

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ И ВЫБОРА АВТОМАТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ (AGV) ДЛЯ СКЛАДОВ

Стойич Мирко¹, Стевич Желько¹, Николич Андрей¹, Божичкович Здравко¹

¹ Восточно-Сараевский университет, Факультет транспорта и организации перевозок, г. Добой, Босния и Герцеговина

Аннотация

Для повышения эффективности транспортировки и складирования грузов в настоящее время используется комплекс транспортных и погрузочно-разгрузочных средств и устройств. Ключевую роль в автоматизации складов играет особый вид транспортных средств – автоматически управляемые транспортные средства (AGV – Automatic Guided Vehicles). Основными преимуществами использования AGV являются: снижение затрат на оплату труда складских рабочих; повышение надёжности, безопасности и производительности погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ; повышение сохранности грузов; возможность автоматизации управления работой всего транспортно-складского комплекса. Решать задачу выбора модели AGV авторами предлагается с использованием разработанной и представленной в статье гибридной FUCOM-EDAS модели. Методом FUCOM (Full Consistency Method – метод полной согласованности) производится расчёт значений весовых коэффициентов альтернатив, а методом EDAS (The Evaluation based on Distance from Average Solution – оценка отклонения от среднего решения) – выбор наилучшей альтернативы. Представлен пример выбора AGV из девяти моделей по семи критериям. Оценка чувствительности полученных результатов и разработанной модели производилась методами WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment – метод совокупной взвешенной суммы), SAW (Simple Additive Weighting – метод простого аддитивного взвешивания), MABAC (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison – метод сравнения многокритериальных разграниченных областей) и ARAS (Additive Ratio Assessment – метод оценки аддитивного отношения). Для двух из рассмотренных альтернатив были получены одинаковые результаты для всех четырёх методов оценки устойчивости. Показана методика выбора приоритетной альтернативы (альтернатива A5 в представленном примере).

Ключевые слова: автоматически-управляемые транспортные средства, AGV, FUCOM, EDAS, транспортные и погрузочно-разгрузочные средства, WASPAS, SAW, MABAC, ARAS.

1. Введение*

Активное развитие логистики в настоящее время связано с широким распространением информационно-коммуникационных технологий, в частности, для автоматической идентификации грузов, отслеживания транспортных средств с использованием навигационных систем, автоматического управления транспортными средствами и т.д. Одной из областей, в которых ярко проявляются эти тенденции, является транспортно-складская система. Современные технологии позволяют полностью автоматизировать работу складов, включая процессы получения, отправки, размещения, внутренней транспортировки, упаковки, грузов.

Для выполнения погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ используется широкий комплекс средств и устройств. Укрупнённо этот комплекс подразделяется на четыре категории: устройства для хранения грузов (полки, стеллажи, штабели); автоматизированные системы (системы размещения и поиска грузов, конвейеры, роботизированные системы перемещения грузов, автоматически управляемые транспортные средства); погрузчики; оборудование для навальных грузов (бункеры, элеваторы, конвейеры) [1].

Основными целями применения новых технологий

на складах является экономия затрат трудовых и материальных ресурсов, что способствует снижению цены конечного продукта [2]. Выбор оборудования для выполнения погрузочно-разгрузочных работ является сложной задачей, поскольку необходимо учитывать множество ограничений, противоречивых критериев, фактор неопределённости, а также производить выбор из большого количества конкретных моделей оборудования [3].

Существуют различные методы выбора оптимального состава оборудования, большинство из которых основано на так называемых методах многокритериального принятия решений (multi-criteria decision-making) и методах нечёткой логики (fuzzy logic) [4,5]. В работе [6] была разработана экспертная система для выбора оптимального оборудования для внутрискладских перевозок. Способ комбинирования методов нечётких множеств, аналитической иерархии (МАИ) с методом PROMETHEE представлен в работе [7]. МАИ позволяет создавать многоуровневую структуру критериев выбора [8]. Интеграция МАИ и экспертных систем предложена в работе [9], в которой представлена система MHESA (Material Handling Equipment Selection Advisor – экспертная система по выбору оборудования для погрузочно-разгрузочных работ). Гибридный ме-

тод, основанный на комбинировании экспертной системы с методами нечёткой логики и генетическими алгоритмами, представлен в [10].

Ключевую роль в автоматизации складов играет особый вид транспортных средств – автоматически управляемые транспортные средства (AGV – Automatic Guided Vehicles). Основными преимуществами использования AGV являются: снижение затрат на оплату труда складских рабочих; повышение надёжности, безопасности и производительности погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ; повышение сохранности грузов; возможность автоматизации управления работой всего транспортно-складского комплекса.

В настоящей статье представлена методика оценки и выбора AGV для складов на основе использования гибридной FUCOM-EDAS модели. Насколько нам известно, в настоящее время отсутствуют исследования в области комбинирования методов FUCOM (Full Consistency Method – метод полной согласованности) и EDAS (The Evaluation based on Distance from Average Solution – оценка отклонения от среднего решения) для решения задачи оценки и выбора AGV для складов.

