютерного моделирования в процессе принятия решений

Компьютерное моделирование реализует представление системы или объектов в алгоритмической форме, включая в себя набор данных, характеризующих свойства исследуемой сущности и их изменения во времени. Применение компьютерных моделей имеет место, когда проведение натуральных экспериментов затруднительно ввиду дороговизны исследуемой сущности или, например, ее отсутствия по причине того, что система находится в стадии проектирования, например, в процессе исследования физических особенностей бортовых авиационных систем [12], а также при изучении помех, воздействующих на систему контроля и управления доступом (СКУД) [13]. Использование компьютерного моделирования в процессе поддержки принятия решений является существенным фактором, облегчающим анализ предметной области, т.к. в процессе ИМЭ могут быть выявлены важные зависимости вектора результатов моделирования от набора параметров модели, которые были неочевидны на этапе проектирования. Множества параметров модели, а также значения результатов моделирования могут быть использованы в качестве критериев для оценки исследуемых объектов наряду с прочими, например, априорными показателями, предложенными экспертами. Равную ценность компьютерное моделирование представляет для рекомендательных систем, основанных на знаниях

о предметной области. Например, процесс разработки ПО с целью анализа и рационализации может быть описан мультиагентной моделью [14-16].

Постановка задачи применения компьютерных моделей с целью поддержки принятия решения может быть формализована следующим образом. Пусть имеется конечное множество задач $T = \{t_i\}, i = \overline{1, n}$, предполагающих исследование с использованием компьютерных моделей. При этом каждой задаче из рассматриваемого множества соответствует свое множество компьютерных моделей, описывающих конкретную задачу $M_i = \{m_{ij}\}, j = \overline{1, k_i}$, где k_i – количество компьютерных моделей, применимых к t_i . Каждая из рассматриваемых моделей представляет отображение набора входных критериев (параметров модели) в набор выходных параметров (оценки результатов моделирования) $R_{ij} = m_{ij}(P_i)$, где R_{ij} – вектор оценок результатов моделирования с использованием компьютерной модели с номером j для задачи с номером i , P_i – вектор параметров компьютерной модели с для задачи с номером i . При этом задача автоматизации процесса исследования предметной области состоит в разработке алгоритмического и программного обеспечения для автоматического обмена данными между системой компьютерного моделирования и системой, выполняющей оценку сущностей, представляемых моделями. Итоговый векторный критерий, используемый для многокритериального анализа альтернатив в случае рассмотрения одной конкретной задачи, представляет из себя множество $S_i = A_i \cup R_i \cup P_i$, где A_i – набор априорных критериев для задачи t_i . Для передачи данных, содержащих результаты ИМЭ в ИС, с которой работает лицо, принимающее решения, используется разработанный интеграционный механизм.

После передачи данных из одной системы в другую необходимо обеспечить корректную работу с многокритериальной оценкой альтернатив, одним из главных требований которой является согласованность суждений. Рассмотрим подробнее задачу автоматизированного повышения согласованности суждений на примере использования метода парных сравнений.

4. Повышение согласованности суждений

Задачи повышения согласованности суждений имеют особое место в задачах поддержки решений и выработки рекомендаций. Например, в случае использования метода парных сравнений, который является одним из самых распространенных способов ранжирования объектов, находящим свое применение в различных областях деятельности [17-21], возникает необходимость для составления матриц парных сравнений, которые заполняются вручную человеком или несколькими людьми одновременно. Известный факт, что заполнение таких матриц, особенно в случае задач большой размерности, оказывает высокую нагрузку на человека, поэтому важно предусмотреть возможность локализации ошибочных ситуаций, а также рациональный способ их устранения. Такие ситуации принято называть несогласованностью суждений. На сегодняшний день существуют способы исправления таких ситуаций, однако их ключевой недостаток заключается в том, что при этом подвергается изменению вся матрица парных сравнений, что приводит к необходимости ее повторного анализа экспертом, корректировки и прочих изменений, которые замедляют процесс и оказывают дополнительную нагрузку. В

данной статье рассматривается метод повышения согласованности, главная цель которого состоит в повышении согласованности матрицы парных сравнений при минимальном количестве вносимых изменений.

