

УДК 656.212

В. В. МАЛАШКИН^{1*}, Н. И. БЕРЕЗОВЫЙ^{2*}, И. Я. СКОВРОН^{3*}

^{1*} Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 793-19-13, эл. почта: malaxa79@gmail.com, ORCID 0000-0002-5650-1571

^{2*} Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 793-19-13, эл. почта: n.berezoviy@gmail.com, ORCID 0000-0001-6774-6737

^{3*} Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 230 50 34, эл. почта: norvoks@gmail.com, ORCID 0000-0003-0697-2698

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ КОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Цель работы заключается в разработке методов комплексной оценки вариантов конструкции путевого развития железнодорожных станций и их сравнительного анализа для выбора наиболее рационального проектного решения на основе современных математических методов. **Методика.** Для решения поставленной задачи использованы методы статистического анализа, теории графов и теории принятия решений. **Результаты.** Получены конструктивные характеристики и качественные показатели различных схем путевого развития станционной горловины. В результате сравнительного анализа рассмотренных вариантов проектных решений определены их числовые оценки (приоритеты), на основании которых выбрана наиболее рациональная схема путевого развития железнодорожной станции. **Научная новизна** заключается в том, что процедура выбора рациональной схемы путевого развития железнодорожной станции из множества вариантов формализована как многокритериальная задача, для решения которой использован метод анализа иерархий. **Практическая значимость** представленной методики позволит расширить диапазон рассматриваемых конкурентных вариантов схем путевого развития железнодорожных станций и повысить объективность их сравнительного анализа не только с учетом конструктивных особенностей, но и с учетом качественных показателей.

Ключевые слова: железнодорожная станция; путевое развитие; количественная оценка; метод анализа иерархий.

Введение

К современным проектам строительства нового или реконструкции существующего путевого развития железнодорожных станций предъявляется ряд требований, основными из которых являются не только соответствие Государственным строительным нормам [1] и низкая стоимость, но и высокий уровень функционирования. Данные требования оказывают значительное влияние на конечный выбор схемы путевого развития. Процесс отбора эффективного проектного решения из совокупности предложенных вариантов осуществляется путем сравнения их технико-экономических показателей по основным критериям оценки – приведенным расходам. Использование единого критерия при сравнении конкурентных вариантов не гарантирует выбор наиболее рационального проектного решения, поскольку может привести к неправильной оценке того или

иного показателя, который при определенных обстоятельствах может быть весьма важным. Следует отметить, что существующая практика оценки и выбора проектных решений качественным показателям в вариантах схем станций, как правило, предоставляет несколько второстепенное значение, поэтому они учитываются не на основе объективного анализа, а интуитивно.

Формирование множества вариантов схем станций эффективно на основе использования системы структурно-параметрических моделей в совокупности с методами автоматизированного синтеза путевого развития железнодорожных станций [2]. Вместе с тем, отсутствие в проектных организациях специализированных интеллектуальных систем поддержки принятия проектных решений существенно уменьшает количество рассматриваемых проектных вариантов, а также снижает качество их анализа и объективной количественной оценки.

Цель

В этой связи актуальность приобретает задача, связанная с разработкой методов комплексной оценки конструкции путевого развития железнодорожных станций. Решение указанной задачи будет способствовать увеличению количества рассматриваемых вариантов лицом, принимающим решение (ЛПР), и повышению качества их сравнительной оценки.

Разработанные методы целесообразно реализовать в виде программного комплекса, функциональность которого должна обеспечить решение таких подзадач:

- расчет конструктивных параметров планов станций;
- расчет качественных показателей планов станций;
- сравнительный анализ конструктивных параметров и качественных показателей вариантов проектных решений с получением комплексной количественной оценки.