Материал статьи организован следующим образом. Во втором разделе представлено подробное описание используемых в работе методов. Показано, что метод FUCOM используется для расчёта весовых коэффициентов критериев, а метод EDAS – для определения наилучшего решения. В третьем разделе анализируются типы AGV, а также приводится описание их основных функций. Четвёртый раздел содержит описание разработанной методики выбора AGV и пример её применения для девяти альтернатив – конкретных моделей AGV. Выбор осуществлялся по семи критериям, которые наиболее часто используются на практике при выборе этих транспортных средств. В пятом разделе представлены результаты анализа чувствительности полученных результатов с использованием методов WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment – метод совокупной взвешенной суммы), SAW (Simple Additive Weighting - метод простого аддитивного взвешивания), MABAC (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison – метод сравнения мультикритериальных разграниченных областей) и ARAS (Additive Ratio Assessment – метод оценки аддитивного отношения). В заключении представлены выводы о достоинствах представленного комбинированного метода.

2. Методы исследования

Применение многокритериальных методов принятия решений позволяет выбирать рациональные стратегии, оптимизировать логистические и транспортные процессы, обосновывать разнообразные управленческие решения. Примеры использования различных многокритериальных методов для решения разнообразных задач в области производства, транспорта, логистики, информационных технологий и т.д. представлены в работах [11–16].

В настоящей статье представлена комбинация

двух методов: метод FUCOM используется для расчёта весовых коэффициентов критериев; метод EDAS – для выбора наилучшего из потенциальных решений. Для оценки чувствительности полученных результатов и разработанной модели использованы методы WASPAS, SAW, MABAC и ARAS.

2.1 Метод FUCOM

Метод FUCOM был разработан Рамушар, Стевич и Sremac [17] для определения весов критериев. По мнению авторов, этот метод превосходит метод аналитической иерархии (МАИ) и метод BWM (Best Worst Method – «лучший худший способ»). FUCOM предоставляет возможность проверить модель, рассчитав размер ошибки для полученных векторов веса критериев, определив степень согласованности. В моделях BWM [18] и МАИ [19] при определении весов критериев имеется избыточность из-за парного сравнения. Такая избыточность не позволяет адекватно отразить ошибки в суждениях экспертов. Процедура метода FUCOM устраняет эту проблему. Данная процедура получения весовых коэффициентов критериев включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Ранжирование предварительно отобранных критериев $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$. Ранжирование выполняется в соответствии со значимостью критериев, начиная с критерия, который, как ожидается, будет иметь самый высокий весовой коэффициент, до критерия наименьшей значимости

$$C_{j(1)} > C_{j(2)} > \dots > C_{j(k)}. \quad (1)$$

Этап 2. Сравнение ранжированных критериев и определение сравнительного приоритета ($\varphi_{k/(k+1)}$, $k=1, 2, \dots, n$, где k – ранг критериев) критериев оценки

$$\Phi = (\varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \dots, \varphi_{k/(k+1)}). \quad (2)$$

Этап 3. Вычисление окончательных значений весовых коэффициентов критериев оценки (w_1, w_2, \dots, w_n)^T. Эти значения должны удовлетворять следующему двум условиям:

а) соотношение весовых коэффициентов должно быть равно сравнительному приоритету критериев $\varphi_{k/(k+1)}$, определённых этапе 2, то есть выполняется следующее условие

$$\frac{w_k}{w_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)}; \quad (3)$$

б) окончательные значения весовых коэффициентов должны удовлетворять условию математической транзитивности, то есть $\varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} = \varphi_{k/(k+2)}$. С учётом выражения (3) и $\varphi_{(k+1)/(k+2)} = w_{(k+1)}/w_{(k+2)}$ получаем

$$\frac{w_k}{w_{k+1}} \otimes \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}} = \frac{w_k}{w_{k+2}}.$$

Таким образом, получаем другое условие, которому должны удовлетворять конечные значения весовых коэффициентов критериев оценки

$$\frac{w_k}{w_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)}. \quad (4)$$

Окончательно модель определения значений весовых коэффициентов критериев оценки запишется следующим образом

$$\begin{aligned} & \min \chi, \\ & \text{при условиях:} \\ & \left| \frac{w_{j(k)}}{w_{j(k+1)}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| = \chi, \quad \forall j, \\ & \left| \frac{w_{j(k)}}{w_{j(k+2)}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| = \chi, \quad \forall j, \\ & \sum_{j=1}^n w_j = 1, \quad \forall j, \\ & w_j \geq 0, \quad \forall j. \end{aligned} \quad (5)$$

В результате решения модели (5) получаются значения критериев оценки $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ и величины отклонения от полной согласованности (χ) полученных результатов.

2.2 Метод EDAS

Метод EDAS был разработан Keshavarz Ghorabae и др. [20] и применялся для решения задачи многокритериальной классификации запасов. Метод состоит из следующих этапов.

Этап 1: Выбор наиболее важных критериев, которые описывают альтернативы.

Этап 2: Формирование исходной матрицы принятия решений

$$X = [x_{ij}]_{nm} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где x_{ij} – значение i -й альтернативы согласно j -му критерию.

Этап 3: Расчёт средних значений критериев

$$AV = [AV_j]_{1m}, \quad (7)$$

где

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ij}}{n}. \quad (8)$$

Этап 4. Расчёт значений элементов матрицы положительных расстояний от среднего (PDA – the Positive Distance from Average) и отрицательных расстояний от среднего (NDA – the Negative Distance from Average) в зависимости от цели критериев (выгода или затраты) согласно следующим формулам:

$$PDA = [PDA_{ij}]_{nm}, \quad (9)$$

$$NDA = [NDA_{ij}]_{nm}. \quad (10)$$

Для критериев «выгода» элементы матриц (9, 10) рассчитываются по формулам

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j}, \quad (11)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j}, \quad (12)$$

а для критерия «затраты» по формулам

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j}, \quad (13)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j}, \quad (14)$$

где PDA_{ij} и NDA_{ij} – соответственно, положительное и отрицательное расстояние i -й альтернативы от среднего значения j -го критерия.