Постановка данной задачи может быть формализована следующим образом. Пусть имеется некоторая квадратная обратно-симметричная матрица парных сравнений $A = [a_{ij}]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$ размера $n \times n$, которая была составлена экспертом для определения рангов критериев или альтернатив. Численной мерой согласованности данной матрицы является индекс согласованности, предложенный Т. Саати, который определяется как

$$CI_A = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение матрицы парных сравнений. Считается, что матрица парных сравнений является согласованной (допустимой к использованию), если значение $CI_A < 0.1$, в противном случае для получения корректных результатов оценки необходимо внести в матрицу исправления, рассчитываемые по формуле:

$$a_{ij}^* = a_{ij} + x_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{i+1, n} \quad (2)$$

Элементы под главной диагональю пересчитываются из условия обратной симметричности:

$$a_{ij}^* = \frac{1}{a_{ji}^*}, i = \overline{1, n}, j = \overline{i+1, n} \quad (3)$$

Элементы на главной диагонали всегда равны единице $a_{ii} = 1, i = \overline{1, n}$. Решение задачи повышения согласованности в данной постановке сводится к оптимизационной задаче, которая может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & \min_{\substack{x_{ij}^*, \\ a_{ij}^*}} CI(a_{ij}^*) \\
 & \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}^2(x_{ij}) \leq K \\
 & a_{ij}^* = a_{ij} + x_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{i+1, n} \\
 & a_{ji}^* = \frac{1}{a_{ij}^*}, i = \overline{1, n}, j = \overline{i+1, n} \\
 & 0 < a_{ij}^* \leq \varepsilon
 \end{aligned} \tag{4}$$

В ограничениях используется функция $\text{sgn}(x_{ij})$, принимающая три значения:

$$\text{sgn}(x_{ij}) = \begin{cases} -1 & , x_{ij} < 0 \\ 0 & , x_{ij} = 0 \\ 1 & , x_{ij} > 0 \end{cases} \tag{5}$$

Учитывая тот факт, что значение данной функции возводится в квадрат с последующим суммированием, получается количество изменяемых элементов над главной диагональю матрицы, K – задаваемый экспертом параметр, обозначающий количество допустимых корректировок матрицы парных сравнений. Дополнительное ограничение влияет на величину изменения оценки за счет параметра ε , указываемого экспертом. С учетом выбранного критерия оптимизации и наложенных ограничений результаты преобразования матрицы получаются пригодными для повторного анализа за счет малого количества изменений, а сама матрица парных сравнений становится достоверным источником данных для решения практических задач. $CI(a_{ij}^*)$ – это функция, определяющая индекс согласованности матрицы A^* на

основе ее максимального собственного значения. Целевая функция и ограничения оптимизационной задачи нелинейные, поэтому данная задача относится к классу задач нелинейного программирования. Для ее решения использовался алгоритм ISRES (Improved Stochastic Ranking Evolution Strategy - улучшенная стратегия эволюции стохастического ранжирования) [22]. Стратегия эволюции основана на сочетании правила мутации (с логарифмически нормальным шагом обновления и экспоненциальным сглаживанием) и дифференциальной вариации (правило обновления, подобное Нелдеру-Миду) [23]. Ранжирование пригодности выполняется просто через целевую функцию для задач без нелинейных ограничений, но, когда включаются нелинейные ограничения, используется стохастическое ранжирование, предложенное Рунарссоном и Яо [24]. Метод ISRES не гарантирует нахождения оптимального решения, но показал высокую эффективность по скорости работы и использованию ресурсов вычислительной системы в поиске решения близкого к оптимальному в рассматриваемом классе задач.

5. Апробация результатов

С целью апробации разработанного подхода был рассмотрен случай из трех ИС одного из производственных предприятий ракетно-космической отрасли в РФ, связь между которыми изображена на Рис. 2.