Методика

Исходными данными для анализа схем станций служат их канонические модели в виде ориентированных графов [2], дополненные координатами основных точек плана (КП – конец пути, ЦСП – центр стрелочного перевода и ВУП – вершина угла поворота), а также значениями углов поворота для ВУП, полученных на этапе автоматизированного проектирования планов путевого развития станций. Для примера, на рис. 1 приведены ориентированный граф $G = (V, E)$ стрелочной горловины и ее каноническая модель.

Оценка планов путевого развития железнодорожных станций выполняется с использованием комплекса показателей, которые позволяют учитывать конструктивные параметры (общее количество стрелок, полезная и строительная длины и т.д.), а также качественные особенности вариантов проектных решений (максимальное количество одновременных перемещений в горловине, количество стрелочных переводов и сумма углов поворота на маршруте движения, количество стрелочных переводов на главном пути и т.д.).

В работах [3-4] представлены методы и алгоритмы для определения указанных показателей проектных решений. В результате проведенных исследований установлено, что значения конструктивных параметров и качественных характеристик сравниваемых схем путевого развития железнодорожной станции могут

существенно отличаться по вариантам. Это значительно осложняет оценивание вариантов конструкции путевого развития станции и их сравнительный анализ.

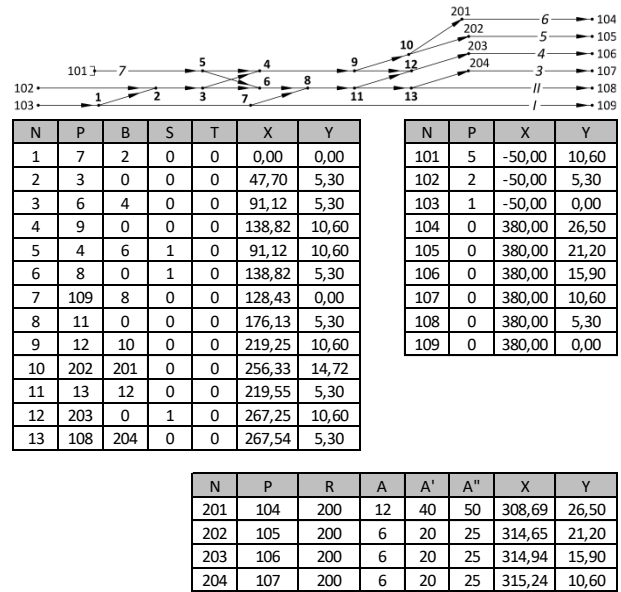


Рис. 1. Ориентированный граф G горловины станции и ее каноническая модель

Таким образом, задача выбора рациональной схемы путевого развития станции является многокритериальной и для ее решения целесообразно применить метод анализа иерархий (МАИ), разработанный американским математиком Томасом Саати [5-7].

В соответствии с МАИ структура задачи выбора эффективного проектного решения представляется в виде иерархии, которая в простейшем случае имеет три уровня (рис. 2):

- первый (верхний) уровень – цель (оптимальный выбор);
- второй уровень (промежуточный) – критерии оптимального выбора;
- третий (нижний) уровень – альтернативы, которые необходимо сравнить для получения оптимального выбора.

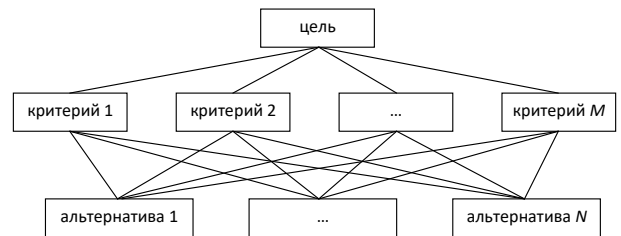


Рис. 2. Иерархия МАИ

Основным элементом для представления уровня взаимного критериев в МАИ является

матрица парных сравнений [5-7]:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где a_{ij} – число, которое показывает во сколько раз вес критерия A_i больше веса критерия A_j .

Матрицы парных сравнений можно формировать как на основе реальных измерений, так и с помощью фундаментальной шкалы Саати [5-7] (см. табл. 1).

