

ОЦЕНКА ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В ЗЕЛЕНЫХ ЦЕПЯХ ПОСТАВОК МЕТОДОМ DEMATEL

Представлена методика оценки показателей логистических потоков с использованием многокритериального метода принятия решений DEMATEL. Представлены система параметров и показателей логистических потоков, описание методологии DEMATEL, расчетный пример применения методики для оценки логистических потоков в зеленых цепях поставок.

Ключевые слова: зеленая логистика, зеленые цепи поставок, логистические потоки, показатели, DEMATEL

DOI: 10.53883/20749325_2021_04_81



Н.А. Осинцев



А.Н. Рахмангулов

Достижение целей устойчивого развития (ЦУР) [1] является приоритетной задачей по улучшению благосостояния населения и защиты окружающей среды всех стран без исключения. Достижение этих целей в процессе управления цепями поставок осложнено следующими основными проблемами [2;3]:

- недостаточная системность управления логистическими потоками, связанная с отсутствием научно обоснованных методик оценки показателей логистических потоков и связей между этими показателями;
- наличие множества критериев оценки устойчивости цепей поставок и широкого разнообразия управленческих решений по достижению устойчивости.

Эффективным инструментом решения перечисленных проблем является активно развивающееся

научное направление по разработке и совершенствованию методов многокритериального принятия управленческих решений (Multi-Criteria Decision-Making — MCDM). В течение 10 лет наблюдается увеличение числа публикаций, посвященных применению MCDM в сфере гражданского строительства, энергетики, на транспорте и в логистической деятельности. В области зеленой логистики и управления зелеными цепями поставок MCDM применяются для количественной оценки и выбора управленческих решений, обеспечивающих достижение экономических, социальных и экологических ЦУР. Наиболее часто используемыми MCDM являются отдельные методы или их комбинация [4]: метод анализа иерархий (АНР), аналитический сетевой процесс (АНР), метод испытаний и оценки принятия решений (DEMATEL), метод упо-

Осинцев Никита Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова). Область научных интересов: устойчивое развитие транспортных систем, зеленая логистика и управление зелеными цепями поставок, многокритериальные модели и методы принятия управленческих решений. Автор более 140 публикаций.

Рахмангулов Александр Нельевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова). Область научных интересов: логистика, промышленный железнодорожный транспорт, интеллектуальные транспортные системы, имитационное моделирование, методы оптимизации. Автор более 200 публикаций.

рядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением (TOPSIS), исключение и выбор в условиях реальности (ELECTRE), метод организации сортировки предпочтений для оценок альтернатив (PROMETHEE) и др.

Литературный обзор использования метода DEMATEL в управлении зелеными цепями поставок

В настоящей работе выбран метод испытаний и оценки принятия решений DEMATEL. Этот метод представляет собой инструмент поддержки принятия решений, разработанный в 70-х годах прошлого века в рамках Программы по науке и гуманитарным вопросам Женевского института Battelle Memorial для реализации исследовательского проекта, посвященного выявлению причинно-следственных связей для решения сложных проблем, стоящих перед обществом [5]. Использование DEMATEL позволяет установить взаимозависимость между исследуемыми критериями и разработать карты сетевых отношений, отражающие взаимовлияние критериев и причинно-следственные связи между ними. Применение DEMATEL на протяжении последних десятилетий сопровождалось необходимостью адаптации вычислительных процедур, устранения его недостатков, расширения возможностей и области его применения [6].

Выполненный анализ показывает, что использование DEMATEL в логистике применялось для оценки факторов, оказывающих влияние на реализацию инициатив в управлении зелеными цепями поставок [7]; для оценки факторов выбора экологически чистых логистических компаний [8]; для выявления критических факторов в управлении зеленой цепочкой поставок [9]; для оценки месторасположения распределительных центров в цепи поставок [10]; для оценки зеленых поставщиков в цепях поставок [11]; для прогнозирования и оценки эффективности экологичного управления цепями поставок [12]; для определения приоритетов при внедрении зеленых цепей поставок в рамках подхода «технология—организация—среда» [13].