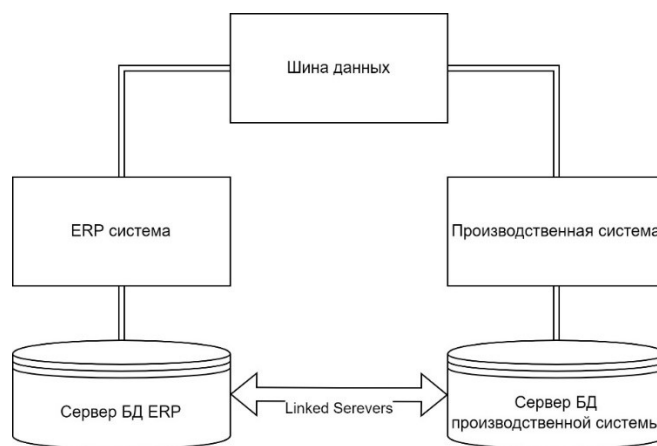


Рисунок 2. Используемые для апробации результаты системы

На нем изображены ERP система, система производственного учета, которые являются основными ИС в рассматриваемом случае, а также средство для обмена данными между ними – интеграционная шина. Отдельно изображены БД основных ИС.

Мастер-системой является производственная система, в которой реализуется производственное планирование с использованием APS (Advanced Planning & Scheduling) алгоритма [25]. Инициация информационного обмена происходит с помощью пользовательского интерфейса, изображенного на рис. 3.

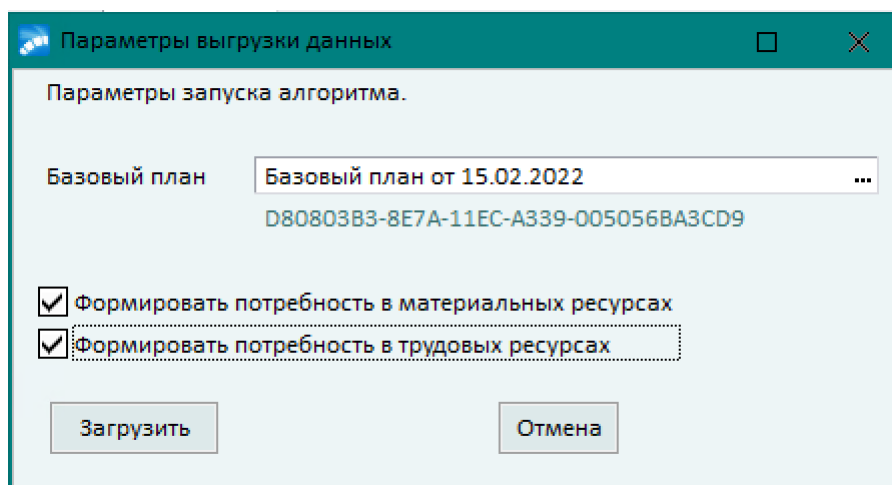


Рисунок 3. Интерфейс для запуска информационного обмена

По результатам выполнения планирования формируется несколько производственных программ на 3 года, которые содержат поперечные сведения о материалоемкости, а также трудозатратах с детализацией по требуемому предприятию аналитическим разрезам, к которым относятся: производимая и вовлекаемая в производство номенклатура, виды трудовых операций, места возникновения затрат, даты возникновения затрат и периоды планирования, виды затрат, единицы калькуляции затрат, проекты и т.д. Пример получаемого документа по материалоемкости показан на рис. 4.