Таблица 1

Фундаментальная шкала Саати	
Относительная важность	Определение
1	Равная важность
3	Заметное преимущество одного над другим
5	Существенное преимущество
7	Значительное преимущество
9	Очень сильное преимущество
2, 4, 6, 8	Промежуточная оценка между двумя соседними

Когда нет количественных оценок сравниваемых элементов, а есть только качественные характеристики, по фундаментальной шкале относительную важность a_{ij} элемента i над элементом j того же уровня иерархии можно экспертно выразить натуральным числом от 1 до 9 или обратным числом (в порядке уменьшения 1, 1/2, ..., 1/9). При этом матрица парных сравнений в соответствии с МАИ должна удовлетворять следующим требованиям:

1) все элементы матрицы парных сравнений A неотрицательны, а ее диагональные элементы равны единице, т.е. $a_{ij} > 0$, $a_{ii} = 1$ для всех номеров $i, j = 1, 2, \dots, n$;

2) Матрица парных сравнений обратнo симметрична, т.е. $a_{ij} = 1/a_{ji}$ для всех номеров $i, j = 1, 2, \dots, n$;

3) матрица парных сравнений совместима, т.е. равенства $a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj}$ имеют место для всех номеров $i, j = 1, 2, \dots, n$;

4) весовой вектор $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ является собственным вектором, который соответствует максимальному собственному значению λ_{\max} матрицы A .

Неполнота знаний эксперта о свойствах объекта приводит к несогласованности данных. Для оценки несогласованности экспертных оценок определяют индекс согласованности I и

отношение согласованности R [5-7].

Индекс согласованности – количественная оценка противоречивости результатов сравнения, который дает информацию о степени нарушения согласованности:

$$I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (2)$$

где n – размер матрицы.

Отношение согласованности определяется по формуле:

$$R = \frac{I}{I^*}, \quad (3)$$

где I^* – среднее значение индекса случайной согласованности, который представляет собой индекс согласованности, сгенерированный случайным образом по шкале от 1 до 9 обратнo симметричной матрицы с соответствующими обратными величинами.

В работе [5] автором определены средние значения I^* для матриц, включающих до 15 критериев сравнения. Средние значения случайного индекса согласованности в зависимости от размерности матрицы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Среднее значение индекса согласованности I^* в зависимости от размера матрицы n

n	1	2	3	4	5	6	7	8
I^*	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41
n	9	10	11	12	13	14	15	–
I^*	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59	–

Значения $R \leq 0,1$ считаются приемлемыми. В противном случае требуется процедура пересмотра суждений [5-7].

Если матрицы парных сравнений формируются на основе реальных измерений, то в такой ситуации измеренные значения можно пересчитать в значения, определяемые шкалой Т. Саати (см. табл. 1), по формулам:

$$a_i = 1 + 8 \cdot \frac{b_i - \inf(B)}{\sup(B) - \inf(B)}, \quad (4)$$

$$a_i = 9 - 8 \cdot \frac{b_i - \inf(B)}{\sup(B) - \inf(B)}, \quad (5)$$

где a_i – новые значения альтернатив в шкале Саати, $a_i \in (1 \dots 9)$;

B – множество значений альтернатив в исходной шкале;

b_i – значения альтернатив в исходной шкале, $b_i \in B$;

$\inf(B)$, $\sup(B)$ – нижняя и верхняя граница множества B соответственно.

Формула (4) применяется в том случае, когда нижняя граница значений в исходной шкале соответствует нижней границе значений в шкале Саати, т.е. $\inf(B) \hat{=} 1$. В противном случае, когда $\inf(B) \hat{=} 9$, применяется формула (5).

Матрицы парных сравнений в этом случае обязательно будут согласованными.