Ключевым недостатком используемых в настоящее время методов MCDM является недостаточная комплексность оценки, поскольку эти методы не учитывают взаимовлияния показателей логистических потоков в процессе управления цепями поставок в соответствии с ЦУР. Разработка методики комплексной оценки показателей логистических потоков, обеспечивающей системное управление потоками в цепях поставок с учетом целей концепции устойчивого развития, является актуальной научно-практической задачей.

Методика оценки показателей логистических потоков в зеленых цепях поставок методом DEMATEL

Оценка показателей ЛП в зеленых цепях поставок выполняется в два этапа.

Этап 1. Разрабатывается модель логистических потоков и обосновываются показатели их оценки. В настоящей работе предлагается разработанная авторами система, включающая 15 показателей [2;3] (рис. 1). Показатели логистических потоков сгруппированы по пяти группам в соответствии с ЦУР.

Этап 2. Выполняется оценка взаимосвязей между показателями логистических потоков с использованием метода DEMATEL. Оценка выполняется в следующей последовательности:

1. Построение начальной матрицы прямых связей показателей логистических потоков.

Эксперты выполняют попарную оценку влияния показателя i на показатель j , с использованием пятибалльной шкалы: отсутствие влияния — 0, слабое влияние — 1, среднее — 2, высокое — 3, очень высокое — 4.

Затем формируется агрегированная матрица прямых связей показателей — A , размером $n \times n$ (n — число анализируемых показателей), содержащая усредненные оценки респондентов. Диагональные элементы a_{ij} матрицы A равны нулю.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где a_{ij} — усредненная оценка влияния показателя, расположенного в i -й строке, на показатель в j -м столбце.

2. Вычисляется нормализованная матрица прямых отношений.

Матрица прямых связей A используется для вычисления нормализованной матрицы прямых отношений X по формулам (2) и (3)

$$X = A\lambda, \quad (2)$$

$$\lambda = \min \left[\frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}}, \frac{1}{\max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n a_{ij}} \right]. \quad (3)$$

3. Вычисляется общая матрица связей между показателями по формуле:

$$T = \lim_{k \rightarrow \infty} (X + X^2 + \dots + X^k) = X(1 - X)^{-1}. \quad (4)$$



Рис. 1. Система показателей оценки логистических потоков в зеленых цепях поставок

4. Выполняется расчет числа взаимосвязей и сил влияния между показателями.

Сумма строк и сумма столбцов обозначаются как векторы D и R в общей матрице связей T и определяются по формулам (6) и (7):

$$T = [t_{ij}]_{n \times n}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

$$D = \left[\sum_{j=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1} = [d_i]_{n \times 1}, \quad (6)$$

$$R = \left[\sum_{i=1}^n t_{ij} \right]_{1 \times n} = [r_j]_{1 \times n}. \quad (7)$$

Значения D_i и R_i показывают прямое и обратное воздействие каждого показателя строки и столбца на другие показатели. Их расчет необходим для установления причинно-следственных связей в системе показателей.

Значение $(D_i + R_i)$ показывает важность показателя i относительно других показателей. Это значение соответствует числу взаимосвязей показателя i с другими показателями.

Значение $(D_i - R_i)$ показывает силу влияний показателя i на другие показатели. Если значение $(D_i - R_i)$ положительное, то показатель i может быть отнесен к группе «причин», если отрицательное, то показатель i находится под влиянием других показателей и относится к группе «следствие».

5. Построение причинно-следственной диаграммы (карты сетевых отношений).

Причинно-следственная диаграмма получается путем сопоставления упорядоченных пар $(D_i + R_i)$ по горизонтальной оси и $(D_i - R_i)$ по вертикальной оси. Она показывает структурную взаимосвязь между рассматриваемыми показателями и корреляцию между ними. В соответствии с установленным экспертами пороговым значением α , на диаграмме отображаются только те взаимосвязи между показателями из матрицы T , оценка которых превышает пороговое значение. В простейшем случае пороговое значение рассчитывается как среднее значение всех показателей матрицы T . Данное действие позволяет исключить несущественные взаимосвязи между показателями в модели принятия решений.