Тип	Изделия: Матцнность, Услуга.	Ед. из..	Окончание	Статья затрат	Производств...	Подразделение	Деталь/Сборочная единица	Количество
МЦ	Круг 50 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		10.170
МЦ	Круг 50 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		1.860
МЦ	Круг 50 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		0.440
МЦ	Круг 50 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		6.800
МЦ	Круг 50 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Цех подготовки произво		0.100
МЦ	Круг 50 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Кузнечно-штамповочный		4.400
МЦ	Круг 50 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Кузнечно-штамповочный		0.460
МЦ	Круг 55 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		0.520
МЦ	Круг 55 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		2.610
МЦ	Круг 81-нд-6 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		0.038
МЦ	Круг 60-07X16Н6М-Ш (ЭП288М-Ш) ТУ 14-131-	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		1.780
МЦ	Круг 60-07X16Н6М-Ш (ЭП288М-Ш) ТУ 14-131-	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		6.200
МЦ	07X16Н6М-Ш Круг 60 ТУ 14-131-909-97	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		1.200
МЦ	07X16Н6М-Ш Круг 60 ТУ 14-131-909-97	Килогр		Сырье и основные м		Механический цех		9.330
МЦ	Круг 65 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Кузнечно-штамповочный		2.080
МЦ	Круг 65 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Кузнечно-штамповочный		3.640
МЦ	Круг 65 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Кузнечно-штамповочный		5.460
МЦ	Круг 65 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Кузнечно-штамповочный		3.270
МЦ	Круг 65 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Кузнечно-штамповочный		5.460
МЦ	Круг 65 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Кузнечно-штамповочный		3.270
МЦ	Круг 65 ГОСТ 2590-2006 / 07X16Н6М-Ш (ЭП28)	Килогр		Сырье и основные м		Кузнечно-штамповочный		1.820

Рисунок 4. Потребность в материальных ресурсах

На основании полученных вариантов производственных программ лицо, принимающее решения, должно выбрать рациональную, имея возможность варьировать параметры планирования и оценивая результаты планирования агрегированным критерием. Результаты планирования рассматриваются как результаты ИМЭ, которые затем передаются в систему-приемник данных, которым

является ERP система предприятия, содержащая необходимые сведения: прайс-листы и нормативы для оценки производственного плана с финансовой и логистической точек зрения. Количество записей в БД системы-источника, соответствующих одному варианту производственной программы, которые используются для дальнейшего анализа, составляет порядка 3 млн. штук.

Были рассмотрены два подхода к интеграции систем для целей обмена данными: посредством интеграционной шины, а также посредством прямого обмена данными между серверами БД с использованием технологии связанных серверов (Linked Server), с целью определения наиболее рационального способа передачи информации, в процессе чего было отмечено, что с использованием интеграционной шины:

- с учетом большого объема данных на выходе из системы-источника использование интеграционной шины не является предпочтительным, т.к. при этом оказывается существенная загрузка вычислительных мощностей на уровне приложений сети предприятия;

- по той же причине большого объема данных замедляется обработка других очередей передаваемых сущностей ИС, с которыми ежедневно работают пользователи прикладного ПО;

- наблюдались “зависания” прикладного ПО;

- время передачи данных составляло неприемлемые 9 часов, что накладывает существенные ограничения на частоту применения.

При обмене данными посредством технологии Linked server было выявлено, что:

- обмен данными не оказал существенного прироста нагрузки на уровне приложений;

- информационный обмен не оказывал никакого негативного влияния на пользователей систем, а также на быстродействие самого ПО;

- время передачи данных составило приемлемые 10 минут, что позволяет выполнять расчеты несколько раз в течение рабочего дня;

- выбор обмена на уровне серверов БД является наиболее предпочтительным, т.к. для функционирования баз данных выделяется аппаратное обеспечение с более высокими функциональными характеристиками.

После успешной передачи данных в ERP систему были выполнены необходимые расчеты, результаты которых сохраняются в системе-приемнике. Передача данных между системами выполняется требуемое число раз при разных параметрах планирования для дальнейшего анализа с целью принятия управленческих решений по настроенным критериям, к которым относятся:

- себестоимость производимых изделий;
- загрузка оборудования;
- простой рабочего персонала;
- соблюдение сроков выполнения контрактов;
- загрузка испытательных стендов;
- и т.д.

