



Мультикритериальное сравнение контрейлерных систем



Никита ОСИНЦЕВ



Александр ЦЫГАНОВ



Александр РАХМАНГУЛОВ



Вера БАГИНОВА

**Никита Анатольевич Осинцев¹, Александр Владимирович Цыганов², Александр Нельевич Рахмангулов³,
Вера Владимировна Багинова⁴**

^{1, 2, 3}Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.

⁴Российский университет транспорта, Москва, Россия.

¹ORCID 0000-0003-1168-6725; Web of Science Researcher ID: K-6237-2013; Scopus Author ID: 56386223400;
РИНЦ SPIN-код: 9791-1889; РИНЦ Author ID: 401461.

²ORCID 0000-0002-8857-6287; Web of Science Researcher ID: AAH-9785-2019; Scopus Author ID: 57209470019;
РИНЦ SPIN-код: 5281-7511; РИНЦ Author ID: 677084.

³ORCID 0000-0002-6419-2561; Scopus Author ID: 13805427400; РИНЦ Author ID: 101054.

⁴ORCID 0000-0002-6289-1078; РИНЦ SPIN-код: 1255-6600; РИНЦ Author ID: 266200.

✉ ran@magtu.ru.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты анализа и сравнения наиболее распространенных в настоящее время контрейлерных систем, находящихся на стадиях как коммерческого использования, так разработки и тестирования. Сравнение выполнено с целью определения контрейлерной системы, отвечающей требованиям концепции устойчивого развития и обеспечивающей эффективное функционирование цепей поставок.

Авторами впервые предложена методика многокритериальной оценки (MCDM) контрейлерных систем, учитывающая требования основных стейкхолдеров цепи поставок: грузовладельцев, перевозчиков и владельцев инфраструктуры. Анализ сформированной многокритериальной модели оценки контрейлерных систем выполнен с использованием методологического аппарата DEMATEL и MARCOS. Пред-

ставлен расчетный пример ранжирования контрейлерных систем исходя из интересов стейкхолдеров цепей поставок. Выполнена проверка корректности полученных результатов другими MCDM-методами: TOPSIS, EDAS, MABAC и WASPAS. Проведены результаты оценки чувствительности результатов ранжирования контрейлерных систем при различных сценариях. Наивысшие оценки получили контрейлерные системы Flexiwaggon, Megawing и Rolling Road.

Предлагаемая методика рекомендуется для выработки рационально обоснованных управленческих решений, направленных на согласование технических и технологических параметров контрейлерных систем, а также унификацию интермодальных транспортных единиц для формирования устойчивых цепей поставок.

Ключевые слова: транспорт, устойчивое развитие, цепь поставок, мультимодальная перевозка, комбинированная перевозка, интермодальная перевозка, контрейлерная система, MCDM, DEMATEL, MARCOS.

Финансовая поддержка: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–21–00164, <https://rscf.ru/project/23-11-00164/>.

Для цитирования: Осинцев Н. А., Цыганов А. В., Рахмангулов А. Н., Багинова В. В. Мультикритериальное сравнение контрейлерных систем // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 119–130. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-14>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.

The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Создание условий для реализации концепции устойчивого развития и принципов ESG становится все более важной задачей для всех отраслей экономики. Мировым сообществом признается необходимость наличия баланса между экономической эффективностью, интересами социума и защитой окружающей среды. Особо актуальны проблемы устойчивого развития для транспорта, являющегося связующим звеном экономики и одним из основных загрязнителей окружающей среды [1; 2]. Формирование «экологически чистых» транспортных систем в настоящее время идет по пути развития мультимодальных систем доставки грузов, в том числе использующих интермодальные технологии.

Разновидностью интермодальной технологии является контрейлерная технология, основанная на взаимодействии железнодорожного и автомобильного видов транспорта. Конкуренция конструкторских и технологических решений в транспортной отрасли способствовала появлению различных вариантов реализации контрейлерной технологии, имеющих существенные различия в инженерных решениях. В настоящее время эти варианты развиваются как самостоятельные контрейлерные системы.

Разнообразие применяемых технических и технологических решений, отсутствие стандартов, территориальная обособленность конкретных контрейлерных систем в мире, низкая степень их использования в цепях поставок – это те факты, анализ которых позволяет утверждать, что эта интермодальная технология до сих пор находится на этапе формирования [3].

В результате увеличения числа участников и разнообразия технико-технологических параметров контрейлерных систем усложняется конфигурация сетевой структуры цепей поставок. Решая данную задачу, перевозчики, экспедиторы или логисты должны учитывать технические и технологические требования и ограничения разных контрейлерных систем для удовлетворения требований грузовладельцев по своевременной, сохранной и экологичной перевозке грузов.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работах, исследующих условия внедрения интермодальных технологий в цепях поставок, выделяются следующие основные проблемы: сложность координации и взаимодействия различных участников интермодальных перевозок [4]; отсутствие общих стандартов применительно к параметрам терминалов, интермодальных транспортных единиц (ИТЕ) и информационных систем [5]; многообразие контрейлерных систем и наличие множества параметров и показателей их оценки и выбора [6; 7]; сложность выбора технологий обслуживания ИТЕ на терминалах [8; 9]; отличия в подходах к организации перевозки контрейлеров железнодорожным транспортом, разработки и согласовании расписания [10]; различия в определении рационального расстояния перевозки [11]; отсутствие комплексного подхода к организации взаимодействия железнодорожного и автомобильного видов транспорта [12]; необходимость учета специфики использования ин-

