

Оптимизационный подход к интеграции цифровых технико-технологических решений в работу железнодорожных станций



О. В. Москвичев,
д-р техн. наук, директор
Института управления
и экономики Приволжского
государственного
университета путей
сообщения (ПривГУПС),



А. А. Грузд,
преподаватель
кафедры «Управление
эксплуатационной
работой» ПривГУПС

Предлагаемый метод оптимального выбора цифрового технико-технологического решения осуществляется на основании четырех разнородных критериев: себестоимости переработки одного вагона, простоя местного вагона на ответственности ОАО «РЖД», производительности труда, производственного травматизма. Методика позволяет оптимизировать взаимодействие грузовых станций и путей необщего пользования.

Интеграция цифровых технологий в процесс взаимодействия грузовых железнодорожных станций (ГЖС) и примыкающих железнодорожных путей необщего пользования (ПНП) представляет собой значимую меру по повышению надежности функционирования железнодорожного транспорта общего и необщего пользования [1]. В то же время процесс цифровой трансформации грузовых железнодорожных станций осложняется наличием широкого спектра цифровых технико-технологических решений, различающихся функциональными возможностями и областью применения в рамках технологической цепочки продвижения поездо- и вагонопотока.

Для решения данной проблемы разработана математическая модель на основе теории массового обслуживания, предназначенная для определения места внедрения цифровых решений на основе выявления барьерных мест во взаимодействии ГЖС и ПНП, а также оригинальный классификатор цифровых технико-технологических решений, обеспечивающий подбор возможных вариантов в зависимости от выявленного барьерного узла [2].

Вместе с тем сформированный перечень альтернативных цифровых решений требует дальнейшего обоснованного выбора предпочтительного варианта. В связи с этим выбор конкретного цифрового инструмента требует применения научно-обоснованного методического подхода, позволяющего оценить влияние цифровизации производственных про-

цессов на показатели работы железнодорожной станции и примыкающих путей необщего пользования и обеспечить обоснованный шаг по внедрению и (или) интеграции наиболее целесообразного цифрового технико-технологического решения.

Выбор оптимального варианта

В работе [3] выполнено исследование, направленное на обоснование выбора критериев оценки эффективности внедрения цифровых технико-технологических решений, ориентированных на повышение результативности взаимодействия грузовых железнодорожных станций и примыкающих путей необщего пользования. Характеристика критериев ($f_i(x) \rightarrow \max/\min$):

- себестоимость переработки одного вагона, руб./год — $f_1(x) \rightarrow \min$;
- простой местного вагона на ответственности ОАО «РЖД», ч — $f_2(x) \rightarrow \min$;
- производительность труда, ваг./чел. — $f_3(x) \rightarrow \min$;
- производственный травматизм, случаев — $f_4(x) \rightarrow \min$.

Следует отметить, что такие критерии, как себестоимость переработки местного вагона, простой местного вагона на ответственности ОАО «РЖД» и производственный травматизм имеют тенденцию стремиться к минимуму. В то же время производительность труда, напротив, направлена на максимизацию. В результате разнородности указанных критериев задача по выбору оптимального варианта цифрового технико-технологического решения при-

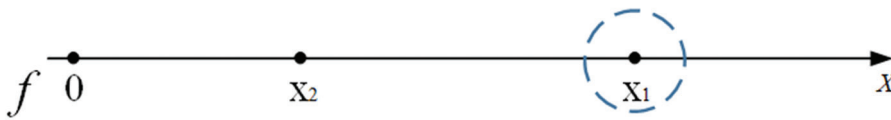


Рис. 1. Метод выбора оптимального варианта на основе одного критерия

обретает характер многокритериальной оптимизации.

Большинство известных методов многокритериальной оптимизации принятия решений основываются на анализе предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР). Им может являться как отдельный субъект, так и группа лиц, объединенная общими интересами и стремящаяся достичь определенной цели [4].

Поскольку многообразие критериев, характеризующих рассматриваемые альтернативы, часто создает трудности при выборе лучшего решения, крайне важно учесть индивидуальные предпочтения и вкусы ЛПР. Это позволяет наиболее точно подобрать оптимальный вариант, соответствующий заданной цели [5]. Чтобы принятое решение оказалось наиболее оптимальным и приблизило к желаемому результату, необходимо четко осознавать, что подразумевает термин «наилучший выбор». Наиболее распространенным способом выяснения предпочтительных вариантов является построение специальной шкалы ценности, которая отображает желания и требования конкретного ЛПР относительно решаемой задачи. Такой подход помогает ясно выразить мнение субъекта о важности каждого критерия, облегчить сопоставление вариантов и обосновать выбор наиболее подходящего решения.