Перечисленные критерии агрегируют с использованием согласованных парных сравнений, – для целей определения весов критериев – и метода взвешенной суммы для определения итогового значения интегрального критерия. Рассмотрим пример использования данного алгоритма, допустим, что эксперты сформировали матрицу A парных сравнений пяти критериев, имеющую индекс согласованности CI_A .

$$A = \begin{pmatrix} 1.000 & 3.000 & 4.000 & 7.000 & 3.000 \\ 0.333 & 1.000 & 4.000 & 3.000 & 2.000 \\ 0.250 & 0.250 & 1.000 & 0.333 & 5.000 \\ 0.143 & 0.333 & 3.000 & 1.000 & 0.250 \\ 0.333 & 0.500 & 0.200 & 4.000 & 1.000 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$CI_A = 0.2088$$

После внесения корректировки трех элементов была получена матрица A^* с индексом согласованности CI_{A^*} , удовлетворяющему условию согласованности суждений.

$$A^* = \begin{pmatrix} 1.000 & 3.000 & 12.99 & 7.000 & 3.000 \\ 0.333 & 1.000 & 4.000 & 3.000 & 0.769 \\ 0.076 & 0.250 & 1.000 & 0.333 & 0.154 \\ 0.143 & 0.333 & 3.000 & 1.000 & 0.250 \\ 0.333 & 1.300 & 6.493 & 4.000 & 1.000 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$CI_{A^*} = 0.0192$$

Согласованная матрица парных сравнений используется для дальнейшего многокритериального анализа альтернатив в виде, например, использования метода взвешенной суммы на основе парных сравнений.

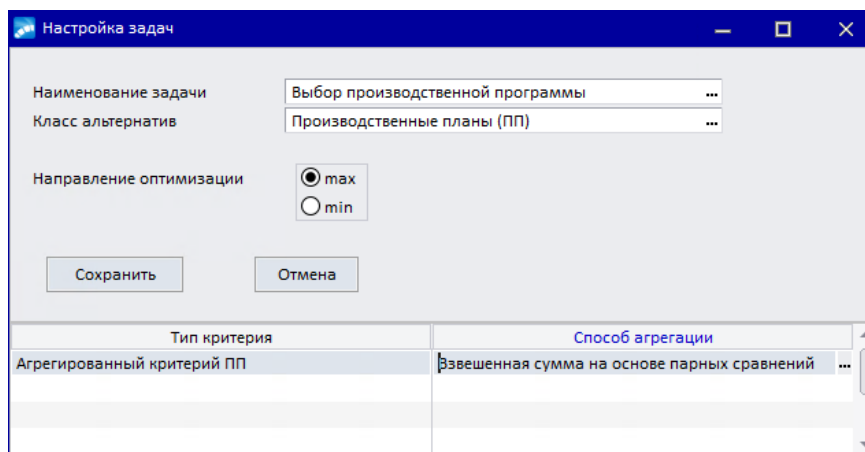


Рисунок 5. Агрегация векторного критерия с использованием парных сравнений

6. Заключение

В данной статье были рассмотрены основные функциональные составляющие, необходимые для поддержки решений и выработки рекомендаций в ИС предприятий ракетно-космической отрасли. Предложена и реализована каркасная архитектура такого типа систем, определено место модуля для работы с компьютерными моделями. Рассмотрены некоторые из возможных способов интеграции между ИС, проведен их сравнительный анализ. На основании проведенного сравнения был разработан механизм интеграционного обмена между двумя ИС посредством технологии Linked server, пользовательский интерфейс для инициации информационного обмена между системами, а также выполнены необходимые доработки базы данных.

Для модуля повышения согласованности суждений предложен критерий оптимизации матриц парных сравнений, сформулированы ограничения на

оптимизационные переменные, благодаря которым достигается выполнение требования согласованности суждений с соблюдением заданного числа вносимых изменений и их относительной величины. Рассмотренный метод реализован в виде пользовательского алгоритма, который был успешно использован для повышения согласованности суждений матрицы парных сравнений критериев.