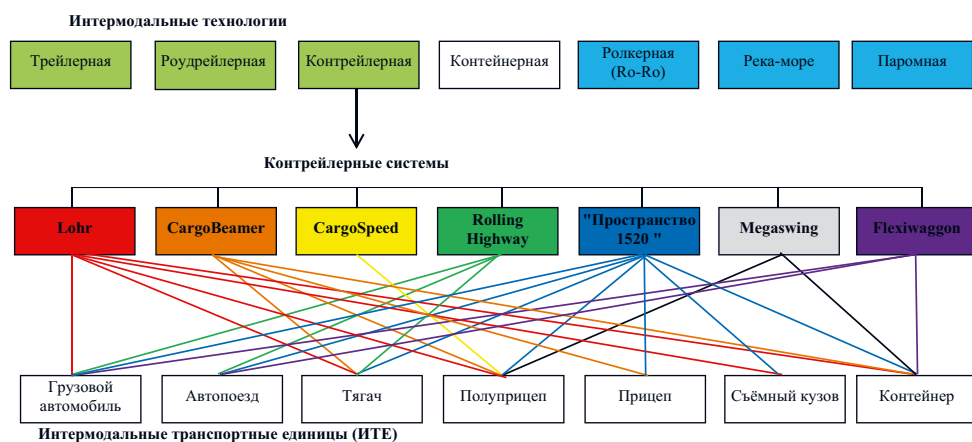


Рис. 1. Совокупность интермодальных технологий, контрейлерных систем и интермодальных транспортных единиц [выполнено авторами; [3]].

Таблица 1

Группировка и краткая характеристика контрейлерных систем
[составлено авторами]

Название системы / происхождение	Группа систем	Конструктивные особенности железнодорожного вагона	Вид вагона и терминала
Lohr Компания Lohr Group (Франция)	1 – Системы, представленные специализированными терминалами, основанными на модульном принципе создания терминальной инфраструктуры, использующие конструктивно сложный специализированный железнодорожный подвижной состав	Вагон с двумя платформами (карманами). Горизонтальная погрузка и выгрузка ИТЕ основана на повороте платформ вагона относительно продольной оси пути. Система допускает вертикальную перегрузку ИТЕ	
CargoBeamer Компания CargoBeamer AG (Германия)		Вагон со съёмным поддоном, выдвигающимся параллельно рельсового пути при горизонтальном методе перегрузки ИТЕ. Вертикальная перегрузка поддона обеспечивается наличием конструктивных захватов в корпусе поддона	
CargoSpeed Международный консорциум в составе BLG Consult GmbH (Германия), University of Newcastle (Великобритания), Newrail (Великобритания), The Warbreck Engineering and Dry Dock Company Ltd (Великобритания)		Вагон имеет съёмный пол (площадку), а также опускающиеся пандусы, обеспечивающие въезд и выезд автопоезда на пол вагона. Горизонтальная погрузка и выгрузка ИТЕ основана на поднятии до уровня земли и повороте площадки вагона относительно продольной оси пути стационарным подъемно-поворотным оборудованием, расположенным по оси рельсового пути	
Rolling Road (Rolling Highway, Rolling Motorway, Rollende Landstrasse) (Швеция)	2 – Системы, располагаемые на железнодорожных станциях с отдельными грузовыми фронтами для операций с контрейлерами. В таких системах используются наименее сложные по конструкции железнодорожные вагоны (контрейлерные платформы)	Вагон представлен платформой с пониженным уровнем пола. Погрузочная высота вагона обеспечивается применением двух тележек с колесными парами малого диаметра. Вагон оборудуется торцевыми переездными площадками, обеспечивающими прохождение автомобилей транспортных средств между сцепленными платформами при выполнении погрузочно-разгрузочных работ	
«Пространство 1520» Находится в стадии разработки при участии компании ОАО «РЖД» (Россия)		Вагон-платформа, с опускающимися переездными площадками для движения автотранспортных средств вдоль состава. Погрузка ИТЕ в вагоны осуществляется путем их въезда со стороны одного из продольных бортов вагона	
Megaswing Компания Kockums Industrier AB (Швеция)	3 – Системы, не требующие создания терминальной инфраструктуры и использующие узкоспециализированные высокотехнологичные железнодорожные вагоны	Вагон с двумя платформами (грузовыми секциями), оснащенный механизмом их самостоятельного перемещения. Горизонтальная погрузка и выгрузка ИТЕ основана на повороте платформ вагона относительно продольной оси пути и их опускании до уровня пола. Направление поворота платформ обеспечивает возможность въезда и выезда автотранспортных средств с обеих сторон пути	
Flexiwaggon Компания Flexiwaggon AB (Швеция)		Вагон, оснащён механизированными пандусами, расположенными с торцовых сторон. Пандусы обеспечивают въезд и выезд автотранспортных средств передним ходом. Вагон имеет автономное электроснабжение аккумуляторными батареями. Зарядка батарей осуществляется валовыми генераторами, вырабатывающими энергию в процессе движения поезда	