Этап 5. Расчёт взвешенных значений PDA и NDA для всех альтернатив по формулам

$$SP_i = \sum_{j=1}^{j=m} w_j PDA_{ij}, \quad (15)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^{j=m} w_j NDA_{ij}, \quad (16)$$

где w_j – вес j -го критерия.

Этап 6. Нормализация значений SP и SN для всех альтернатив согласно следующим выражениям

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max_i(SP_i)}, \quad (17)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max_i(SN_i)}. \quad (18)$$

Этап 7. Расчёт балльных оценок (AS – the Appraisal Score) для всех альтернатив по формуле

$$AS_i = \frac{1}{2}(NSP_i + NSN_i), \quad (19)$$

где $0 \leq AS_i \leq 1$.

Этап 8. Ранжирование альтернатив в порядке уменьшения значений оценочного балла (AS). Альтернатива с самым высоким значением AS является лучшим выбором среди потенциальных альтернатив.

3. Автоматически управляемые транспортные средства

К автоматически управляемым транспортным средствам часто относят грузовые транспортные средства с автономным приводом, имеющие собственный источник энергии и оборудованные грузозахватными устройствами. Согласно другим определениям, транспортными средствами с автоматическим управлением, обозначаемые аббревиатурой AGV, являются беспилотные наземные транспортные средства с компьютерным управлением и, чаще всего, с электрическим питанием от батарей. Важно подчеркнуть, что эти транс-

портные средства не имеют водителей, то есть они могут функционировать без операторов. Эффективность применения таких средств обычно обосновывается возможностью сокращения до 75% затрат на заработную плату по сравнению с неавтоматизированными процессами.

Начало использования транспортных средств с автоматическим управлением связано с достижением американской компании Barrett Vehicle Systems, которая в 1954 году впервые смогла автоматизировать авто-буксировщик, движение которого регулировалось механически проводом, расположенным над транспортным средством. В последующем разработки в этой области осуществлялись в Германии компаниями Jungheinrich и Wagner (1963 год). С 1970 года автоматически управляемые транспортные средства используются в больницах [21].

Системы AGV включают в себя транспортные средства, систему управления и дополнительное оборудование. Современные наземные транспортные средства управляются встроенными в них микропроцессорами. В большинстве случаев работа AGV координируется системой управления, которая решает различные задачи координации и оптимизации: распределяет заказы на перевозку; отслеживает транспортные средства и перевозимые ими грузы; регулирует потоки автоматически управляемых транспортных средств на складах в соответствии с различными приоритетами [22].

3.1 Типы автоматически управляемых транспортных средств

Системы AGV обеспечивают высокую степень гибкости и автоматизации при транспортировке грузов, зачастую не требуют внесения существенных изменений в конструкцию существующих погрузочно-разгрузочных и транспортных средств. Грузоподъемность AGV варьируется от 1 кг до 100 т. По этому признаку мы различаем следующие типы AGV:

- тягачи (towing vehicles);
- транспортёры штучных грузов (unit load vehicles);
- тележки (pallet trucks);
- вилочные погрузчики (forklift trucks);
- транспортные средства специального назначения (special-purpose vehicles).

Тягачи были первыми автоматизированными транспортными средствами и остаются самыми популярным типом AGV в настоящее время. Они имеют грузоподъемность от 4 до 25 т и могут транспортировать несколько прицепов. Тягачи обычно применяются для обеспечения внешних перевозок склада, а также для работы в зоне погрузки и выгрузки грузов.

Транспортёры штучных грузов – тип транспортного средства для перевозки грузов на платформе, которая обеспечивает как подъем груза, так и его горизонтальное перемещение на ней для погрузки или выгрузки конвейерами различного типа. Транспортёры используются для транспортировки на короткие расстояния и обеспечивают высокую скорость грузопо-

тока. Благодаря возможности автоматического подключения к конвейерам, автоматизированным системам хранения и поиска грузов (AS/RS – Automated Storage and Retrieval System) они часто интегрируются в существующие системы автоматизации складов или производственных линий.

Автоматические тележки предназначены для транспортировки грузов на поддонах, как правило, на небольшие расстояния внутри склада. Перемещение поддона происходит путём его подъёма на небольшую высоту над уровнем пола. Загрузка тележек может осуществляться двумя способами – автоматически, с использованием средств позиционирования груза на тележке или вручную.

Вилочные погрузчики с автоматическим управлением являются новейшим типом AGV. По внешнему виду и функциям они похожи на традиционные вилочные погрузчики. В дополнение к транспортировке погрузчики обеспечивают подъем пакетированных грузов на большую, по сравнению с тележками, высоту. Это делает пригодным использование погрузчиков в складских системах, где требуется полная автоматизация и большая гибкость в соединении с другими автоматизированными подсистемами. Новейшая тенденция развития автоматически управляемых вилочных погрузчиков заключается в полной автоматизации операций транспортирования, размещения грузов на складе, а также погрузки и выгрузки грузов с внешнего транспорта.

Транспортные средства специального назначения с автоматическим управлением – это автомобили для перевозки тяжеловесных (весом до 65 тонн) и негабаритных грузов.