Список источников

1. Ershova I., Ershov A. Development of a Strategy of Import Substitution // *Procedia Economics and Finance*, 2016, vol. 39, pp. 620-624. DOI: [10.1016/S2212-5671\(16\)30308-2](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(16)30308-2)
2. Ali M., Cullinane J. A Study to Evaluate the Effectiveness of Simulation based Decision Support System in ERP Implementation in SMEs // *Procedia Technology*, 2014, vol. 16, pp. 542-552. DOI: [10.1016/j.protcy.2014.10.002](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.002)
3. Guzman-Moratto H., Uribe-Martes C., Neira-Rodado D. Improving productivity using simulation: Case study of a mattress manufacturing process // *Procedia Computer Science*, 2022, vol. 198, pp. 650-655. DOI: [10.1016/j.procs.2021.12.301](https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.301)
4. Singh P.I., Singari R.M., Mishra R.S. A review of study on modeling and simulation of additive manufacturing processes // *Materials Today: Proceedings*, 2021. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.12.057](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.057)
5. Alves C.L., A. De Noni Jr, Janssen R., Hotza D., Rodrigues Neto J.B., Gómez González S.Y., Dosta M. Integrated process simulation of porcelain stoneware manufacturing using flowsheet simulation // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, vol. 33, pp. 473-487. DOI: [10.1016/j.cirpj.2021.04.011](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.04.011)

6. Проценко П.А., Хуббиев Р.В. Методика ранжирования космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с целью оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций охлаждения // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=159796>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-18)
7. Bhadoria R.S., Chaudhari N.S., Tomar G.S. The Performance Metric for Enterprise Service Bus (ESB) in SOA system: Theoretical underpinnings and empirical illustrations for information processing // Information Systems, 2017, vol. 65, pp. 158-171. DOI: [10.1016/j.is.2016.12.005](https://doi.org/10.1016/j.is.2016.12.005)
8. Bhadoria R.S., Chaudhari N.S. et al. Analyzing the role of interfaces in enterprise service bus: A middleware epitome for service-oriented systems // Computer Standards & Interfaces, 2018, vol. 55, pp. 146-155. DOI: [10.1016/j.csi.2017.08.001](https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.08.001)
9. Ming-zhe YU. Design on enterprise service bus message conversion protocol based on XSLT // The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, vol. 20, Supplement 1, pp. 50-54. DOI: [10.1016/S1005-8885\(13\)60249-6](https://doi.org/10.1016/S1005-8885(13)60249-6)
10. Schel D., Henkel C., Stock D., Meyer O., Rauhöft G. et al. Manufacturing Service Bus: An Implementation // Procedia CIRP, 2018, vol. 67, pp. 179-184. DOI: [10.1016/j.procir.2017.12.196](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.196)
11. Sudakov V., Nesterov V., Kurennykh A. Integration of decision support systems “Kosmos” and WS-DSS with computer models // 2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD), 2017, pp. 1-4. DOI: [10.1109/MLSD.2017.8109690](https://doi.org/10.1109/MLSD.2017.8109690)
12. Попов Е.П., Вережкин А.А., Насонов Ф.А. Исследование физических особенностей авиационных систем с применением математического моделирования

на примере системы воздушного охлаждения // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=161429>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-15)

13. Шкиндеров М.С., Мубараков Р.Р. Моделирование помехоустойчивости системы контроля и управления доступом при воздействии электростатического разряда // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=161426>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-12)

14. Судаков В.А. Автоматизация процесса управления разработкой корпоративной информационной системы // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 1. С. 149-153.

15. Зайцев А.А., Куренных А.Е., Судаков В.А., Романов О.Т. Рациональный выбор исполнителей на проектах по созданию информационных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 292–298. DOI: [10.17586/2226-1494-2019-19-2-292-298](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-292-298)

16. Batkovskiy A., Kurennykh A., Semenova E., Sudakov V., Fomina A., Balashov V. Sustainable project management for multi-agent development of enterprise information systems // Entrepreneurship and Sustainability, 2019, vol. 7, pp. 278-290. DOI: [10.9770/jesi.2019.7.1\(21\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2019.7.1(21))

17. Saaty T., Pierfrancesco P. Rethinking Design and Urban Planning for the Cities of the Future // Buildings, 2017, vol. 7, no. 76, pp. 1-22. DOI: [10.3390/buildings7030076](https://doi.org/10.3390/buildings7030076)

18. Saaty T.L, Rokou E. How to prioritize inventions // World Patent Information, 2017, vol. 48, pp. 78-95. DOI: [10.1016/j.wpi.2017.02.003](https://doi.org/10.1016/j.wpi.2017.02.003)