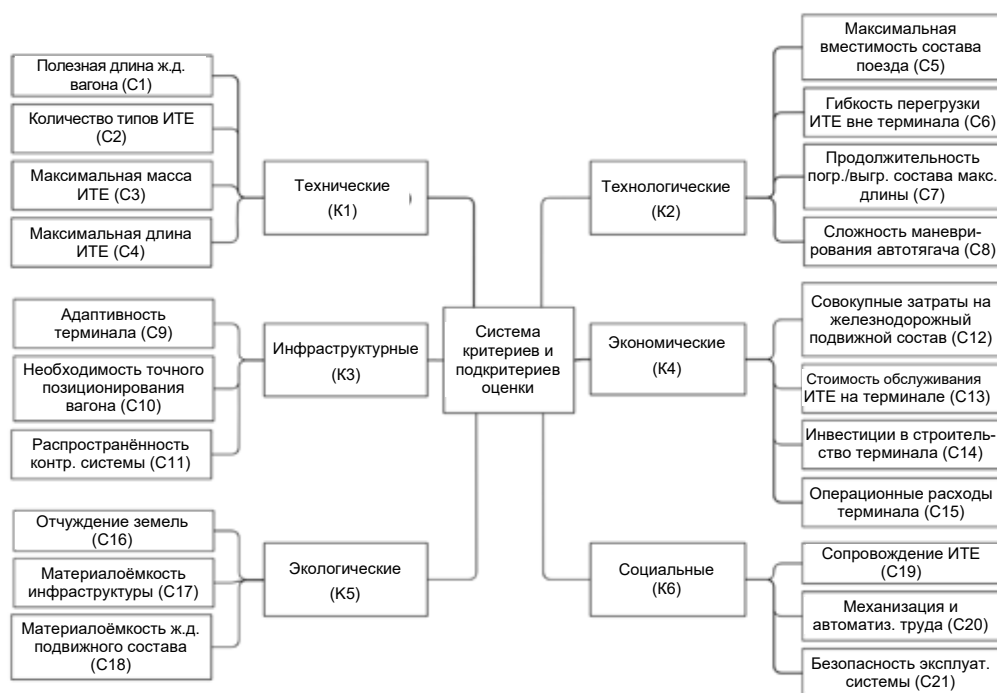


Рис. 2. Критерии и подкритерии устойчивости контроллерной системы [выполнено авторами].

термодальных технологий в континентальном и морском сообщениях [13].

Сложность решения перечисленных проблем ограничивает использование интермодальных технологий в цепях поставок, а также создает потребность в мониторинге и принятии управленческих решений с учетом множества факторов, оказывающих влияние на эффективность их применения. Варианты интермодальных технологий, применяемые на различных видах транспорта, действующие и разрабатываемые контроллерные системы, а также используемые в них интермодальные транспортные единицы представлены на рис. 1 [3].

Для решения перечисленных проблем широко используют различные научные методы, в частности математические модели и методы [14], в том числе многокритериальные методы принятия решений (Multi-Criteria Decision Making – MCDM) [3]. Выбор MCDM-методов обусловлен многообразием характеристик и свойств контроллерных систем, их элементов, а также необходимостью учета множества параметров и показателей их функционирования [15]. Методы данной группы также применяются для количественной оценки компромиссов между экономическими, социальными и экологическими кри-

териями устойчивого развития цепей поставок [16].

Целью настоящего исследования является разработка методики многокритериального выбора контроллерной системы, обеспечивающей формирование и функционирование устойчивых цепей поставок. Методика основана на систематизации параметров всех известных контроллерных систем: Lohr, CargoBeamer, CargoSpeed, Rolling Road, «Пространство 1520», Megaswing и Flexiwagon. Анализ параметров контроллерных систем позволил выделить три группы таких систем (табл. 1), а также сформировать универсальную систему критериев устойчивости контроллерной системы в цепях поставок (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика оценки контроллерных систем

На первом этапе разрабатывается многокритериальная модель (MCDM-модель) оценки контроллерных систем. Элементами MCDM-модели являются альтернативы – контроллерные системы, а также атрибуты – критерии и подкритерии оценки контроллерных систем. В данной работе использованы следующие обозначения альтернатив: Lohr (A1), CargoBeamer (A2), CargoSpeed (A3), Rolling

Road (A4), «Пространство 1520» (A5), Megaswing (A6) и Flexiwaggon (A7). В качестве атрибутов в MCDM-модели используется разработанная авторами система критериев и подкритериев устойчивости контрейлерной системы в цепях поставок [17] (см. рис. 2).

На втором этапе реализации методики рассчитывается вес атрибутов MCDM-модели с использованием метода «Лаборатория оценки и испытаний принятия решений» (DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory), обозначаемый аббревиатурой DEMATEL [18]. Выбор метода DEMATEL [19] обоснован возможностью установления взаимозависимости между критериями и подкритериями контрейлерной системы и разработки карты сетевых отношений, отражающей взаимовлияние критериев и причинно-следственные связи между ними. Итоговым результатом применения метода DEMATEL является определение веса атрибутов контрейлерных систем.

Основными шагами реализации метода DEMATEL являются [3] следующие.

1. Построение начальной матрицы прямых связей атрибутов контрейлерных систем и попарная оценка влияния атрибутов, выполняемая на основе анализа мнений экспертов-стейкхолдеров.

2. Нормализация матрицы прямых связей атрибутов контрейлерных систем.

3. Формирование общей матрицы связей между атрибутами контрейлерных систем.

4. Расчет числа взаимосвязей и сил влияния между атрибутами контрейлерных систем. Выполнение данного шага необходимо для установления причинно-следственных связей в системе критериев и подкритериев контрейлерных систем. Каждый атрибут может быть отнесен либо к группе «Причина» (т. е. влияет на другие атрибуты), либо к группе «Следствие» (т. е. находится под влиянием других атрибутов).

5. Построение причинно-следственной диаграммы (карты сетевых отношений). Она показывает структурную взаимосвязь между рассматриваемыми атрибутами и корреляцию между ними.

6. Расчет веса каждого атрибута контрейлерной системы.

На третьем этапе реализации методики выполняется ранжирование контрейлерных систем методом «Оценка альтернатив и ран-

жирование в соответствии с компромиссным решением» (Measurement of Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution, далее MARCOS) [20]. Основу данного метода составляет определение отношения между альтернативами и эталонными значениями («идеальные» и «антиидеальные» альтернативы). Лучшей альтернативой считается та, которая ближе всего к идеалу и одновременно дальше от антиидеальной альтернативы.

Основными шагами метода MARCOS являются [3] следующие.

1. Формирование исходной матрицы оценки альтернатив, состоящей из значений оценки каждой альтернативы по всем атрибутам.

2. Построение расширенной исходной матрицы и определение идеальной и антиидеальной альтернатив.