Результатом обработки матрицы парных сравнений является нормализованный вектор приоритетов \mathbf{P} , элементы которого определяются по формуле:

$$p_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad p_i \in \mathbf{P}, \quad (6)$$

где V_i – среднее геометрическое значение приоритета, определяемое выражением:

$$V_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}. \quad (7)$$

При этом собственное значение матрицы λ_{\max} определяется как

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot p_i, \quad p_i \in \mathbf{P}. \quad (8)$$

Следует отметить, что в случае идеально согласованной матрицы ее собственное значение соответствует размерности матрицы, т.е. $\lambda_{\max} = n$.

Процесс определения глобальных приоритетов для альтернативы i можно интерпретировать как величину полезности β_j

$$\beta_j = \sum_{i=1}^n p_i \cdot k_{ij}, \quad p_i \in \mathbf{P}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (9)$$

где k_{ij} – относительная значимость альтернативы j с учетом значимости критерия i .

Таким образом, глобальный приоритет определяется как сумма частных приоритетов. Рассчитанные глобальные приоритеты представляют собой веса относительно целевых критериев. Они характеризуют альтернативы, которые учитываются на низком уровне, по оценке ЛППР и способствуют достижению главной цели.

Результаты

Рассмотрим процедуру оценки и выбора рациональной конструкции путевого развития методом анализа иерархий на конкретном примере.

К приемо-отправочному парку железнодорожной станции, состоящему из 5 путей примыкает двухпутная линия. Имеется несколько вариантов схемы путевого развития станционной горловины, которые представлены на рис. 3.

Каждый из приведенных вариантов отличается геометрическими размерами, количественными характеристиками и качественными показателями, которые можно использовать в качестве критериев при поиске рациональной схемы путевого развития станционной горловины.

Следует отметить, что сравниваемые варианты проектных решений являются однородными, т.к. имеют одинаковое количество путей в парке и на подходе к станции. Если сравнивать неоднородные схемы, то полученное решение будет необъективным.

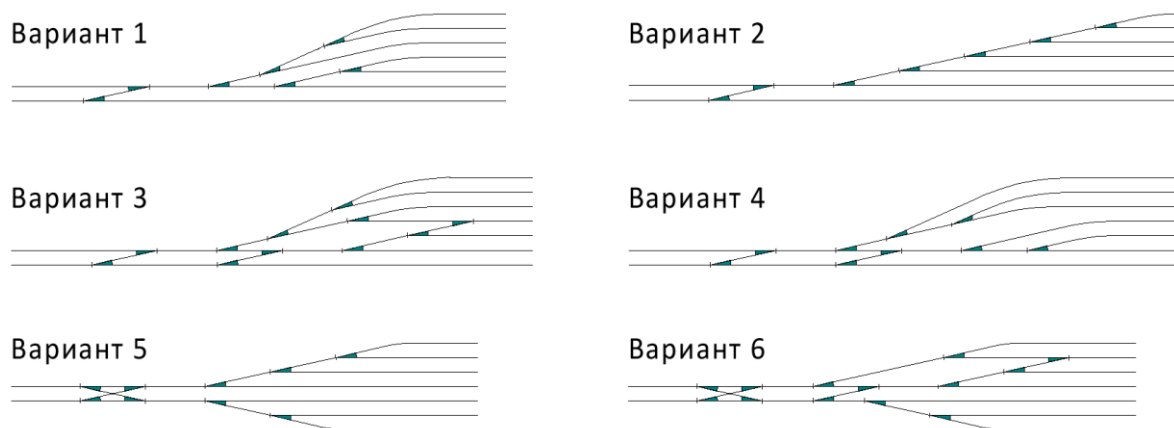


Рис. 3. Варианты схемы путевого развития станционной горловин

В качестве критериев сравниваемых альтернатив (вариантов схемы путевого развития) приняты количество стрелочных переводов $N_{сп}$, строительная длина путей L_c , максимальное количество одновременных перемещений в горловине станции N_n , среднее количество стрелочных переводов по маршруту движения $M[n_{сп}]$, среднее значение суммы углов поворота от стрелок и кривых по маршруту движения $M[\phi]$, среднее значение длины маршрута движения $M[l_M]$. Указанные критерии определены с использованием методики, рассмотренной в [3-4], а их значения по вариантам представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значение критериев альтернатив