6. Расчет веса каждого показателя.

Значения веса показателей используется для ранжирования показателей. Расчет веса производится по формулам [14]:

$$w_i = \sqrt{(D_i + R_i)^2 + (D_i - R_i)^2}, \quad (8)$$

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}. \quad (9)$$

Основными результатами применения метода DEMATEL являются:

- установление силы влияния и взаимосвязей между показателями логистических потоков;
- построение причинно-следственной диаграммы (карта сетевых отношений) показателей логистических потоков;
- ранжирование показателей логистических потоков.

Результаты оценки логистических потоков методом DEMATEL

Оценка логистических потоков выполнялась с использованием модели и системы показателей, представленных в [2;15]. Методом анкетирования проведена оценка показателей логистических потоков

при участии пяти академических эксперта в области логистики и управления транспортными системами (два доктора технических наук (средний стаж работы 34 года), три кандидата технических наук (средний стаж работы 18,5 лет)).

Агрегированная матрица прямых связей показателей логистических потоков представлена в табл. 1, элементы нормализованной матрицы прямых связей (X) и общей матрицы связей (T), даны табл. 2 и вычисляются по формулам (1–4).

Расчет числа взаимосвязей и сил влияния между показателями логистических потоков выполняется с использованием формул (5) и (6) (табл. 3).

В соответствии со значениями ($D_i - R_i$) в табл. 3, показатели $E3, S3, ST2, ST3, ST4, M1, M2, M3$ отнесены к группе «причина», а показатели $E1, E2, EE1, EE2, S1, S2, ST1$ — к группе «следствие».

Завершающим этапом применения метода DEMATEL является построение карты сетевых отношений (рис. 2) и структуры сетевых отношений показателей логистических потоков (рис. 3).

Аналогичные действия выполняются для расчета групп показателей логистических потоков — E, EE, S, ST, M (см. рис. 1). Карта сетевых отношений групп показателей логистических потоков представлена на рис. 4.

Таблица 1

Агрегированная матрица прямых связей между показателями логистических потоков

Показатели	E1	E2	E3	EE1	EE2	S1	S2	S3	ST1	ST2	ST3	ST4	M1	M2	M3
E1	0	2.2	3.4	1.8	1.8	2.2	1.8	1.8	1.4	1	1	1	2.6	1.8	0.6
E2	3.8	0	2.2	2.6	1.4	2.4	2.4	1.2	1	0.8	0.8	0.8	1.6	1.4	0.6
E3	3.6	3	0	3	2.8	2.6	2	2	1.4	1.6	1.6	1	2	2.4	1.2
EE1	3	3.4	1.8	0	3.2	1	1.2	1.4	1.4	1.4	1.8	1.8	2	1.6	1
EE2	1.4	2.2	2.2	1.8	0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
S1	3.6	2.8	1	1.8	0.6	0	2	1.4	1.2	1	1.2	1.2	1.2	1.4	1.2
S2	3.2	2.8	1	2	1	1.2	0	1.8	2.4	1.6	1.6	1.6	0.8	2	1.8
S3	2	2.6	1.2	1.8	1.4	2.2	3.2	0	2.6	2.6	2.4	2.2	1	2.6	1.2
ST1	2	2.6	0.8	2.2	1.2	1.6	3.2	2.4	0	1.8	1.6	1.8	1.2	1.8	0.4
ST2	1.6	2.6	1	2.2	1.4	2.6	3	3	2.6	0	2	2.4	1.4	1.8	1
ST3	1.8	2.4	1	1.8	1.4	1.4	2	2.4	3	2.6	0	1.6	1.6	2.2	1
ST4	1.2	2.2	1	1.6	1.2	1.6	2.2	2.4	2.2	3.2	1.8	0	1.2	1.8	1.2
M1	3.8	3.8	2	3.4	3.2	2.2	2.6	2.2	2.2	2.2	2.4	2.2	0	3.2	1
M2	3	3.2	2	3.4	2	1.6	3.2	2.6	2.4	1.4	2	2	0.8	0	0.4
M3	1.8	2.6	1.2	3	2.2	2	3.4	2	2	1.4	1.2	1.2	1	2.4	0