3. Нормализация исходной матрицы решения.

4. Формирование взвешенной матрицы. Весовые значения атрибутов принимаются на основе результата расчетов методом DEMATEL.

5. Вычисление степени полезности альтернатив и определение функции полезности альтернатив. Значение функции полезности показывает, насколько каждая альтернатива близка к идеальной и далека от антиидеальной альтернативы.

6. Ранжирование альтернатив. Наилучшей альтернативой считается альтернатива с максимальным значением функции полезности.

Общая схема использования комбинированного метода DEMATEL–MARCOS для комплексной характеристики и оценки контрейлерных систем в устойчивых цепях поставок представлена на рис. 3.

Результаты оценки контрейлерных систем

Оценка и ранжирование контрейлерных систем для обеспечения устойчивого развития цепей поставок выполнена с использованием MCDM-модели, представленной семью альтернативами (A1–A7), характеризующимися шестью группами критериев (K1–K6), включающими 21 подкритерий (C1–C21) (рис. 2). Анализ данной модели выполнен следующими группами экспертов: грузовладельцы, провайдеры логистических услуг, владельцы инфраструктуры и академические эксперты [3].





Рис. 3. Этапы методики оценки контроллерных систем комбинированным способом DEMATEL–MARCOS [выполнено авторами].

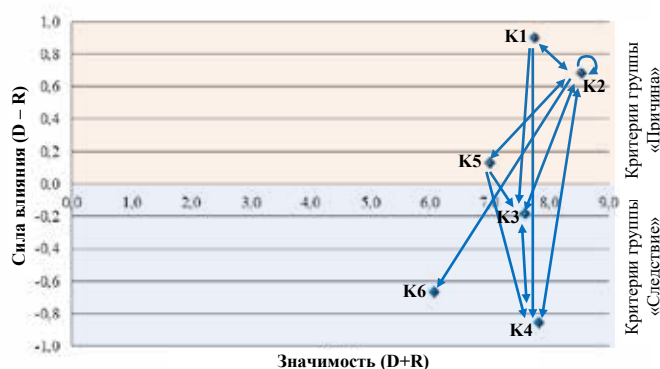


Рис. 4. Карта сетевых отношений критериев контроллерных систем (оценка академическими экспертами).

С использованием метода DEMATEL построены карты сетевых отношений критериев и подкритериев оценки контроллерных систем и рассчитаны их весовые коэффициенты. В качестве примера на рис. 4–7 показана карта сетевых отношений, построенная по результатам оценок академических экспертов. В светлой зоне на карте показаны критерии, составляющие группу «Причина». Наиболее сильное влияние на все критерии оказывают технические критерии (K1). Инфраструктурные критерии (K2) характеризуются наибольшим числом связей, что указывает на их наибольшую значимость в данной системе критериев.

Итоговые весовые коэффициенты критериев и подкритериев оценки контроллерных систем, полученные по результатам оценки различных групп экспертов-стейкхолдеров, представлены в табл. 2 и 3.

Результаты ранжирования критериев свидетельствуют о различиях в оценке их значимости разными группами стейкхолдеров (табл. 2). Наивысшие ранги получили подкритерии инфраструктурных и экологических групп критериев. Среднее значение рангов подкритериев данных групп составило 2,6 и 6,5 соответственно. Вторыми по значимости для экспертов стали критерии технологических, экономических и социальных групп. Усредненное значение рангов подкритериев данных групп составило 12,6. Наименьшую значимость получили подкритерии технической группы (средний ранг 16,2).

Таким образом, эксперты сходятся во мнении, что главным условием включения контроллерной технологии в цепь поставок выступает наличие распространенной сети контроллерных терминалов с возможностью ее адаптации под потребности клиентов.

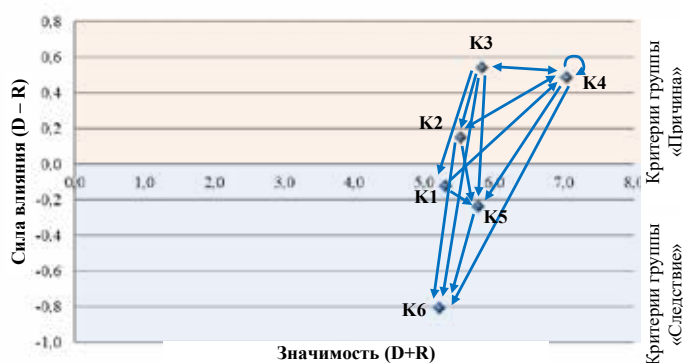


Рис. 5. Карта сетевых отношений критериев контейнерных систем (оценка грузовладельцами).

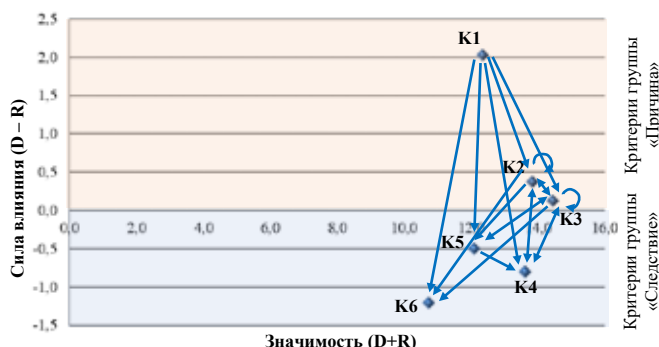


Рис. 6. Карта сетевых отношений критериев контейнерных систем (оценка владельцами инфраструктуры).

