

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2021, №4, Том 8 / 2021, N 4, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-4-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/03SATS421.pdf>

DOI: 10.15862/03SATS421 (<https://doi.org/10.15862/03SATS421>)

Метод установления очередности замены металлических пролетных строений мостов с использованием прочностных, экономических и эксплуатационных критериев

Феоктистова Е.П.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Феоктистова Елена Павловна, e-mail: feok_ep@mail.ru

Аннотация. В статье изложена проблема, возникающая при введении в обращение железнодорожных составов с повышенными осевыми нагрузками на мостах с пролетными строениями, запроектированными по старым расчетным нормам. На железных дорогах эксплуатируются клепаные металлические пролетные строения мостов, требующие замены из-за значительных коррозионных, механических и усталостных повреждений, из-за недостаточной грузоподъемности и остаточного усталостного ресурса для пропуска перспективной нагрузки. Пролетные строения, запроектированные в 30–40-х годах, находятся более 80–90 лет в условиях относительно тяжелого режима работы. При длительной эксплуатации в элементах и соединениях происходят процессы, приводящие к появлению и развитию различных повреждений и отказов разной степени опасности. Необходимо решать вопрос о дальнейшей эксплуатации старых пролетных строений мостов и их замене.

Автором применена методика анализа системы критериев с учетом экономических и технических

возможностей для определения очередности замены пролетных строений. Предложена совокупность критериев для решения данной задачи в цифровом виде. Составлены матрицы попарных сравнений, сравнение выполнено с использованием шкалы относительной важности с определением значимости критериев. Для каждой матрицы попарных сравнений методами линейной алгебры рассчитаны значения компонент собственного вектора матрицы — локальные приоритеты. В результате расчетов по предложенным критериям получены глобальные приоритеты для вариантов замены клепаных металлических пролетных строений старых норм проектирования. Математический аппарат метода иерархии критериев несложен для применения, позволяет получить решение в цифровом виде, можно использовать другие критерии.

Ключевые слова: металлические пролетные строения; грузоподъемность; долговечность; усталостные трещины; ресурс; метод иерархии критериев; глобальный приоритет

Determination method for metal bridge superstructure replacement priority using strength, economic and operational criteria

Elena P. Feoktistova

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Corresponding author: Elena P. Feoktistova, e-mail: feok_ep@mail.ru

Abstract. The article describes the problem arising from the setting trains with increased axleloads into operation on bridges with superstructures, engineered according to the old design standards. On the railways used riveted metal bridge superstructures, which require replacement due to significant corrosion, mechanical and fatigue damage, due to insufficient carrying load and residual fatigue life to pass the prospective load. Superstructures, designed in the 30s-40s, are more than 80-90 years used in conditions of a relatively difficult operation. During long-term operation, processes occur in elements and joints that lead to the formation and development of various hazard degrees damages, and failures. It is necessary to resolve the further exploitation issue of old bridge superstructures and their replacement.

The author has applied the analyzing method of the criteria system, with the account of economic and technical capabilities for replacement priority

determination of bridge superstructures. A set of criteria were proposed for solving this problem in digital form. Compiled matrices of pair-wise comparison, the comparison was performed using a relative importance scale with the test significance determination. By the linear algebra methods the eigenvector of matrix components values — local priorities — are calculated for each pair-wise comparisons matrix. As a result of calculations by the proposed criteria, were obtained global priorities for replacing options for riveted metal superstructures made by old design standards. The mathematical apparatus of the criteria hierarchy method is easy to use and allows you to get a solution in digital form, you can use other criteria.

Keywords: metal superstructure; carrying load; durability; fatigue cracks; resource; criteria hierarchy method; global priority

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

На железных дорогах эксплуатируются клепаные металлические пролетные строения мостов, требующие замены из-за значительных коррозионных, механических и усталостных повреждений, из-за недостаточной грузоподъемности и остаточного усталостного ресурса для пропуска перспективной нагрузки.

По мостовым нормам начала прошлого и конца позапрошлого века нагрузки при проектировании мостов предполагались без увеличения на будущее, низкие допускаемые напряжения в то время принимали из-за недостаточной изученности материала. Преднамеренное создание запасов по грузоподъемности мостов на перспективу было заложено в мостовых нормах за счет снижения допускаемых напряжений и введения перспективных нагрузок Н7 и Н8, практически введено с 1931 года [1].

Допускаемые напряжения для стали Ст 3 и литого железа старых эксплуатируемых мостов были повышены до 130 Мпа, а с 1947 г. до 140 Мпа. С 1985 г. расчет грузоподъемности эксплуатируемых мостов также ведут по предельным состояниям, принимая расчетное сопротивление для малоуглеродистой стали равным 190 Мпа.