19. Kakiashvili T., Koczkodaj W.W., Magnot J.-P. Approximate reasoning by pairwise comparisons: Topodynamics of metastable brains by Arturo Tozzi et al. // *Physics of Life Reviews*, 2017, vol. 21, pp. 37-39. DOI: [10.1016/j.pprev.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.pprev.2017.04.001)
20. Saaty T. Neurons the decision makers. The firing function of a single neuron. Part I // *Neural Networks*, 2017, vol. 86, pp. 102-114. DOI: [10.1016/j.neunet.2016.04.003](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2016.04.003)
21. Saaty T. The firings of many neurons and their density; the neural network its connections and field of firings. Part 2 // *Neural Networks*, 2017, vol. 86, pp. 115-122. DOI: [10.1016/j.neunet.2016.04.004](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2016.04.004)
22. Runarsson T., Yao X. Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization // *Evolutionary Computation, IEEE Transactions*, 2000, no. 4, pp. 284-294. DOI: [10.1109/4235.873238](https://doi.org/10.1109/4235.873238)
23. Nelder J.A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization // *The Computer Journal*, 1965, vol. 7, pp. 308-313. DOI: [10.1093/comjnl/7.4.308](https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308)
24. Runarsson T., Yao X. Search Biases in Constrained Evolutionary Optimization // *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews)*, 2005, no. 35 (2), pp. 233-243. DOI: [10.1109/TSMCC.2004.841906](https://doi.org/10.1109/TSMCC.2004.841906)
25. Richard A. Estombelo Montesco, Marcosiris A. O. Pessoa, Mauricio Blos. Scheduling heuristic resourced-based on task time windows for APS (Advanced planning and scheduling) Systems // *15th IFAC/IEEE/IFIP/IFORS Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 2015, vol. 48, issue 3, pp. 2273-2280. DOI: [10.1016/j.ifacol.2015.06.426](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.426)

References

1. Ershova I., Ershov A. Development of a Strategy of Import Substitution, *Procedia Economics and Finance*, 2016, vol. 39, pp. 620-624. DOI: [10.1016/S2212-5671\(16\)30308-2](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(16)30308-2)
2. Ali M., Cullinane J. A Study to Evaluate the Effectiveness of Simulation based Decision Support System in ERP Implementation in SMEs, *Procedia Technology*, 2014, vol. 16, pp. 542-552. DOI: [10.1016/j.protcy.2014.10.002](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.002)
3. Guzman-Moratto H., Uribe-Martes C., Neira-Rodado D. Improving productivity using simulation: Case study of a mattress manufacturing process, *Procedia Computer Science*, 2022, vol. 198, pp. 650-655. DOI: [10.1016/j.procs.2021.12.301](https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.301)
4. Singh P.I., Singari R.M., Mishra R.S. A review of study on modeling and simulation of additive manufacturing processes, *Materials Today: Proceedings*, 2021. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.12.057](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.057)
5. Alves C.L., A. De Noni Jr, Janssen R., Hotza D., Rodrigues Neto J.B., Gómez González S.Y., Dosta M. Integrated process simulation of porcelain stoneware manufacturing using flowsheet simulation, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, vol. 33, pp. 473-487. DOI: [10.1016/j.cirpj.2021.04.011](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.04.011)
6. Protsenko P.A., Khubbiev R.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159796> DOI: [10.34759/trd-2021-119-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-18)
7. Bhadoria R.S., Chaudhari N.S., Tomar G.S. The Performance Metric for Enterprise Service Bus (ESB) in SOA system: Theoretical underpinnings and empirical illustrations for information processing, *Information Systems*, 2017, vol. 65, pp. 158-171. DOI: [10.1016/j.is.2016.12.005](https://doi.org/10.1016/j.is.2016.12.005)