3.2 Основные функции автоматически управляемых транспортных средств

Для того чтобы системы автоматически управляемых транспортных средств функционировали на складе, где они установлены, и без труда выполняли свои задачи, важно, чтобы они имели возможность выполнять несколько основных функций, таких как:

- навигация (guidance);
- маршрутизация (routing);
- управление потоком транспортных средств (traffic management);
- перегрузка (load transfer);
- управление системой AGV (system management).

Навигация AGV может осуществляться на основе двух принципов – «заданная траектория» и «свободное движение». Движение по заданной траектории может осуществляться с использованием механических, индуктивных и оптических устройств. Обеспечение движения AGV по произвольной траектории осуществляется с использованием лазерного наведения.

Функция маршрутизации AGV обеспечивает движение транспортных средств по оптимальному маршруту по всей территории склада. Функция маршрутизации реализуется двумя методами. Первый «метод выбора частоты» (frequency selection method) предпо-

лагает следование транспортного средства по маршруту, задаваемому сигналом определённой частоты. Различные маршруты движения по складу формируются сигналами разных генераторов. Второй метод – «метод выбора с переключением» (selection method with a switch) основан на периодическом включении или выключении сигналов, определяющих различные маршруты движения.

Управление потоком транспортных средств – это функция системы AGV, обеспечивающая движение транспортных средств без столкновений, особенно в условиях увеличения плотности транспортного потока. Существует три типа управления потоком транспортных средств: «контроль зоны» (zone control) – контролируемая территория разбивается на фиксированные зоны, в каждой из которых может находиться не более одного транспортного средства; сенсорный контроль (sensor control) – транспортные средства оборудуются датчиками столкновения; комбинаторный контроль (combinatorial control) – комбинация контроля первых двух типов.

Перегрузка в системе AGV может производиться вручную, путём автоматического соединения (разъединения) с другими погрузочно-разгрузочными средствами и устройствами, а также с использованием средств и устройств горизонтального, вертикального и

горизонтально-вертикального перемещения грузов.

Управление системой AGV обеспечивает диспетчеризацию транспортных средств, а также мониторинг функционирования всей системы.

4. Выбор автоматически управляемых транспортных средств

Для выбора AGV в исследовании использовались два метода: метод FUCOM для определения весовых коэффициентов критериев оценки и метод EDAS для определения наилучшего решения. Выбор осуществлялся среди девяти альтернатив (девяти моделей AGV) с использованием семи критериев.

4.1 Разработка многокритериальной модели

В расчётном примере покупатель AGV оценивает ограниченный набор альтернатив, используя следующие семь критериев: C1 – размеры; C2 – минимальная высота подъёма; C3 – цена; C4 – грузоподъёмность; C5 – ёмкость аккумуляторной батареи; C6 – максимальная высота подъёма; C7 – скорость. В табл. 1 представлен перечень моделей выбираемых вилочных погрузчиков и значения критериев для каждой модели.

Таблица 1

Исходная матрица принятия решений

Альтернативы	Критерии						
	C1, мм	C2, мм	C3, \$	C4, кг	C5, А·ч	C6, мм	C7, км/ч
A1 AGV OKDD16	1480x896x825	85	90000	1600	240	3000	5
A2 AGV OKDD16-III	1480x896x825	85	90000	1600	240	4500	5
A3 AGV OKDD20	1480x896x825	85	90000	2000	260	2500	5
A4 EFORK CDD10-25	2120x850x1830	80	75000	1000	210	2050	5.8
A5 OKAVGV OK-FDuX-JX-II	1480x896x825	85	90000	2500	240	2050	5
A6 AMA MLF1500AGV	1975x796x3493	100	65000	1500	240	3900	5.8
A7 EFORK YF-JG01 1098	2500x1100x2500	80	110000	2000	210	3000	5.8
A8 HICTRL HAS16	2125x1160x2450	80	85000	1600	240	3000	3
A9 HICTRL HAR18	2455x2630x2100	80	85000	1800	315	3000	3

4.2 Расчёт веса критериев с использованием метода FUCOM

Расчёт веса методом FUCOM в примере производится для семи критериев: C1 – размеры (min); C2 – минимальная высота подъёма (min); C3 – цена (min); C4 – грузоподъёмность (max); C5 – ёмкость аккумулятора (max); C6 – максимальная высота подъёма (max); C7 – скорость (max). Первые три критерия относятся к типу критериев «затраты», а остальные четыре – «выгода».

Этап 1. Лица, принимающие решения, проводят ранжирование критериев на основе консенсуса: C4 = C7 > C1 > C3 > C6 > C5 > C2.

Этап 2. Парное сравнение лицами, принимающими решения, критериев, проранжированных на первом этапе. Сравнение проводится с критерием C4, имеющим наивысший ранг. Для сравнения используется шкала [1,9]. В результате определяются приоритеты

критериев ($\bar{\omega}_{C_j(k)}$) для всех рассматриваемых критериев (табл. 2).

Таблица 2

Приоритет	Приоритеты критериев						
	C4	C7	C1	C3	C6	C5	C2
$\bar{\omega}_{C_j(k)}$	1	1	1.5	1.9	2.6	2.9	3.1

На основании полученных приоритетов критериев рассчитываются сравнительные приоритеты критериев $\varphi_{c4/c7} = 1/1 = 1$, $\varphi_{c7/c1} = 1.5/1 = 1.5$, $\varphi_{c1/c3} = 1.9/1.5 = 1.27$, $\varphi_{c3/c6} = 2.6/1.9 = 1.37$, $\varphi_{c6/c5} = 2.9/2.6 = 1.11$, $\varphi_{c5/c2} = 3.1/2.9 = 1.07$.