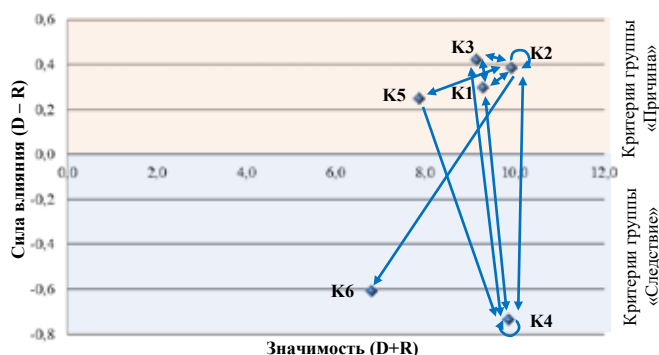


Рис. 7. Карта сетевых отношений критериев контейнерных систем (оценка перевозчиками).

Стейкхолдеры также высоко оценивают позитивное влияние технологии на уменьшение экологического влияния транспорта. Интересным является выставленная низкая оценка влияния критериев, характеризующих контейнерные системы через технические параметры. Это, в определенной степени, противоречит заявленному в начале статьи тезису о наличии проблемы учета требования конкретной системы к параметрам ИТЕ и может быть объяснено использованием поставщиками и провайдерами ограниченного числа типов ИТЕ, а также исключением

схем перевозок, задействующих различные контейнерные системы в разных регионах (странах).

В отношении важности критериев и подкритериев для стейкхолдеров наблюдается следующая тенденция. Грузовладельцев слабо интересуют технико-технологические характеристики контейнерных систем, поскольку они не вовлечены в процесс организации перевозок. При этом для них важными являются величина транспортных затрат на перевозку, а также необходимость сопровождения грузов. Провайдеры логистических



Таблица 2

Значения веса критериев оценки контрейлерных систем методом DEMATEL
[составлено авторами]

Критерии	Академические эксперты	Грузовладельцы	Провайдеры	Владельцы инфраструктуры
Технические (K1)	0,1737	0,1525	0,1754	0,1618
Технологические (K2)	0,1905	0,1587	0,1875	0,1787
Инфраструктурные (K3)	0,1689	0,1684	0,1728	0,1869
Экономические (K4)	0,1752	0,2027	0,1867	0,1764
Экологические (K5)	0,1558	0,1661	0,1487	0,1565
Социальные (K6)	0,1359	0,1517	0,1289	0,1398

Таблица 3

Значения веса подкритериев оценки контрейлерных систем методом DEMATEL
[составлено авторами]

Подкритерии	Академические эксперты	Грузовладельцы	Провайдеры	Владельцы инфраструктуры
Полезная длина вагона (C1)	0,0445	0,0390	0,0470	0,0396
Количество типов ИТЕ (C2)	0,0375	0,0368	0,0352	0,0347
Максимальная масса ИТЕ (C3)	0,0425	0,0384	0,0443	0,0414
Максимальная длина ИТЕ (C4)	0,0491	0,0382	0,0490	0,0460
Максимальная вместимость состава поезда (в полуприцепах) (C5)	0,0477	0,0385	0,0473	0,0472
Гибкость выполнения перегрузки ИТЕ вне терминала (C6)	0,0466	0,0385	0,0438	0,0418
Продолжительность погрузки/выгрузки состава максимальной длины (C7)	0,0502	0,0431	0,0516	0,0487
Сложность маневрирования автотягача (C8)	0,0460	0,0386	0,0448	0,0410
Адаптивность терминала (C9)	0,0619	0,0571	0,0572	0,0635
Необходимость точного позиционирования вагона (C10)	0,0526	0,0526	0,0580	0,0617
Распространенность контрейлерной системы (C11)	0,0544	0,0587	0,0576	0,0617
Совокупные затраты на железнодорожный подвижной состав (C12)	0,0344	0,0465	0,0464	0,0389
Стоимость обслуживания ИТЕ на терминале (C13)	0,0483	0,0538	0,0529	0,0468
Инвестиции в строительство инфраструктуры терминала (C14)	0,0459	0,0477	0,0427	0,0457
Операционные расходы терминала (C15)	0,0466	0,0547	0,0448	0,0449
Отчуждение земель (C16)	0,0521	0,0561	0,0444	0,0546
Материалоемкость инфраструктуры (C17)	0,0543	0,0561	0,0545	0,0578
Материалоемкость железнодорожного подвижного состава (C18)	0,0494	0,0538	0,0498	0,0442
Сопровождение ИТЕ (C19)	0,0398	0,0554	0,0416	0,0395
Механизация и автоматизация труда (C20)	0,0477	0,0466	0,0425	0,0501
Безопасность эксплуатации контрейлерной системы (C21)	0,0485	0,0497	0,0448	0,0502

услуг, выступающие активными организаторами перевозок, наоборот уделяют большее внимание критериям, характеризующим системы с технологической, инфраструктурной и экологической позиций. Это объясня-

ется наличием у них интереса к выбору варианта доставки, обеспечивающему высокое качество перевозки при меньших собственных операционных расходах на перевозку, а также желанием сотрудничать с компания-

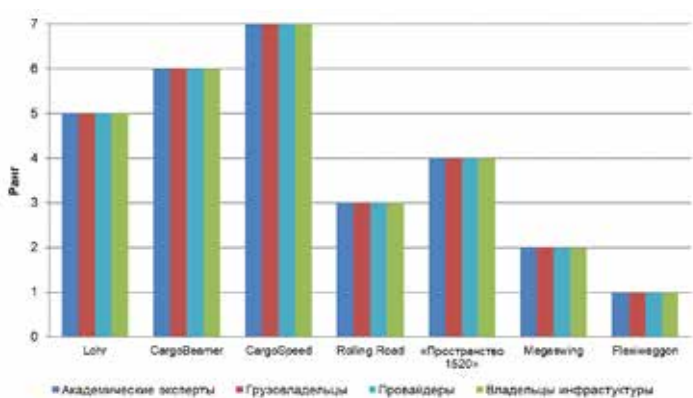


Рис. 8. Ранжирование контейнерных систем методом MARCOS [выполнено авторами].