8. Bhadoria R.S., Chaudhari N.S. et al. Analyzing the role of interfaces in enterprise service bus: A middleware epitome for service-oriented systems, *Computer Standards & Interfaces*, 2018, vol. 55, pp. 146-155. DOI: [10.1016/j.csi.2017.08.001](https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.08.001)
9. Ming-zhe YU. Design on enterprise service bus message conversion protocol based on XSLT, *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2013, vol. 20, Supplement 1, pp. 50-54. DOI: [10.1016/S1005-8885\(13\)60249-6](https://doi.org/10.1016/S1005-8885(13)60249-6)
10. Schel D., Henkel C., Stock D., Meyer O., Rauhöft G. et al. Manufacturing Service Bus: An Implementation, *Procedia CIRP*, 2018, vol. 67, pp. 179-184. DOI: [10.1016/j.procir.2017.12.196](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.196)
11. Sudakov V., Nesterov V., Kurennykh A. Integration of decision support systems “Kosmos” and WS-DSS with computer models, *2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*, 2017, pp. 1-4. DOI: [10.1109/MLSD.2017.8109690](https://doi.org/10.1109/MLSD.2017.8109690)
12. Popov E.P., Vereikin A.A., Nasonov F.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161429>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-15)
13. Shkinderov M.S., Mubarakov R.R. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161426>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-12)
14. Sudakov V.A. *Aerospace MAI Journal*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 149-153.
15. Zaitsev A.A., Kurennykh A.E., Sudakov V.A., Romanov O.T. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 292–298. DOI: [10.17586/2226-1494-2019-19-2-292-298](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-292-298)
16. Batkovskiy A., Kurennykh A., Semenova E., Sudakov V., Fomina A., Balashov V. Sustainable project management for multi-agent development of enterprise information

- systems, *Entrepreneurship and Sustainability*, 2019, vol. 7, pp. 278-290. DOI: [10.9770/jesi.2019.7.1\(21\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2019.7.1(21))
17. Saaty T., Pierfrancesco P. Rethinking Design and Urban Planning for the Cities of the Future, *Buildings*, 2017, vol. 7, no. 76, pp. 1-22. DOI: [10.3390/buildings7030076](https://doi.org/10.3390/buildings7030076)
18. Saaty T.L, Rokou E. How to prioritize inventions, *World Patent Information*, 2017, vol. 48, pp. 78-95. DOI: [10.1016/j.wpi.2017.02.003](https://doi.org/10.1016/j.wpi.2017.02.003)
19. Kakiashvili T., Koczkodaj W.W., Magnot J.-P. Approximate reasoning by pairwise comparisons: Topodynamics of metastable brains by Arturo Tozzi et al. *Physics of Life Reviews*, 2017, vol. 21, pp. 37-39. DOI: [10.1016/j.plrev.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.plrev.2017.04.001)
20. Saaty T. Neurons the decision makers. The firing function of a single neuron. Part I, *Neural Networks*, 2017, vol. 86, pp. 102-114. DOI: [10.1016/j.neunet.2016.04.003](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2016.04.003)
21. Saaty T. The firings of many neurons and their density; the neural network its connections and field of firings. Part 2, *Neural Networks*, 2017, vol. 86, pp. 115-122. DOI: [10.1016/j.neunet.2016.04.004](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2016.04.004)
22. Runarsson T., Yao X. Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions*, 2000, no. 4, pp. 284-294. DOI: [10.1109/4235.873238](https://doi.org/10.1109/4235.873238)
23. Nelder J.A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization, *The Computer Journal*, 1965, vol. 7, pp. 308-313. DOI: [10.1093/comjnl/7.4.308](https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308)
24. Runarsson T., Yao X. Search Biases in Constrained Evolutionary Optimization, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews)*, 2005, no. 35 (2), pp. 233-243. DOI: [10.1109/TSMCC.2004.841906](https://doi.org/10.1109/TSMCC.2004.841906)

25. Richard A. Estombelo Montesco, Marcosiris A. O. Pessoa, Mauricio Blos. Scheduling heuristic resourced-based on task time windows for APS (Advanced planning and scheduling) Systems, *15th IFAC/IEEE/IFIP/IFORS Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 2015, vol. 48, issue 3, pp. 2273-2280. DOI: [10.1016/j.ifacol.2015.06.426](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.426)

Статья поступила в редакцию 23.02.2022; одобрена после рецензирования 05.03.2022; принята к публикации 20.04.2022.

The article was submitted on 23.02.2022; approved after reviewing on 05.03.2022; accepted for publication on 20.04.2022.