Этап 3. Проверка окончательных значений весовых коэффициентов условиям (3) и (4).

Для условия (3): $w_4/w_7 = 1$, $w_7/w_1 = 1.5$, $w_1/w_3 = 1.27$, $w_3/w_6 = 1.37$, $w_6/w_5 = 1.11$, $w_5/w_2 = 1.07$.

Для условия (4): $w_4/w_1 = 1 \cdot 1.5 = 1.5$, $w_7/w_3 = 1.5 \cdot 1.27$

$= 1.91, w_1/w_6 = 1.27 \cdot 1.37 = 1.74, w_3/w_5 = 1.37 \cdot 1.11 = 1.52, w_6/w_2 = 1.11 \cdot 1.07 = 1.19.$

С учётом выражения (5) получаем модель определения значений весовых коэффициентов критериев оценки

$$\min \chi, \begin{cases} \left| \frac{w_4}{w_7} - 1 \right| = \chi, \left| \frac{w_7}{w_1} - 1.5 \right| = \chi, \left| \frac{w_1}{w_3} - 1.27 \right| = \chi, \\ \left| \frac{w_3}{w_6} - 1.37 \right| = \chi, \left| \frac{w_6}{w_5} - 1.11 \right| = \chi, \left| \frac{w_5}{w_2} - 1.07 \right| = \chi, \\ \left| \frac{w_4}{w_1} - 1.5 \right| = \chi, \left| \frac{w_7}{w_3} - 1.91 \right| = \chi, \left| \frac{w_1}{w_6} - 1.74 \right| = \chi, \\ \left| \frac{w_3}{w_5} - 1.52 \right| = \chi, \left| \frac{w_6}{w_2} - 1.19 \right| = \chi, \\ \sum_{j=1}^7 w_j = 1, w_j \geq 0, \forall j. \end{cases}$$

В результате решения данной модели получаем значения весовых коэффициентов: $w_1 = 0.157, w_2 = 0.076, w_3 = 0.124, w_4 = 0.236, w_5 = 0.081, w_6 = 0.091, w_7 = 0.236,$ а значение величины отклонения от полной согласованности (Deviation from Full Consistency – DFC) результатов составляет $\chi = 0.0013$ или 13%. Полученное значение DFC свидетельствует об объективности полученных результатов, что позволяет сделать вывод о применимости метода FUCOM для решения рассматриваемой задачи.

Кроме того, метод FUCOM, на основании значений веса критериев, позволяет сделать вывод о важности этих критериев. В представленном примере наиболее важными критериями являются четвёртый (грузоподъёмность) и седьмой (скорость) критерии со значе-

нием 0.236. После них следует первый критерий (размеры) со значением 0.157. За ними следуют третий (цена) – 0.124, шестой (максимальная высота подъёма) – 0.091, пятый (ёмкость аккумуляторной батареи) – 0.081 и второй (минимальная высота подъёма) – 0.076 критерии.

4.3 Оценка и ранжирование альтернатив с использованием метода EDAS

Метод EDAS позволяет определить наилучшее решение проблемы.

Этап 1. На первом этапе выбираются наиболее важные критерии оценки альтернативных решений. Для рассматриваемого примера эти критерии такие же, как и при использовании метода FUCOM: C1 – размеры; C2 – минимальная высота подъёма; C3 – цена; C4 – грузоподъёмность; C5 – ёмкость аккумуляторной батареи; C6 – максимальная высота подъёма; C7 – скорость.

Этап 2. Построение исходной матрицы принятия решений согласно выражению (6). В табл. 3 представлена исходная матрица принятия решений для альтернатив (табл. 1).

Этап 3. Расчёт средних значений критериев по формулам (7, 8). Результаты расчёта представлены в табл. 4.

Этап 4. Расчёт положительных (PDA) и отрицательных (NDA) расстояний значений матрицы (табл. 4) от средних значений, в соответствии с целями критериев по формулам (9-14). Результаты расчётов представлены в табл. 5 и 6.

Этап 5. Расчёт значений взвешенных сумм PDA и NDA для всех альтернатив по формулам (15, 16). Результаты расчёта взвешенных матриц PDA и NDA представлены в табл. 7 и 8.

Таблица 3

Критерии	Исходная матрица принятия решений									Цель
	Альтернативы									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	
C1	1	1	1	3	1	5	7	5	7	MIN
C2	85	85	85	80	85	100	80	80	80	MIN
C3	90000	90000	90000	75000	90000	65000	110000	85000	85000	MIN
C4	1600	1600	2000	1000	2500	1500	2000	1600	1800	MAX
C5	240	240	260	210	240	240	210	240	315	MAX
C6	3000	4500	2500	2500	2050	3900	3000	3000	3000	MAX
C7	5	5	5	5.8	5	5.8	5.8	3	3	MAX

Таблица 4

Критерии	Средние значения критериев									Цель	AV _j	W _j
	Альтернативы											
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9			
C1	1	1	1	3	1	5	7	5	7	MIN		0.157
C2	85	85	85	80	85	100	80	80	80	MIN	84.44	0.076
C3	90000	90000	90000	75000	90000	65000	110000	85000	85000	MIN	86666.67	0.124
C4	1600	1600	2000	1000	2500	1500	2000	1600	1800	MAX	1733.33	0.236
C5	240	240	260	210	240	240	210	240	315	MAX	243.89	0.081
C6	3000	4500	2500	2500	2050	3900	3000	3000	3000	MAX	3050.00	0.091
C7	5	5	5	5.8	5	5.8	5.8	3	3	MAX	4.82	0.236