схема	Критерии					
	$N_{сп}$, шт	L_c , км	N_n , шт	$M[n_{сп}]$, шт	$M[\phi]$, град.	$M[l_M]$, м
1	7	1263,53	1	3,89	23,78	244,00
2	7	1649,78	1	4,91	24,09	280,29
3	11	1238,04	2	5,00	27,47	283,41
4	9	1375,27	2	4,50	25,01	289,70
5	9	1161,06	2	4,00	22,82	215,10
6	13	1194,48	2	5,40	24,40	271,82

Матрица парных сравнений по каждому критерию формируется таким образом, чтобы в каждой ячейке матрицы были записаны отношения значений критерия сравниваемых альтернатив. Для примера на рис. 4 представлена матрица парных сравнений альтернатив по критерию $N_{сп}$.

$N_{сп}$	1	2	3	4	5	6
1	1	7/7	11/7	9/7	9/7	13/7
2	7/7	1	11/7	9/7	9/7	13/7
3	7/11	7/11	1	9/11	9/11	13/9
4	7/9	7/9	11/9	1	9/9	13/9
5	7/9	7/9	11/9	9/9	1	13/9
6	7/13	7/13	9/13	9/13	9/13	1

inf(B)	7/13	7/13	9/13	9/13	9/13	13/9
sup(B)	7/7	7/7	11/7	9/7	9/7	13/7

Рис. 4. Матрица парных сравнений для критерия $N_{сп}$

Для того, чтобы привести полученные в матрице парных сравнений оценки к шкале Саати, необходимо воспользоваться формулой (4). При этом для матрицы парных сравнений по критерию N_n необходимо использовать форму-

лу (5), т.к. альтернатива считается лучшей при большем значении N_n . Результаты приведения оценок матрицы парных сравнений альтернатив по критерию $N_{сп}$ к шкале Саати, а также значения нормализованного вектора приоритетов **P** приведены на рис. 5.

$N_{сп}$	1	2	3	4	5	6	вектор приор.	вектор P
1	1	1	9	6	6	9	3,7798	0,3791
2	1	1	9	6	6	9	3,7798	0,3791
3	1/9	1/9	1	1/4	1/4	3	0,3637	0,0365
4	1/6	1/6	4	1	1	5	0,9067	0,0909
5	1/6	1/6	4	1	1	5	0,9067	0,0909
6	1/9	1/9	1/3	1/5	1/5	1	0,2341	0,0235
Σ	2,56	2,56	27,33	14,45	14,45	32,00	9,97	

Рис. 5. Матрица парных сравнений и нормализованный вектор приоритетов **P** для критерия $N_{сп}$

Полученные в табл. 5 результаты сравнения альтернатив показывают, что наиболее рациональными схемами по критерию $N_{сп}$ являются варианты 1 и 2, для которых значения приоритетов равны 37,91 %. Это вполне закономерно, т.к. указанные варианты проектных решений используют наименьшее число стрелочных переводов ($N_{сп} = 7$).

Аналогичным образом формируются матрицы парных сравнений и рассчитываются нормализованные приоритеты для других критериев. Результаты расчетов представлены в графическом виде на рис. 6.