Иногда предпочтения лица, принимающего решение, удается описать достаточно просто. Например, считается, что вариант x_1 предпочтительнее варианта x_2 , если количественная или качественная оценка первого варианта строго превышает оценку второго. Пусть задана числовая функция f , определенная на множестве возможных решений X , именуемая целевой функцией или критерием оптимальности (рис. 1).

В данном случае множество выбираемых вариантов $C(X)$ будет включать те элементы множества X , которые обеспечивают максимум или минимум значений функции f . Таким образом, задача выбора превращается в стандартную оптимизационную задачу, которая глубоко исследована, и для ее решения разработаны многочисленные методы [4].

Задачи выбора, в которых предпочтения ЛПР не могут быть выражены

простым способом, представляют собой более обширный и интересный класс с точки зрения практики. В них задается набор числовых целевых функций $f_1, f_2, \dots, f_k$, определенных на множестве X , которые образуют векторный критерий $f = (f_1, f_2, \dots, f_k)$ со значениями в так называемом критериальном пространстве R_k . При этом для ЛПР каждый из критериев необходимо привести к одному направлению, что позволит однозначно сравнить альтернативы.

Если оценка одного из двух вариантов не хуже другого по всем компонентам, по крайней мере по одной из них — строго лучше, то первый вариант предпочтительнее второго [4, 6]. Данное условие является аксиомой Парето и может быть представлено в виде соответствующего неравенства. Уравнение для всех задач максимизации [4, 6]:

$$\begin{aligned} x', x'' \in X, f_i(x') \geq f_i(x''), i = 1, 2, \dots, m; \\ \exists k \in \{1, 2, \dots, m\}: f_k(x') > f_k(x''). \end{aligned} \quad (1)$$

Таким образом, актуальной задачей является поиск решений, удовлетворяющих принципу Парето-доминирования, т. е. таких альтернатив, которые нельзя улучшить по одному критерию или нескольким без ухудшения по другим критериям. Совокупность таких безусловно несравнимых альтернатив называется Парето-оптимальное множество или областью компромиссов [7]. Именно в пределах данного множества осуществляется дальнейший выбор оптимального варианта.

Таким образом, векторная оптимизация включает два этапа:

- безусловная оптимизация, в рамках которой анализируется критериальное пространство и отсеиваются безусловно худшие варианты, что позволяет получить оптимальное множество Парето;
- условная оптимизация, в рамках которой для получения единственного решения из оптимального множества Парето применяются дополнительные принципы оптимальности (условия согласования критериев).

Одним из методов условной оптимизации является принцип равенства критериев. Идея метода заключается

в том, что если невозможно однозначно выбрать лучший вариант, то оптимальным будет тот, при котором значения всех критериев, приведенных к единому масштабу, становятся равными или близкими друг другу [6]. Данный подход применим, когда критерии трудно ранжировать по важности, и мы хотим достичь баланса между ними. Однако случай $f_1 = f_2 = \dots = f_k$ может не попасть в область компромиссов или вообще не принадлежать к области допустимых вариантов.

В данной работе рассматривается ситуация, при которой выбор оптимального варианта цифрового технико-технологического решения определяется на основании четырех разнородных критериев [3]: себестоимость переработки одного вагона; простой местного вагона на ответственности ОАО «РЖД»; производительность труда; производственный травматизм. Таким образом, исходное множество критериев $F_k; k = 4$.

Общая постановка задачи многокритериального выбора оптимального цифрового технико-технологического решения имеет следующий вид: $m = (m_1, m_2, \dots, m_n) \in M$ — множество альтернатив (вариантов цифровых технико-технологических решений); $F_k; k = \overline{1, 4}$, где k — множество разнородных критериев оценки оптимального варианта.

Если лучшей альтернативе соответствует минимум трех критериев и максимум, то поиск оптимального варианта сводится к многокритериальной задаче следующего вида:

$$\begin{aligned} F(M) = \{F_1(m_n), F_2(m_n), F_4(m_n)\} \rightarrow \min, \\ F(M) = \{F_3(m_n)\} \max \quad m \in M. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, при сравнении двух цифровых технико-технологических решений $m_i \in M$ и $m_j \in M$, где задан $F_3(m_n)$, стремящийся к максимуму, тогда для любых индексов $i, j = \overline{1, m}$ справедливо неравенство $F_3(m_i) \geq F_3(m_j)$, т. е. очевидно, что решение m_i не хуже, чем m_j . Кроме того, если существует хотя бы один индекс $i = \overline{1, m}$, при котором выполнено строгое неравенство $F_3(m_i) > F_3(m_j)$, то в данном случае решение превосходит вариант решения m_j .