Таблица 5

Критерии	Положительные расстояния (<i>PDA</i>) значений альтернатив от среднего									W_j
	Альтернативы									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	
C1	0.710	0.710	0.710	0.129	0.710	0.000	0.000	0.000	0.000	0.157
C2	0.000	0.000	0.000	0.053	0.000	0.000	0.053	0.053	0.053	0.076
C3	0.000	0.000	0.000	0.135	0.000	0.250	0.000	0.019	0.019	0.124
C4	0.000	0.000	0.154	0.000	0.442	0.000	0.154	0.000	0.038	0.236
C5	0.000	0.000	0.066	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.292	0.081
C6	0.000	0.475	0.000	0.000	0.000	0.279	0.000	0.000	0.000	0.091
C7	0.037	0.037	0.037	0.203	0.037	0.203	0.203	0.000	0.000	0.236

Таблица 6

Критерии	Отрицательные расстояния (<i>NDA</i>) значений альтернатив от среднего									W_j
	Альтернативы									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	
C1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.452	1.032	0.452	1.032	0.157
C2	0.007	0.007	0.007	0.000	0.007	0.184	0.000	0.000	0.000	0.076
C3	0.038	0.038	0.038	0.000	0.038	0.000	0.269	0.000	0.000	0.124
C4	0.077	0.077	0.000	0.423	0.000	0.135	0.000	0.077	0.000	0.236
C5	0.016	0.016	0.000	0.139	0.016	0.016	0.139	0.016	0.000	0.081
C6	0.016	0.000	0.180	0.180	0.328	0.000	0.016	0.016	0.016	0.091
C7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.378	0.378	0.236

Таблица 7

Критерии	Матрица взвешенных значений <i>PDA</i>									$\max_i(SP_i)$
	Альтернативы									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	
C1	0.111	0.111	0.111	0.020	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000	
C2	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.004	0.004	0.004	
C3	0.000	0.000	0.000	0.017	0.000	0.031	0.000	0.002	0.002	
C4	0.000	0.000	0.036	0.000	0.104	0.000	0.036	0.000	0.009	
C5	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	
C6	0.000	0.043	0.000	0.000	0.000	0.025	0.000	0.000	0.000	
C7	0.009	0.009	0.009	0.048	0.009	0.048	0.048	0.000	0.000	
SP_i	0.120	0.163	0.162	0.089	0.225	0.104	0.088	0.006	0.039	0.225

Таблица 8

Критерии	Матрица взвешенных значений <i>NDA</i>									$\max_i(SN_i)$
	Альтернативы									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	
C1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.071	0.162	0.071	0.162	
C2	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.014	0.000	0.000	0.000	
C3	0.005	0.005	0.005	0.000	0.005	0.000	0.033	0.000	0.000	
C4	0.018	0.018	0.000	0.100	0.000	0.032	0.000	0.018	0.000	
C5	0.001	0.001	0.000	0.011	0.001	0.001	0.011	0.001	0.000	
C6	0.001	0.000	0.016	0.016	0.030	0.000	0.001	0.001	0.001	
C7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.089	0.089	
SN_i	0.026	0.025	0.022	0.128	0.036	0.118	0.208	0.181	0.253	0.253

Этап 6. Нормализация значений SP и SN для всех альтернатив в соответствии с формулами (17, 18).

Значения, полученные для NSP_i : 0.535; 0.728; 0.721; 0.396; 1.000; 0.464; 0.393; 0.028; 0.174.

Значения, полученные для NSN_i : 0.0896; 0.902; 0.914; 0.495; 0.856; 0.553; 0.176; 0.284; 0.000.

Этап 7. Расчёт бальной оценки (AS) для всех альтернатив по формуле (19). Значения рассчитанных оценок AS : A1 = 0.716; A2 = 0.815; A3 = 0.817; A4 = 0.446;

A5 = 0.928; A6 = 0.499; A7 = 0.284; A8 = 0.156; A9 = 0.097.

Этап 8. В результате ранжирования альтернатив в порядке уменьшения значения оценочного балла (AS) получается следующий приоритет альтернатив: A5 → A3 → A2 → A1 → A6 → A4 → A7 → A8 → A9. Таким образом, альтернатива A5, соответствующая погрузчику OKAVGV ОК-FDuX-JX-II, является лучшим решением.

5. Анализ чувствительности

Реализация представленной процедуры анализа альтернатив при наличии нескольких критериев позволяет по-новому подходить к принятию решений в различных областях. Многокритериальный выбор предполагает наличие набора доступных альтернатив и нескольких критериев. Каждый критерий выбора характеризуется определённым весом. Интуитивно понятно, что больший вес подразумевает большую значимость критерия. Анализ чувствительности результатов многокритериального выбора позволяет, с другой стороны, взглянуть на проблему принятия решений, вводя дополнительное условие критичности критериев. «Критичность» позволяет учитывать влияющее изменение значимости критериев на принимаемое решение. Другими словами, может оказаться, что критерии, характеризующиеся малым весом, могут оказаться кри-

тическими в определённых ситуациях, то есть стать решающими в процессе принятия решения. Таким образом, анализ чувствительности позволяет получить представление о ситуациях, которые до этого игнорировались, повысит эффективность процесса многокритериального выбора, и, в итоге, к принятию наилучшего решения. В этой статье применяются четыре метода анализа чувствительности: WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment – метод совокупной взвешенной суммы) [23]; SAW (Simple Additive Weighting – метод простого аддитивного взвешивания) [24]; MABAC (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison – метод сравнения мультикритериальных разграниченных областей) [25]; ARAS (Additive Ratio Assessment – метод оценки аддитивного отношения) [26]. Результат ранжирования альтернатив с использованием перечисленных методов представлен в табл. 9.