ми, которые уделяют внимание «зеленым» технологиям. Владельцы транспортной инфраструктуры наибольшее значение уделяют технологическим и инфраструктурным параметрам, поскольку рассматривают контейнерную технологию как бизнес-проект, требующий значительных, но быстро окупаемых инвестиций. Эта группа стейкхолдеров дает низкую оценку значимости совокупных затрат на железнодорожный подвижной состав, предполагая, что эти затраты несут операторы собственных вагонов. Мнение академических экспертов в целом согласуется с мнением провайдеров логистических услуг и владельцев транспортной инфраструктуры.

Ранжирование контейнерных систем выполнено методом MARCOS с использованием полученных значений веса подкритериев и их количественных и качественных значений [3]. Результаты ранжирования представлены на рис. 8.

Несмотря на определенные расхождения мнений экспертов о важности критериев и подкритериев, сравнение контейнерных систем показало согласованность мнений экспертов. Все специалисты на первое место ставят систему Flexiwaggon, на второе – систему Megaswing, а на третье – систему CargoSpeed. Таким образом, по совокупности характеристик, наиболее приоритетными контейнерными системами для обеспечения устойчивого развития цепей поставок являются системы третьей группы (табл. 1), не требующие создания сложной терминальной инфраструктуры, использующие высокотехнологичный железнодорожный подвижной состав, который обеспечивает мобильность погрузки/выгрузки ИТЕ. Системы второй группы: Rolling Road и отечественная «Про-

странство 1520» вызывают менее выраженный интерес к их использованию в цепях поставок. Это доказывается тем, что эти системы получили высокие оценки по подкритериям, которые не являются значимыми («Количество типов ИТЕ» и «Стоимость вагона и затраты на его эксплуатацию»), и, наоборот, низкие оценки по значимым подкритериям («Адаптивность терминала» и «Распространенность контейнерной системы»). Наименьший ранг получили системы первой группы, требующие наибольших капиталовложений в формирование сети интермодальных терминалов и парка специализированного железнодорожного подвижного состава.

Для проверки корректности результатов, полученных методом MARCOS, мультикритериальное сравнение контейнерных систем было выполнено другими MCDM-методами: TOPSIS – Метод расстановки приоритетов по сходству с идеальным решением (Technique for the Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [21], EDAS – Метод оценки отклонения от среднего решения (The Evaluation based on Distance from Average Solution) [22], MABAC – Метод сравнения многокритериальных разграниченных областей (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) [23] и WASPAS – Метод совокупной взвешенной суммы (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) [24]. На рис. 9 приведены результаты сравнения расчетов с использованием различных методов. Первые три ранга сохраняются у систем Flexiwaggon, Megaswing и Rolling Road соответственно. Система «Пространство 1520» преимущественно получает четвертое место. Исключением являются результаты обработки мнений экспертов «Владельцы инфраструктуры»



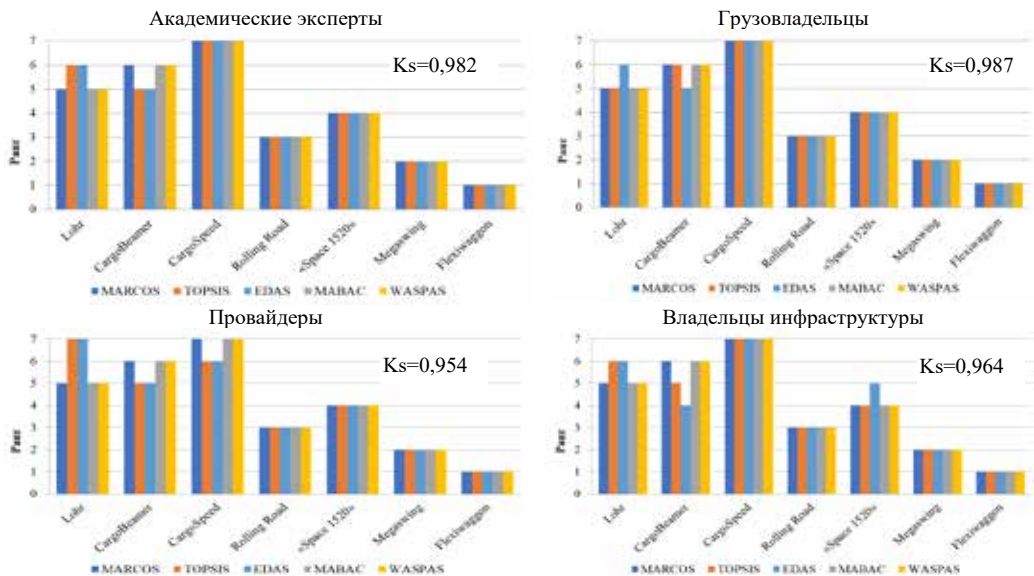


Рис. 9. Ранжирование контроллерных систем методами MCDM [выполнено авторами].

методом EDAS, в соответствии с которыми данная система занимает пятое место.

Применение дополнительных методов MCDM и получение сходимости результатов свидетельствует о высокой корреляции полученных рангов. Использованный для данной оценки коэффициент ранговой корреляции Спирмена составил $K_s=0,954-0,987$ (см. рис. 9).

Выполнена оценка чувствительности результатов ранжирования контроллерных

систем. В основе оценки чувствительности используется анализ влияния изменения веса подкритериев на ранг определенной контроллерной системы. Описание рассмотренных сценариев и результаты устойчивости ранжирования контроллерных систем приведены в табл. 4 и рис. 10.