Таблица 2

Общая матрица связей (7) между показателями логистических потоков

Показатели	E1	E2	E3	EE1	EE2	S1	S2	S3	ST1	ST2	ST3	ST4	M1	M2	M3
E1	0.128	0.185	0.163	0.155	0.131	0.141	0.152	0.134	0.121	0.101	0.100	0.097	0.132	0.135	0.061
E2	0.211	0.121	0.131	0.165	0.115	0.139	0.157	0.113	0.105	0.090	0.089	0.087	0.105	0.119	0.058
E3	0.238	0.228	0.098	0.203	0.171	0.166	0.177	0.156	0.138	0.129	0.127	0.111	0.131	0.165	0.084
EE1	0.201	0.214	0.129	0.112	0.166	0.114	0.140	0.127	0.123	0.113	0.119	0.117	0.120	0.131	0.071
EE2	0.097	0.116	0.095	0.097	0.043	0.052	0.060	0.052	0.050	0.045	0.045	0.043	0.045	0.053	0.032
S1	0.198	0.182	0.098	0.140	0.090	0.077	0.145	0.115	0.107	0.092	0.095	0.093	0.092	0.115	0.070
S2	0.202	0.197	0.106	0.158	0.110	0.117	0.110	0.136	0.147	0.117	0.114	0.113	0.089	0.140	0.090
S3	0.193	0.213	0.120	0.170	0.131	0.154	0.206	0.107	0.168	0.154	0.146	0.140	0.103	0.168	0.083
ST1	0.174	0.192	0.099	0.161	0.113	0.125	0.186	0.149	0.088	0.122	0.114	0.118	0.097	0.134	0.057
ST2	0.182	0.211	0.114	0.177	0.129	0.162	0.199	0.178	0.166	0.090	0.136	0.143	0.112	0.148	0.078
ST3	0.176	0.196	0.108	0.160	0.124	0.127	0.167	0.157	0.168	0.147	0.080	0.119	0.111	0.150	0.073
ST4	0.155	0.184	0.103	0.149	0.114	0.127	0.166	0.152	0.145	0.157	0.121	0.075	0.098	0.136	0.076
M1	0.270	0.276	0.165	0.238	0.199	0.176	0.217	0.183	0.178	0.163	0.164	0.157	0.097	0.205	0.089
M2	0.221	0.230	0.144	0.210	0.149	0.141	0.205	0.170	0.163	0.126	0.137	0.135	0.102	0.106	0.065
M3	0.181	0.204	0.116	0.191	0.146	0.141	0.200	0.147	0.144	0.117	0.110	0.109	0.098	0.156	0.050

Примечание. Цветом выделены взаимосвязи, оценка которых больше порогового значения $\alpha=0,135$.

Таблица 3

Результаты оценки показателей логистических потоков методом DEMATEL

Показатели	D	R	$D+R$	$D-R$
$E1$	1.938	2.827	4.765	-0.89
$E2$	1.805	2.948	4.753	-1.14
$E3$	2.322	1.79	4.111	0.532
$EE1$	1.997	2.489	4.486	-0.49
$EE2$	0.924	1.93	2.855	-1.01
$S1$	1.709	1.962	3.67	-0.25
$S2$	1.944	2.488	4.432	-0.54
$S3$	2.255	2.074	4.33	0.181
$ST1$	1.929	2.013	3.942	-0.08
$ST2$	2.225	1.763	3.988	0.462
$ST3$	2.064	1.698	3.762	0.367
$ST4$	1.959	1.657	3.617	0.302
$M1$	2.778	1.534	4.312	1.245
$M2$	2.306	2.06	4.366	0.246
$M3$	2.111	1.037	3.147	1.074