Таблица 9

Результаты ранжирования альтернатив с использованием различных методов оценки чувствительности

Альтернативы	Методы анализа чувствительности							
	WASPAS		SAW		MABAC		ARAS	
	Оценка	Ранг	Оценка	Ранг	Оценка	Ранг	Оценка	Ранг
A1	0.789	4	0.795	4	0.078	4	0.796	4
A2	0.819	3	0.825	3	0.134	3	0.829	3
A3	0.823	2	0.828	2	0.138	2	0.830	2
A4	0.641	7	0.671	7	0.017	6	0.639	7
A5	0.851	1	0.861	1	0.184	1	0.864	1
A6	0.694	5	0.734	5	0.070	5	0.702	5
A7	0.661	6	0.711	6	-0.008	7	0.677	6
A8	0.572	9	0.598	9	-0.162	9	0.576	9
A9	0.585	8	0.627	8	-0.125	8	0.603	8

На рис. 1 графически показаны ранги альтернатив по результатам расчётов каждым из четырёх используемых методов анализа чувствительности. Как видно из рисунка, лучшим вариантом является альтернатива A5, следом за ней в рейтинге следует альтернатива A3.

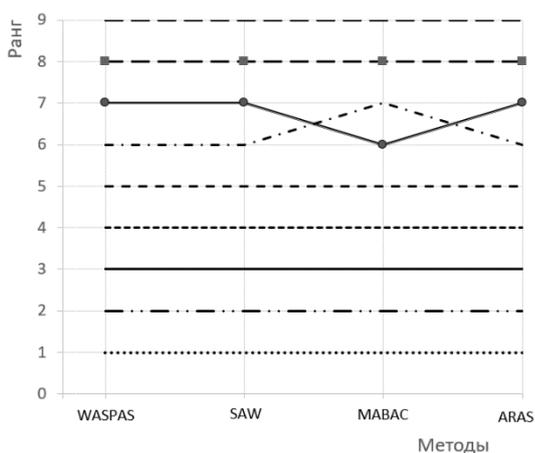


Рис. 1. Результаты анализа чувствительности гибридной FUCOM-EDAS модели

Из табл. 9 видно, что эти две альтернативы являются лучшими, поскольку они получили близкие по

значению оценки по всем четырём методам.

Остальные альтернативы имеют более низкие значения оценок и имеют меньший рейтинг. По результатам оценки всеми методами третья, четвёртая и пятая позиции заняты, соответственно, альтернативами A2, A1 и A6. Шестую позицию занимают альтернативы A7 по результатам оценки методами WASPAS, SAW и ARAS и A4 – методом MABAC. Седьмую позицию – A4 (WASPAS, SAW и ARAS) и A7 (MABAC). Восьмая позиция – A9 по всем методам. Последнюю девятую позицию занимает альтернатива A8.

6. Заключение

Складирование как сложная функциональная подсистема логистики предполагает наличие множества вариантов управленческих решений. Это особенно актуально для ряда стран Восточной и Юго-Восточной Европы, в частности, для Боснии и Герцеговины, поскольку, по сравнению с экономически развитыми западными странами, здесь наблюдается недостаточно широкое распространение современных технологий. В статье исследуется проблема повышения уровня автоматизации складов на основе выбора оптимальной модели оптимального автоматически управляемого транспортного средства – AGV. Использование AGV позволяет значительно повысить эффективность

складских работ, а, следовательно, и всей цепочки поставок, снизить себестоимость конечной продукции, в первую очередь, в результате затрат на электроэнергию.

Методы принятия многокритериальных решений широко применяются для решения различных задач, в том числе, для оптимизации работы транспортно-складских систем. Научная новизна настоящего исследования заключается в разработке гибридной модели FUCOM-EDAS принятия решения в условиях наличия множества критериев. Показана эффективность метода FUCOM для определения весовых коэффициентов критериев, заключающаяся в объективности и согласованности получаемых результатов. Ранжирование альтернатив (модели автоматически управляемых вилочных погрузчиков) осуществлялось с использованием метода EDAS.

Оценка чувствительности полученных результатов, выполненная четырьмя различными методами, показала адекватность представленного гибридного FUCOM-EDAS метода.