Расчетная грузоподъемность старых металлических мостов, изготовленных по различным нормам, зависит не только от принимаемых при проектировании допускаемых напряжений и нагрузок. Также оказывает влияние особенности расчета и проектирования по действующим нормам — учет динамики, коэффициенты сочетания нагрузок, способы загрузки линий влияния, учет ветровой и тормозной нагрузки, проверка на выносливость и другие факторы. Нагрузка С14 была введена для проектирования новых мостов в 1962 г. [2]. Для эксплуатируемых железнодорожных мостов при оценке грузоподъемности классы элементов по прочности, устойчивости и выносливости рассчитывают в классах нагрузки С1 с 2015 г.

Клепаные железнодорожные пролетные строения, изготовленные по типовым проектам 1931–1933 гг. Гипротранса НКПС и Проектстальконструкции 40-х годов, являются более надежными и грузоподъемными по сравнению с применяемыми до 1931 г. Пролетные строения проектировались под нагрузку Н7 и Н8. Пролетные строения расчетными пролетами 33–66 м при отсутствии повреждений даже не требуют усиления для переустройства мостового полотна на деревянных поперечинах на безбалластные железобетонные плиты. Пролетные строения пролетами 77–144,8 м при расчете по прочности обеспечивают пропуск современной нагрузки, но могут не соответствовать II категории

грузоподъемности (пропуск поездов с вагонной нагрузкой интенсивностью 105 кН/м) при расчете на сочетание временных вертикальных и горизонтальных тормозной и ветровой нагрузки [3].

Пролетные строения, запроектированные в 30–40-х годах под нагрузки Н7 и Н8, находятся более 80–90 лет в условиях относительно тяжелого режима работы. При эксплуатации в элементах и соединениях происходят процессы, приводящие к появлению и развитию различных повреждений и отказов разной степени опасности и скорости развития до критической стадии.

Расстройство заклёпочных соединений возникает, в основном, в таких типах прикреплений и элементах как прикрепление продольных балок к поперечным, раскосам, подвескам главных ферм пролетных строений. Расстройство заклёпочных соединений имеет тенденцию к росту с увеличением срока эксплуатации и вызывает увеличение концентрации напряжений у кромок заклёпочных соединений, в связи с чем повышается скорость накопления усталостных повреждений и вероятность появления и развития усталостных трещин.

Одним из наиболее опасных и прогрессирующих видов отказов являются усталостные трещины, которые были обнаружены в элементах металлических мостов, в том числе и в элементах клепаных пролетных строений. Массовое появление усталостных трещин в 60-х годах прошлого столетия было отмечено в раскосах главных ферм пролетных строений с ездой поверху $l_p = 33,6$ м, изготовленных по типовым проектам Гипротранса 1931–1933 гг., рассчитанных под нагрузку Н7. В других пролетных строениях, изготовленных по типовым проектам 1931–1933 гг. Гипротранса и рассчитанных под нагрузки Н7 и Н8, усталостных разрушений в массовом виде пока не отмечалось [3]. Коррозионные повреждения пролетных строений уменьшают не только несущую способность элементов пролетных строений, но и снижают сопротивляемость металла усталости.

Расчетами установлено, что некоторые элементы главных ферм пролетных строений Гипротранса и Проектстальконструкции, запроектированных под нагрузку Н7, имеют сравнительно низкий остаточный усталостный ресурс при введении в обращение перспективной нагрузки. Усиление методом замены заклепок на высокопрочные болты позволяет повысить ресурс по выносливости и увеличить срок службы до 30 лет пока не будет решен вопрос о полной замене этих пролетных строений.

Есть проблема обеспечения безопасной эксплуатации старых пролетных строений до их замены. Эту задачу можно решить путём сочетания работ по замене в первую очередь наиболее слабых пролетных

строений с усилением и ремонтом более надёжных с целью продления срока их эксплуатации до их замены. При этом должна устанавливаться очередность не только замены пролетных строений, но и их усиления и ремонта.

Основные положения метода анализа иерархии критериев для принятия решений

The main provisions of the criteria hierarchy analysis method for decision making

Для определения очередности замены пролетных строений автором предлагается использовать методику анализа системы критериев [4–6] с учетом экономических и технических возможностей. Под системой критериев понимается взаимосвязанная совокупность критериев, необходимая и достаточная для решения данной задачи. Иерархия критериев определяется числом уровней, конкретным перечнем критериев на каждом уровне и связями между ними, включает:

- первый уровень, на котором фиксируется глобальная цель;
- второй уровень, на котором указываются основные критерии, используемые для аспектов глобальной цели;
- третий уровень, на котором фиксируются критерии, уточняющие понимание сути критериев, расположенных на втором уровне;
- при необходимости формируется четвертый, пятый и другие уровни, которые детализируют содержание соответствующих критериев, расположенных на третьем, четвертом и других предыдущих уровнях;
- на самом последнем уровне фиксируются возможные варианты.