Для оценки и выбора лучшей альтернативы необходимо структурировать альтернативы по критериям адекватности. Множество оцениваемых альтернатив заносится в «Критериальную таблицу», где r_{ij} — оценка i -й альтернативы (варианта цифрового технико-

Таблица 1. Критериальная матрица альтернатив

Критерии	Варианты				
	m_1	m_2	m_3	...	m_n
K_1	r_{11}	r_{12}	r_{13}	...	r_{1n}
K_2	r_{21}	r_{22}	r_{23}	...	r_{2n}
K_3	r_{31}	r_{32}	r_{33}	...	r_{3n}
...	...	...	...	...	...
K_i	r_{i1}	r_{i2}	r_{i3}	...	r_{in}

технологического решения) m_i по j -му критерию (F_k) $i=1, k, (табл. 1)$.

Для сравнения альтернатив (m_i) и (m_j) полное множество критериев разбивается на три подмножества $\{I_+, I_-, I_0\}$:

- $I_+(m_i, m_j)$ — критерии, по которым вариант решения превосходит;
- $I_-(m_i, m_j)$ — критерии, по которым варианты и имеют эквивалентные оценки;
- $I_0(m_i, m_j)$ — критерии, по которым вариант превосходит.

В качестве метода условной оптимизации рассмотрен принцип равенства критериев. Этот метод подходит для решения поставленной проблемы, так как позволяет свести многокритериальную задачу к поиску равновесного решения, при котором каждый из критериев оказывает примерно равное влияние на итоговый выбор [6, 7]. Благодаря нормализации критериев и минимизации суммы отклонений от средней величины метод помогает избежать доминирования одного показателя и достигать гармонии между конкурирующими интересами.

Для начала критерии нормализуются относительно друг друга, поскольку разные показатели могут иметь различную размерность и масштаб значений. Пусть задано множество альтернатив M , каждая из которых оценивается по k критериям $f_k(m_i)$, где $i = (1, 2, \dots, n)$. Тогда нормирование значений критериев определяется по формуле следующим образом:

$$f_k(m_i) = \frac{f_k(m_i) - f_{\min k}}{f_{\max k} - f_{\min k}}, \quad (3)$$

где $f_{\min k}$ и $f_{\max k}$ — минимальное и максимальное значение критерия k среди всех альтернатив.

Далее вычисляется среднее значение каждого критерия по всем альтернативам по формуле

$$f_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_k(m_i), \quad k = (1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

Затем рассчитывается отклонение каждой альтернативы от среднего значения по каждому критерию по формуле

$$d_{ki} = |f_k - f_k(m_i)|, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$
$$\sum_{k=1}^m d_{ki} \rightarrow \min.$$

В итоге выбор оптимального варианта определяется как тот, при котором сумма отклонений по всем критериям будет минимальной:

$$M = \{m_1, m_2, m_3, m_4, m_5\}, \\ M_P = \{m_1, m_4, m_5\}. \quad (6)$$

Пример апробации

Рассмотрим пример выбора рационального цифрового технико-технологического решения, направленного на повышение эффективности взаимодействия грузовой железнодорожной станции и примыкающих путей необщего пользования на основании разработанной методики.

В результате применения математической модели в качестве барьерного места определена технологическая операция по обработке состава по отправлению, на основании чего с использованием разработанного классификатора сформирован перечень из пяти альтернативных цифровых технико-технологических решений для разгрузки выявленного барьерного места:

- m_1 — внедрение мобильного рабочего места осмотра вагонов;
- m_2 — мобильного рабочего места бригады пункта коммерческого осмотра;
- m_3 — модуля планирования и контроля отправления поездов;
- m_4 — модуля автоматического опробования автотормозов;
- m_5 — модуля автоматического закрепления подвижного состава.

Таким образом, сформируем множество альтернатив цифровых решений:

Таблица 2. Исходные значения критериев для альтернативных вариантов цифровых решений (оценочные данные)

Критерии	Направление	Ед. измерения	Варианты				
			m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
K_1	$\rightarrow \min$	тыс. руб. / год	34,7	34,7	39,0	38,0	38,2
K_2	$\rightarrow \min$	ч / сут	33,65	33,65	33,6	33,6	33,5
K_3	$\rightarrow \max$	ваг. / чел.	3,2	2,4	0	4,6	1,6
K_4	$\rightarrow \min$	случай	1	1	1	0	0

$$M = \{m_1, m_2, m_3, m_4, m_5\},$$

где m_i — вариант внедрения цифрового технико-технологического решения (или их комбинации), направленного на повышение эффективности взаимодействия ГЖС и ПНП.