Список литературы

1. Fanisam M.B.N., Dewa B., Ayush M., Yogesh M., Harshal M. Material handling equipment // International Journal of Recent Scientific Research. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 24083–24085.
2. Kay M. G. Material Handling Equipment. Available at: https://people.engr.ncsu.edu/kay/Material_Handling_Equipment.pdf.
3. Park Y.-B. ICMSE: Intelligent consultant system for material handling equipment selection and evaluation // Journal of Manufacturing Systems. 1996, vol. 15, no. 5, pp. 325–333. doi: 10.1016/0278-6125(96)84195-1.
4. Onut S., Kara S. S., Mert S. Selecting the suitable material handling equipment in the presence of vagueness // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009, vol. 44, 7-8, pp. 818–828. doi: 10.1007/s00170-008-1897-3.
5. Kulak O. A decision support system for fuzzy multi-attribute selection of material handling equipments // Expert Systems with Applications. 2005, vol. 29, no. 2, pp. 310–319. doi: 10.1016/j.eswa.2005.04.004.
6. Fisher E. L., Farber J. B., Kay M. G. Mathes: An expert system for material handling equipment selection // Engineering Costs and Production Economics. 1988, vol. 14, no. 4, pp. 297–310. doi: 10.1016/0167-188X(88)90034-1.
7. Tuzkaya G., Gülsün B., Kahraman C., Özgen D. An integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application // Expert Systems with Applications. 2010, vol. 37, no. 4, pp. 2853–2863. doi: 10.1016/j.eswa.2009.09.004.
8. Chakraborty S., Banik D. Design of a material handling equipment selection model using analytic hierarchy process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006, vol. 28, 11-12, pp. 1237–1245. doi: 10.1007/s00170-004-2467-y.
9. Chan F.T.S. Design of material handling equipment selection system: an integration of expert system with analytic hierarchy process approach // Integrated Manufacturing Systems. 2002, vol. 13, no. 1, pp. 58–68. doi: 10.1108/09576060210411512.
10. Mirhosseini S. H. L., Webb P. A Hybrid Fuzzy Knowledge-Based Expert System and Genetic Algorithm for efficient selection and assignment of Material Handling Equipment // Expert Systems with Applications. 2009, vol. 36, no. 9, pp. 11875–11887. doi: 10.1016/j.eswa.2009.04.014.
11. Stević Ž., Pamučar D., Vasiljević M., Stojić G., Korica S. Novel Integrated Multi-Criteria Model for Supplier Selection: Case Study Construction Company // Symmetry. 2017, vol. 9, no. 11, p. 279. doi: 10.3390/sym9110279.
12. Vasiljević M., Fazlollahabadi H., Stević Ž., Vesković S. A rough multicriteria approach for evaluation of the supplier criteria in automotive industry // Decision Making: Applications in Management and Engineering. 2018, vol. 1, no. 1, pp. 82–96. doi: 10.31181/dmame.180182v.
13. Zavadskas E. K., Stević Ž., TANACKOV I., PRENTKOVSKIS O. A Novel Multicriteria Approach – Rough Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis Method (R-SWARA) and Its Application in Logistics // Studies in Informatics and Control. 2018, vol. 27, no. 1. doi: 10.24846/v27i1y201810.
14. Radović D., Stević Ž., Pamučar D., Zavadskas E., Badi I., Antuchevičiene J., Turskis Z. Measuring Performance in Transportation Companies in Developing Countries: A Novel Rough ARAS Model // Symmetry. 2018, vol. 10, no. 10, p. 434. doi: 10.3390/sym10100434.
15. Nunić Z. Evaluation and selection of the PVC carpentry manufacturer using the FUCOM-MABAC model // Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications. 2019, vol. 1, no. 1, pp. 13–28. doi: 10.31181/oresta19012010113n.
16. Stanujkić D., Karabašević D. An extension of the WASPAS method for decision-making problems with intuitionistic fuzzy numbers: a case of website evaluation // Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications. 2019, vol. 1, no. 1, pp. 29–39. doi: 10.31181/oresta19012010129s.
17. Pamučar D., Stević Ž., Sremac S. A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM) // Symmetry. 2018, vol. 10, no. 9, p. 393. doi: 10.3390/sym10090393.
18. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method // Omega. 2015, vol. 53, pp. 49–57. doi: 10.1016/j.omega.2014.11.009.
19. Saaty T. L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. New York, London: McGraw-Hill International Book Co. 1980.
20. Keshavarz Ghorabae M., Zavadskas E. K., Olfat L. Multi-Criteria Inventory Classification Using a New Method of Evaluation Based on Distance from Average Solution (EDAS) // Informatica. 2015, vol. 26, no. 3, pp. 435–451. doi: 10.15388/Informatica.2015.57.
21. Galović J. Sustavi automatski vodenih vozila: Završni Rad [Automatic Guided Vehicles: Undergraduate thesis]. Zagreb: University of Zagreb. 2015. 80 p.
22. Gudelj A., Krčum M., Coric M. Modelling and multiobjective optimization for automated guided vehicles at container terminals // 35th Conference on Transportation Systems with International Participation Automation in transportation. 2015, Zagreb: KoREMA.
23. Zavadskas E. K., Turskis Z., Antuchevičiene J. Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment // Electronics and Electrical Engineering. 2012, vol. 122, no. 6. doi: 10.5755/J01.EEE.122.6.1810.
24. MacCrimmon K.R. Decision making among multiple-attribute alternatives: a survey and consolidated approach. Santa Monica, California: The RAND Corporation. 1968. 63 p.
25. Pamučar D., Čirović G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC) // Expert Systems with Applications. 2015, vol. 42, no. 6, pp. 3016–3028. doi: 10.1016/j.eswa.2014.11.057.
26. Zavadskas E. K., Turskis Z. A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making // Technological and Economic Development of Economy. 2010, vol. 16, no. 2, pp. 159–172. doi: 10.3846/tede.2010.10.

Материал поступил в редакцию 19.12.2018

Стойич М., Стевич Ж., Николич А., Божичкович З. Многокритериальная модель оценки и выбора автоматически управляемых транспортных средств (AGV) для складов // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2019. Т.9. №1. С. 4-20