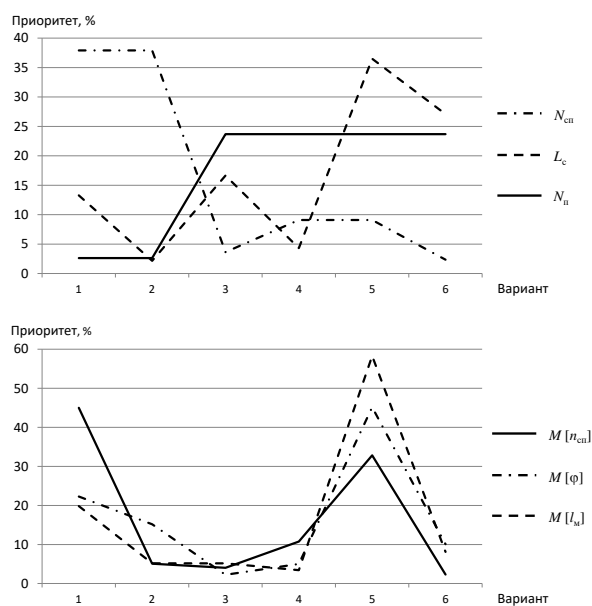


Рис. 6. Распределение нормализованных приоритетов по вариантам

Для проверки противоречивости результатов суждений рассчитаны собственные значения матриц парных сравнений λ_{\max} , индексы согласованности I , а также отношения согласованности R . Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты проверки противоречивости матриц парных сравнений

Критерий	λ_{\max}	I	I^*	R	Вывод
$N_{сп}$	6,31	0,06	1,24	0,05	не противоречит
L_c	6,40	0,08	1,24	0,06	не противоречит
$N_{п}$	6,00	0,00	1,24	0,00	не противоречит
$M [n_{сп}]$	6,43	0,09	1,24	0,07	не противоречит
$M [\phi]$	6,32	0,06	1,24	0,05	не противоречит
$M [I_M]$	6,59	0,12	1,24	0,09	не противоречит

На заключительном этапе определяется глобальный вектор приоритетов альтернатив \mathbf{W} , исходными данными которого являются нормализованные векторы \mathbf{P} по всем критериям. Результаты расчета приведены на рис. 7.

схема	$N_{сп}$	L_c	$N_{п}$	$M[n_{сп}]$	$M[\phi]$	$M[I_M]$	вектор приор.	вектор \mathbf{P}
1	0,379	0,133	0,026	0,450	0,223	0,198	0,1725	0,2285
2	0,379	0,022	0,026	0,051	0,152	0,052	0,0664	0,0880
3	0,036	0,166	0,237	0,040	0,023	0,052	0,0638	0,0845
4	0,091	0,043	0,237	0,108	0,050	0,034	0,0746	0,0988
5	0,091	0,365	0,237	0,328	0,452	0,583	0,2965	0,3928
6	0,023	0,271	0,237	0,023	0,101	0,081	0,0811	0,1074
Σ							0,7549	

Рис. 7. Распределение нормализованных приоритетов по вариантам

Таким образом, после выполненного анализа числовых оценок сравниваемых проектных решений, очевидно, что вариант № 5 схемы путевого развития станционной горловины является наиболее предпочтительным, т.к. имеет наибольший приоритет $R_5 = 39,28\%$. При этом худшим вариантом является вариант № 3 с приоритетом $R_3 = 8,45\%$.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна заключается в том, что процедура выбора рациональной схемы путевого развития железнодорожной станции из множества вариантов формализована как многокритериальная задача, для решения которой использован метод анализа иерархий.

Практическая значимость представленной методики позволит расширить диапазон рассматриваемых конкурентных вариантов схем путевого развития железнодорожных станций и повысить объективность их сравнительного анализа не только с учетом конструктивных особенностей, но и с учетом качественных показателей.

Выводы

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Конструктивные характеристики, геометрические параметры и качественные показатели сравниваемых конкурентных схем путевого развития железнодорожных станций могут значительно отличаться по вариантам, что делает задачу выбора рационального проектного решения многокритериальной.

2. Осуществлять выбор рациональной конструкции путевого развития станций целесообразно с использованием количественных оценок (приоритетов), учитывающих конструктивные и качественные характеристики проектных решений. Указанные приоритеты можно получить с использованием метода анализа иерархий.