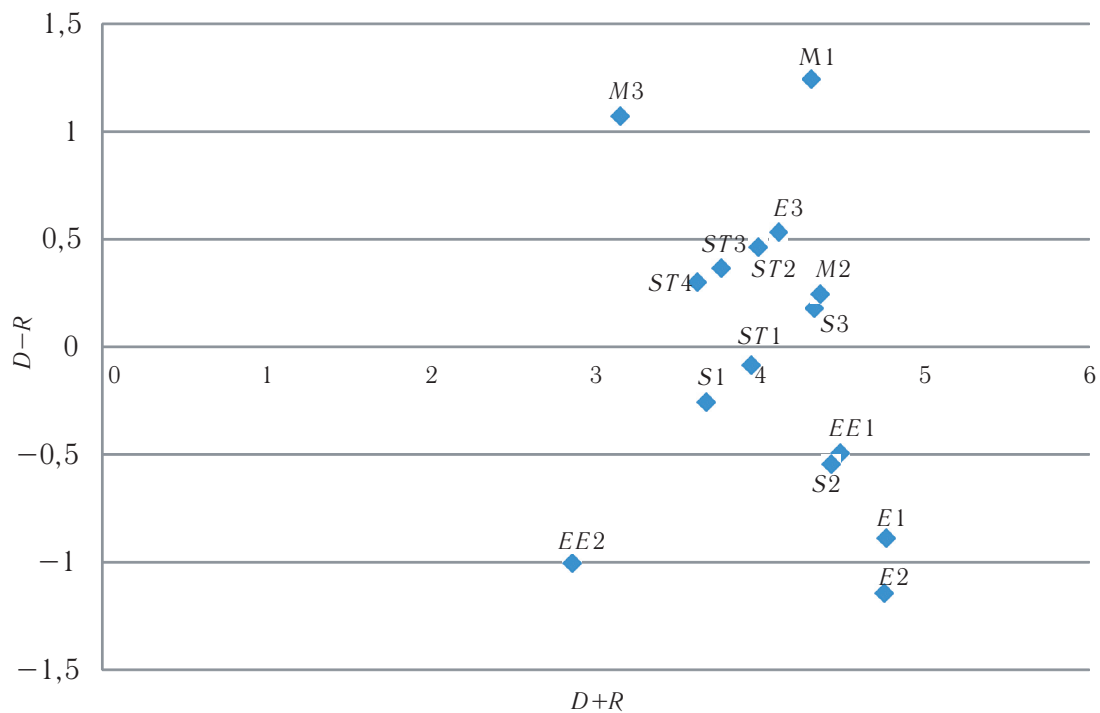


Рис. 2. Карта сетевых отношений показателей логистических потоков

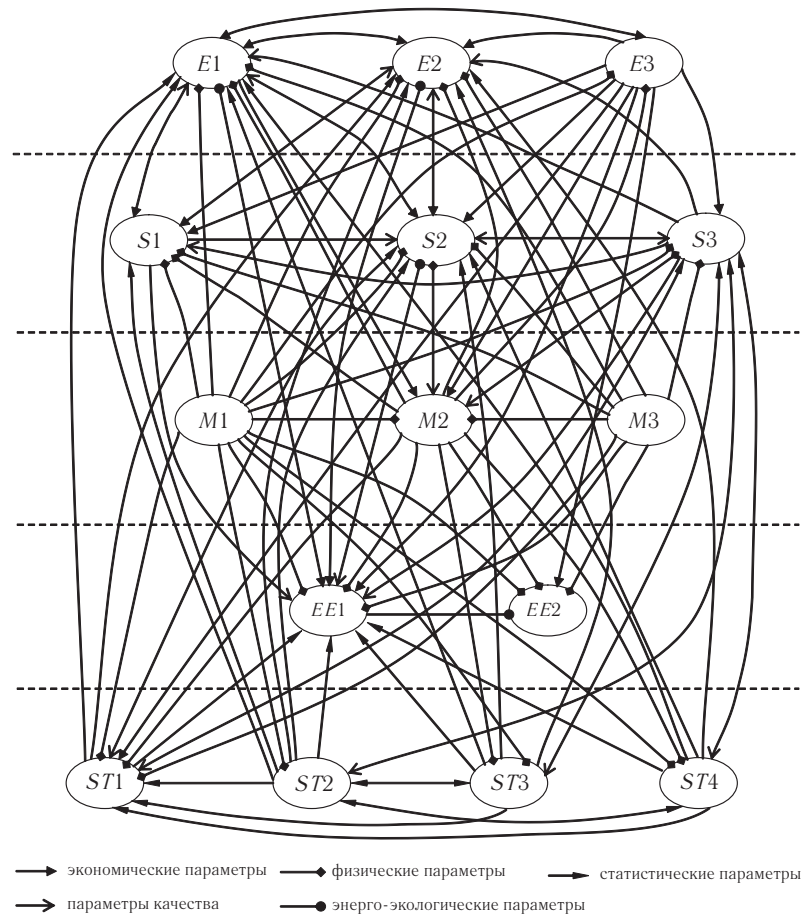


Рис. 3. Сетевая структура отношений показателей логистических потоков

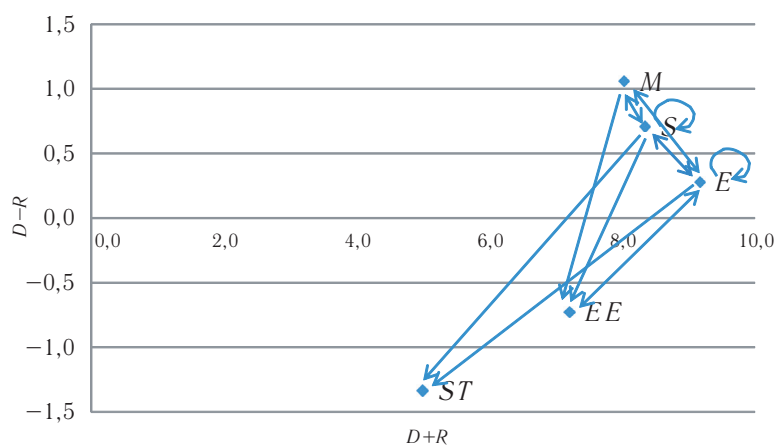


Рис. 4. Карта сетевых отношений групп показателей логистических потоков

После определения структуры взаимосвязей между показателями логистических потоков с помощью метода DEMATEL был рассчитан вес показателей с использованием формул (8) и (9). Результаты ранжирования показателей логистических потоков представлены в табл. 4. Наиболее значимыми группами показателей являются экономические (E), качественные (S) и управляемые (физические) (M) показатели потоков. Наивысший ранг у показателей прибыль ($E1$), операционные расходы ($E2$) и энергоёмкость логистических потоков ($EE1$). Результаты ранжирования показывают преобладание экономических показателей. Однако в работе [16] показана возможность и необходимость этапности проведения процедуры MCDM, предусматривающей исключение экономических критериев и показателей на первом этапе ранжирования. Только после выбора значимых показателей или альтернативных решений производится их экономическая оценка. Реализация данного подхода, названного в

[16] MCDM-CCAF (Multi-Criteria Decision Making with Cost Criterion Analysed at the Final Stage), применительно к оценке показателей логистических потоков в зеленых цепях поставок предполагается в будущих исследованиях.

Результаты ранжирования показателей логистических потоков положены в основу разработанной авторами комбинированной модели управления логистическими потоками в зеленых цепях поставок. Предлагаемая модель основана на использовании многокритериальных методов принятия решений и имитационного моделирования. Использование имитационной модели при формировании системы управления потоками позволяет эффективно обучать модель логистических потоков, а в процессе эксплуатации сформированной системы управления — прогнозировать изменение показателей логистических потоков и планировать на основе прогнозов оптимальную последовательность использования инструментов зеленой логистики.