Результаты оценки чувствительности ранжирования контроллерных систем показывают, что во всех сценариях устойчивость

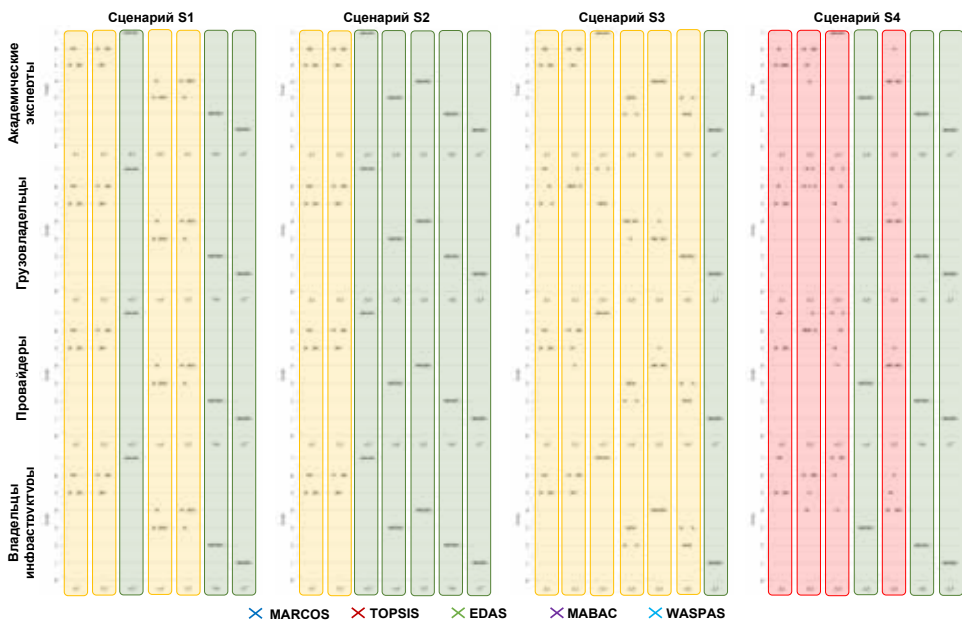


Рис. 10. Результаты оценки устойчивости ранжирования контроллерных систем [рассчитаны авторами].

Описание сценариев оценки устойчивости результатов ранжирования
контрейлерных систем [составлено авторами]

Сценарий	Описание сценария	Результаты ранжирования
S1	Вес всех подкритериев одинаковый и равен среднеарифметическому значению 0,0476	Ранги альтернатив А3, А6 и А7 устойчивы у всех экспертов по всем MCDM методам (зеленая область на рис. 10). Альтернативы А1, А2, А4 и А5 имеют незначительные изменения по 3, 4, 5 и 6 рангам среди MCDM методов (желтая область на рис. 10)
S2	Вес каждого подкритерия принят равным среднеарифметическому значению оценки по всем четырем группам экспертов (например, С1=0,0425)	Ранги альтернатив А3, А4, А5, А6 и А7 устойчивы у всех экспертов по всем MCDM методам. Альтернативы А1 и А2 имеют незначительные изменения по 5 и 6 рангам.
S3	Исключение критерия с наибольшим весом и изменение веса оставшихся подкритериев пропорционально значению данного подкритерия. Для группы академических экспертов был исключен С9=0,0619, для грузовладельцев С11=0,0587, перевозчиков С10=0,058 и владельцев инфраструктуры С9=0,0635	Альтернатива А7 (ранг 1) устойчива у всех экспертов по всем MCDM методам. У альтернативы А3 ранг 7 устойчив у всех экспертов, кроме грузовладельцев. Альтернативы А1, А2, А4, А5 и А6 имеют незначительные изменения, как по рангу, так и по MCDM методам.
S4	Исключение подкритерия с наименьшим весом и изменение веса оставшихся подкритериев пропорционально значению данного подкритерия. Для группы академических экспертов был исключен С12=0,0344, для грузовладельцев С2=0,0368, перевозчиков С2=0,0352 и владельцев инфраструктуры С2=0,0347	Ранги альтернатив А4, А6 и А7 устойчивы у всех экспертов по всем MCDM методам. Альтернативы А1, А2, А3 и А5 имеют незначительные изменения по рангам, так и по MCDM методам (розовая область на рис. 10).

сохраняет альтернатива А7 (ранг № 1), представленная системой Flexiwaggon. Альтернатива А6 (система Megaswing – ранг № 2) является устойчивой в сценариях S1, S2 и S4 для всех групп экспертов. Незначительные изменения устойчивости результатов оценки наблюдаются по остальным альтернативам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффект от использования контрейлерной технологии для обеспечения устойчивого развития цепей поставок не постоянен и зависит от характеристик конкретной контрейлерной системы. Разнообразие технико-технологических решений контрейлерных систем также ограничивает их совместное использование при формировании сетевой структуры глобальных цепей поставок и транспортных коридоров.

Наиболее приоритетными в использовании в цепях поставок являются системы, обладающие высокой мобильностью обслуживания ИТЕ и не требующие существенных капиталовложений в создание терминальной инфраструктуры. В первую очередь это достигается в результате применения высоко-технологичного железнодорожного подвиж-

ного состава, способного обеспечивать горизонтальную погрузку и выгрузку ИТЕ без вспомогательных устройств и механизмов. Данные условия выполняются шведскими контрейлерными системам Flexiwaggon и Megaswing. Вторым приоритетным направлением является использование контрейлерных систем, базирующихся на уже функционирующих инфраструктурных объектах – железнодорожных станциях и терминалах, что обуславливает применение более простых по конструкции вагонов. Это позволяет сократить размер инвестиций в создание сети интермодальных терминалов и формирование парка специализированного железнодорожного подвижного состава. Такими системами являются Rolling Road и «Пространство 1520».