3. При анализе множества схем путевого развития станции важно, чтобы сравниваемые варианты были однородными, т.к. это условие оказывает значительное влияние на объективность выбора рационального проектного решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДБН В.2.3-19-2008. Споруди транспорту залізниць колії 1520 мм: норми проектування. – К.: Мінрегіонбуд, 2008. – 126 с.
2. Бобровский, В. И. Модели, методы и алгоритмы автоматизированного проектирования железнодорожных станций: монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин. – Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2010. – 156 с.
3. Малашкин, В. В. Комплексна оцінка конструкції колійного розвитку залізничних станцій на основі методів теорії прийняття рішень / В. В. Малашкин, Р. В. Вернигора // Транспортні системи і технології перевезень. – 2012. – Вип. 3. – С. 25-30.
4. Малашкин, В. В. Інтелектуальна система кількісної оцінки конструкції колійного розвитку залізничних станцій / В. В. Малашкин // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип. : Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 11 (1120). – С. 128-134.
5. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – Москва: Радио и связь, 1993.

– 320 с.

6. Саати, Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т. Саати. – Изд. 3-е / пер. с англ. – Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». – 2011. – 360 с.

7. Му, Е. Practical Decision Making / Е. Му, М. Pereyra-Rojas : DOI 10.1007/978-3-319-33861-3

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф Огарем А. Н. (Украина)

Поступила в редколлегию 20.12.2018.

Принята к печати 22.12.2018.

В. В. МАЛАШКІН, М. І. БЕРЕЗОВИЙ, І. Я. СКОВРОН

ДО ПИТАННЯ ПРО ОЦІНКУ КОНСТРУКЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ

Мета роботи полягає в розробці методів комплексної оцінки варіантів конструкції колійного розвитку залізничних станцій і їх порівняльного аналізу для вибору найбільш раціонального проектного рішення на основі сучасних математичних методів. **Методика.** Для вирішення поставленої задачі використані методи статистичного аналізу, теорії графів і теорії прийняття рішень. **Результати.** Отримано конструктивні характеристики і якісні показники різних схем колійного розвитку станційної горловини. В результаті порівняльного аналізу розглянутих варіантів проектних рішень визначені їх числові оцінки (пріоритети), на підставі яких обрана найбільш раціональна схема колійного розвитку залізничної станції. **Наукова новизна** полягає в тому, що процедура вибору раціональної схеми колійного розвитку залізничної станції з безлічі варіантів формалізована як багатокритеріальна задача, для вирішення якої використаний метод аналізу ієрархій. **Практична значимість** представленої методики дозволить розширити діапазон конкурентних варіантів схем колійного розвитку залізничних станцій, що розглядаються, і підвищити об'єктивність їх порівняльного аналізу не тільки з урахуванням конструктивних особливостей, а й з урахуванням якісних показників.

Ключові слова: залізнична станція; колійний розвиток; кількісна оцінка; метод аналізу ієрархій.

V. MALASHKIN, N. BEREZOVYI, I. SKOVRON

TO THE QUESTION ABOUT THE ASSESSMENT OF THE CONSTRUCTION OF RAILWAY STATIONS

The purpose of the work is to develop methods for the integrated assessment of design options for railroad track development and their comparative analysis to select the most rational design solution based on modern mathematical methods. **Methodology.** To solve the problem, the methods of statistical analysis, graph theory and decision theory are used. **Findings.** The constructive characteristics and quality indicators of various schemes of the station track development were obtained. As a result of a comparative analysis of the considered variants of design decisions, their numerical estimates (priorities) were determined, on the basis of which the most rational scheme of track development of the railway station was chosen. **The originality** lies in the fact that the procedure for choosing a rational scheme for the track development of a railway station from a variety of options is formalized as a multi-criteria task, for solving which the hierarchy analysis method is used. **The practical value** of the presented methodology will allow expanding the range of considered competitive options for railroad track development schemes and increasing the objectivity of their comparative analysis not only taking into account design features, but also taking into account quality indicators.

Keywords: railway station; track development; quantitative assessment; hierarchy analysis method.