Оценка альтернатив выполняется по четырем критериям эффективности:

- K_1 — себестоимость переработки одного вагона ($\rightarrow \min$);
- K_1 — простой местного вагона на ответственности ОАО «РЖД» ($\rightarrow \min$);
- K_1 — производительность труда ($\rightarrow \max$);
- K_1 — производственный травматизм ($\rightarrow \min$).

Исходные значения критериев по рассматриваемым альтернативам формируют критериальную матрицу (табл. 2).

На первом этапе выполняется Парето-анализ с целью исключения доминируемых альтернатив. По результатам сравнения установлено, что доминируемыми являются альтернативы. Альтернативы, и являются безусловно несравнимыми и формируют Парето-оптимальное множество:

$$M_P = \{m_1, m_4, m_5\}.$$

Результаты сравнения представлены в виде матрицы Парето-доминирования (табл. 3). На основании матрицы доминирования формируется Парето-оптимальное множество альтернатив, включающее решения, которые не могут быть улучшены по одному критерию без ухудшения другого. Схема формирования Парето-оптимального множества представлена на рис. 2.

Дальнейший выбор рационального решения выполняется только среди альтернатив, входящих в Парето-оптимальное множество. Поскольку критерии являются разнородными и имеют различную размерность, выполняется нормирование по методу min-max с приведением критериев к единой направлен-

Таблица 3. Матрица Парето-доминирования альтернатив цифровых решений

Альтернатива m_i	Альтернатива m_j					
		m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
	m_1	—	1	0	0	0
	m_2	0	—	0	0	0
	m_3	0	0	—	0	0
	m_4	0	0	1	—	0
	m_5	0	0	1	0	—

Примечание: 1 — доминирование альтернативы по строке над альтернативой по столбцу; 0 — отсутствие доминирования.

Таблица 4. Результаты Парето-отбора и условной оптимизации альтернатив цифровых решений

Альтернатива	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
m_1	1,000	0,000	0,533	0,000	0,383	1,533
m_2	—	—	—	—	—	—
m_3	—	—	—	—	—	—
m_4	0,057	0,333	1,000	1,000	0,598	1,61
m_5	0,000	1,000	0,000	0,000	0,250	1,5

ности в соответствии с формулами (3–6). Результаты нормирования и условной оптимизации представлены в табл. 4.

По результатам расчета интегрального показателя сбалансированности установлено, что минимальное значение D_i соответствует альтернативе m_5 ($D_i=1,5$) (внедрение модуля автоматического закрепления подвижного состава), что позволяет признать ее рациональным вариантом внедрения цифрового решения при заданных исходных данных.

Заключение

Таким образом, предложенная методика обеспечивает выбор рационального

цифрового решения на основе многокритериальной оценки.

На этапе безусловной оптимизации выполняется анализ критериального пространства и исключение заведомо неэффективных (доминируемых) альтернатив с формированием множества Парето.

На этапе условной оптимизации осуществляется выбор предпочтительного решения среди альтернатив множества Парето на основе дополнительного принципа оптимальности (в данном случае — принципа равенства критериев).

Применение методики позволяет обоснованно принимать решения



Рис. 2. Формирование Парето-оптимального множества альтернатив

по внедрению цифровых технологических решений, направленных на разгрузку барьерного места в процессе взаимодействия ГЖС и ПНП.

Литература

1. Рахмангулов А. Н., Мишкурнов П. Н. Способ цифровизации железнодорожных перевозок на путях необщего пользования горнодобывающих предприятий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. № 2. С. 5–17. DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-5-17.

2. Москвичев О. В., Москвичева Е. Е., Грузд А. А. Научно-методический подход к интеграции цифровых технологий в работу железнодорожных грузовых станций и примыкающих путей необщего пользования // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. 2025. № 3(118). С. 43–47.

3. Москвичев О. В., Москвичева Е. Е., Грузд А. А. Многокритериальный подход к оценке эффективности внедрения цифровых технологий в работу грузовых железнодорожных станций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 2(74). С. 55–62. DOI: 10.52170/1815-9265_2025_74_55.

4. Железняков А. А., Гарькина И. А. Множество Парето при решении многокритериальных задач // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2025. № 3(58). С. 166–172.

5. Кошечев А. А., Тимухина Е. Н., Кашеева Н. В. и др. Формирование множества альтернативных решений по выбору параметров структуры и технологии работы железнодорожных станций // Транспорт Урала. 2022. № 2 (73). С. 65–70. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-65-70.

6. Грибанова Е. Б., Леонов Д. В. Разработка моделей условной оптимизации с использованием экспертных оценок // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2024. Т. 27. № 3. С. 100–108. DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-100-108.

7. Богданова П. А., Сахаров Д. М., Васильева Т. В. Обзор методов многокритериальной оптимизации в задачах принятия решений // Инновационные аспекты развития науки и техники. 2021. № 6. С. 153–157.