Таблица 4

Ранжирование показателей логистических потоков

Группы показателей (см. рис. 1)	Вес	Ранг	Показатели логистических потоков (см. рис. 1)	Вес	Ранг
E	0.2411	1	$E1$	0.0789	2
			$E2$	0.0795	1
			$E3$	0.0675	8
EE	0.1903	4	EE	0.0734	3
			$EE2$	0.0493	15
S	0.2200	2	$S1$	0.0599	12
			$S2$	0.0727	5
			$S3$	0.0705	7
ST	0.1357	5	$ST1$	0.0642	10
			$ST2$	0.0653	9
			$ST3$	0.0615	11
			$ST4$	0.0591	13
M	0.2128	3	$M1$	0.0730	4
			$M2$	0.0711	6
			$M3$	0.0541	14

Литература

1. Цели в области устойчивого развития. —URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (дата обращения 10.12.2021).
2. Osintsev N., Rakhmangulov A., Sładkowski A., Dyorina N. Logistic flow control system in green supply chains. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020. vol. 124. pp. 311–380.
3. Осинцев, Н.А. Параметры и показатели потоков в зелёных цепях поставок / Н.А. Осинцев // Современные проблемы транспортного комплекса России. —2019. —Т.9. —№1. —С. 27–40. DOI: 10.18-503/2222-9396-2019-9-1-27-40.
4. Stojic M., Zavadskas E., Pamucar D., Stevic Z., Mardani A. Application of MCDM methods in sustainability engineering: A Literature Review 2008–2018 // *Symmetry*. 2019. vol.11. no.3. p. 350. DOI: 10.3390/sym11030350.
5. Gabus A., Fontela E., World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL. Battelle Geneva Research Centre, Geneva, Switzerland, 1972, pp. 1–8.
6. Si S.-L., You X.-Y., Liu H.-C., Zhang P. DEMATEL technique: a systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications // *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. no.1. pp.1–33. DOI: 10.1155/2018/3696457.
7. Gandhi S., Mangla S.K., Kumar P., Kumar D. Evaluating factors in implementation of successful green supply chain management using DEMATEL: A case study // *International Strategic Management Review*. 2015. vol.3. no.1-2. pp. 96–109. DOI: 10.1016/j.ism.2015.05.001.
8. Cheng S.-H., Ou S.M., Lin S.-M. Using decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) to explore the key success factors for green logistics manufacturers // *African Journal of Business Management*. 2018. vol.12. no.3. pp. 58–65. DOI: 10.5897/AJBM2017.8461.
9. Wu H.-H., Chang S.-Y. A case study of using DEMATEL method to identify critical factors in green supply chain management // *Applied Mathematics and Computation*. 2015. vol.256. pp. 394–403. DOI: 10.1016/j.amc.2015.01.041.
10. Maghsud A., Salehi S.J., Payanib N., Shafieezadeh M. Developing a DEMATEL method to prioritize distribution centers in supply chain // *Management Science Letters*. 2011. vol.1. pp. 279–288. DOI: 10.5-267/j.msl.2011.04.001.
11. Mavi R.K., Kazemi S., Najafabadi A.F., Moussbadi H.B. Identification and assessment of logistical factors to evaluate a green supplier using the fuzzy logic DEMATEL method // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2013. vol.22. no.2. pp. 445–455.
12. Malviya R.K., Kant R. Hybrid decision making approach to predict and measure the success possibility of green supply chain management implementation // *Journal of Cleaner Production*. 2016. vol.135. pp. 387–409. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.046
13. Hwang B.-N., Huang C.-Y., Wu C.-H. A TOE approach to establish a green supply chain adoption decision model in the semiconductor industry // *Sustainability*. 2016. vol.8. no.2. pp. 1–30. DOI: 10.3390/su8020168.
14. Dytczak M., Ginda G. DEMATEL-based ranking approaches // *WSB University in Wroclaw Research Journal*. 2016. vol.16. no.3. pp. 191–201.
15. Осинцев, Н.А. Концепция системы управления логистическими потоками в «зелёных» цепях поставок / Н.А. Осинцев. —Текст: непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. —2020. —№2. —С. 81–92. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-2-81-92.
16. Anysz H., Nicał A., Stević Ž., Grzegorzewski M., Sikora K. Pareto optimal decisions in multi-criteria decision making explained with construction cost cases // *Symmetry*. 2021. vol.13. no.1. p.46. DOI: 10.3390/sym13010046.