Дальнейшими направлениями данного исследования являются выделение и анализ целей, интересов и стратегий поведения стейкхолдеров контрейлерной технологии для определения системы их взаимодействия, а также разработка концептуальной модели функционирования контрейлерной технологии в цепях поставок, отвечающих целям устойчивого развития.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhao, Xianbo; Ke, Yongjian; Zuo, Jian; Xiong, Wei; Wu, Peng. Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 256, 120404. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120404.
2. Aloui, A., Hamani, N., Derrouiche, R., Delahoche, L. Systematic literature review on collaborative sustainable transportation: Overview, analysis and perspectives. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2021, Vol. 9, 100291. DOI: 10.1016/j.trip.2020.100291.
3. Osintsev, N., Tsyganov, A., Rakhmangulov, A., Sladkowski, A. Multi-criteria Assessment of Piggyback Systems in Sustainable Supply Chains. In: Sladkowski, A. (eds) *Modern Trends and Research in Intermodal Transportation. Studies in Systems, Decision and Control*, Vol 400. Springer, Cham, 2022, pp. 451–559. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-87120-8_10 [ограниченный доступ].
4. Lehtinen, J., Bask, A. H. Analysis of business models for potential 3Mode transport corridor. *Journal of Transport Geography*, 2012, Vol. 22, pp. 96–108. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.12.001.
5. Gharehgozli, A., Vries, H. de, Decrauw, S. The role of standardisation in European intermodal transportation. *Maritime Business Review*, 2019, Vol. 4 (2), pp. 151–168. DOI: 10.1108/MABR-09-2018-0038.
6. Tsyganov, A. V., Osintsev, N. A. Systematization of rolling-stock parameters in piggyback systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 709, 33010. DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033010.
7. Rui Wang, Kai Yang, Lixing Yang, Ziyao Gao. Modeling and optimization of a road–rail intermodal transport system under uncertain information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, Vol. 72, pp. 423–436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.04.022>.
8. Krstić, M., Tadić, S., Elia, V., Massari, S., Farooq, M. U. Intermodal Terminal Subsystem Technology Selection Using Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*, 2023, Vol. 15 (4), 3427. DOI: 10.3390/su15043427.
9. Cong Li, Guang Yang, Xianan Sun. Transshipment Equipments for Road-Rail Intermodal Transport. *Advanced Materials Research*, 2015, Vol. 1065–1069, pp. 3377–3380. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.3377.
10. Xinghan Chen, Tianshuai Zuo, Maoxiang Lang, Shiqi Li, Siyu Li. Integrated optimization of transfer station selection and train timetables for road-rail intermodal transport network. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, Vol. 165, 107929. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107929.
11. El Yaagoubi, A., Ferjani, A., Essaghir, Y., Sheikhamadi, F., Abourraja, M. N., Boukachour, J., Baron, M.-L., Duvallet, C., Khodadad-Saryzadi, A. A logistic model for a french intermodal rail/road freight transportation system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, Vol. 164, 102819. DOI: 10.1016/j.tr.2022.102819.
12. Федорина А. В., Цыганов А. В. Комплексный подход к внедрению контейнерных перевозок в России // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2015. – Т. 5. – № 1. – С. 21–28. EDN: VPWEDJ.
13. Колик А. В. Комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки в цепях поставок. – М.: Изд-во «Техполиграфцентр», 2018. – 301 с. ISBN 978-5-94385-143-8.
14. Crainic, T. G., Perboli, G., Rosano, M. Simulation of intermodal freight transportation systems. *European Journal of Operational Research*, 2018, Vol. 270 (2), pp. 401–418. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.11.061.
15. Koohathongsumrit, N., Meethom, W. An integrated approach of fuzzy risk assessment model and data envelopment analysis for route selection in multimodal transportation networks. *Expert Systems with Applications*, 2020, 114342. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.114342.
16. Banasik, A., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Kanellopoulos, A., Claassen, G. D. H., Vorst van der, J. G. A. J. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: A review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2018, Vol. 30 (3), pp. 366–396. DOI: 10.1007/s10696-016-9263-5.
17. Цыганов А. В., Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н., Зенкин А. А. Критерии устойчивости контейнерной системы // Мир транспорта. – 2023. – № 5 (108). – С. 126–134. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-14>.
18. Gabus, A., Fontela, E. World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL. Geneva, Switzerland: Battelle Geneva Research Centre, 1972. pp. 1–8.
19. Sheng-Li, Si; Xiao-Yue, You; Hu-Chen, Liu; Zhang Ping. DEMATEL technique: a systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, Vol. 2018, 3696457. DOI: 10.1155/2018/3696457.
20. Stević, Ž., Pamučar, D., Puškar, A., Chatterjee, P. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to Compromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*, 2020, Vol. 140, 106231. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106231.
21. Ching-Lai, Hwang; Kwangsun, Yoon. Multiple Attribute Decision Making. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981, 270 p.
22. Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., Turskis, Z. Multi-Criteria Inventory Classification Using a New Method of Evaluation Based on Distance from Average Solution (EDAS). *Informatica*, 2015, Vol. 26, Iss. 3, pp. 435–451. DOI: 10.15388/Informatica.2015.57.
23. 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, Iss. 6, pp. 3016–3028. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.057.
24. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J. Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. *Electronics and Electrical Engineering*, 2012, Vol. 122, Iss. 6, pp. 3–6. DOI: 10.5755/j01.eee.122.6.1810.

Информация об авторах:

Осинцев Никита Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия, osintsev@magtu.ru.

Цыганов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия, tsyganov.alek@gmail.com.

Рахмангулов Александр Нельевич – доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия rap@magtu.ru.

Багинова Вера Владимировна – доктор технических наук, заведующий кафедрой логистики и управления транспортными системами Российского университета транспорта, Москва, Россия, vvbaginova@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 25.09.2023, одобрена после рецензирования 13.12.2023, принята к публикации 17.12.2023.