Для выявления относительной значимости каждого критерия в группе, связанной с одним и тем же критерием, расположенном на предыдущем уровне, выполняется процедура попарных сравнений критериев. Выполнение процедуры начинается с критериев, расположенных на втором уровне. Их значимость определяется по отношению к глобальной цели. Затем анализируется группа критериев третьего уровня по отношению к соответствующему критерию второго уровня. Далее процесс сравнений продолжается на третьем уровне, затем на четвертом и т. д.

Ввиду того, что критерии имеют, как правило, разную природу и размерности, их попарное сравнение может быть осуществлено лишь с использованием шкалы относительной важности. При составлении матриц попарных сравнений используется шкала, предложенная Г.Л. Саати [4], по 9-бальной системе в соответствии с качественной оценкой.

- 1 — равная важность критериев;
- 3 — умеренное превосходство одного над другим;
- 5 — существенное или сильное превосходство;
- 7 — значительное превосходство;
- 9 — очень сильное превосходство;
- 2, 4, 6, 8 — промежуточные решения между суждениями.

Попарное сравнение всех критериев между собой приводит к образованию матриц попарных сравнений. Матрицы квадратные, с единичной диагональю, обратносимметричны. Размерность матрицы равна числу сравниваемых критериев.

Матрицы составляются в следующей последовательности. Начиная с первого уровня для каждого критерия, расположенного на вышестоящем уровне «Y», выписываются последовательности критериев, расположенные на нижестоящем уровне и связанные с рассматриваемым критерием. Эти последовательности критериев используются далее как названия столбцов и строк матрицы. Общий вид матрицы представлен в таблице 1. [4].

Таблица 1 / Table 1

Матрица попарных сравнений
Pair-wise comparison matrix

Рассматриваемый критерий K на уровне «Y» (K_0) The considered criteria K at the "Y" level (K_0)	Последовательность критериев, взятых с уровня «Y + 1», связанных с рассматриваемым критерием на уровне «Y» A criteria sequence is taken from the "Y + 1" level associated with the criteria under consideration at the "Y" level					
	K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{14}	...	K_{1L}
K_{11}	1	w_{11}/w_{12}	w_{11}/w_{13}	w_{11}/w_{14}	...	w_{11}/w_{1L}
K_{12}	w_{12}/w_{11}	1	w_{12}/w_{13}	w_{12}/w_{14}	...	w_{12}/w_{1L}
K_{13}	w_{13}/w_{11}	w_{13}/w_{12}	1	w_{13}/w_{14}	...	w_{13}/w_{1L}
K_{14}	w_{14}/w_{11}	w_{14}/w_{12}	w_{14}/w_{13}	1	...	w_{14}/w_{1L}
...	1	...
K_{1L}	w_{1L}/w_{11}	w_{1L}/w_{12}	w_{1L}/w_{13}	w_{1L}/w_{14}	...	1

В таблице 1 использованы обозначения:

Y — уровень иерархии;

K_{ij} — критерий;

w_{ij} — абсолютная важность критерия K_{ij} ;

i — номер

рассматриваемого критерия;

j — порядковый номер критерия,

связанного с критерием K_{ij} .

In table 1 the employed designations are:

Y — hierarchy level;

K_{ij} — criteria;

w_{ij} — the K_{ij} criteria absolute importance;

i — considered criteria number;

j — the criteria ordinal number associated with the K_{ij} criteria

Матрица попарных сравнений обратносимметрична относительно единичной диагонали, что вытекает из процедуры сравнений: если, например, некоторый критерий имеет значимость в 5 раз большую, чем

другой критерий, то сравнивая в обратном порядке второй критерий с первым важность второго критерия составит 1/5.

Каждая сформированная матрица попарных сравнений должна быть проверена на согласованность использованных оценок отношений сравнения.

Если проверка удовлетворяется, то матрица используется в дальнейшей работе. В противном случае ее корректируют путем проверки отношений сравнения. При этом индекс согласованности равен:

$$IC = (L_{max} - m) / (m - 1) \leq m,$$

где m — размерность матрицы;

L_{max} — собственное значение матрицы.

Оценка согласованности

$$OC = IC / S \leq 0,1,$$

где S — значение случайной согласованности [7].

Значение величин случайной согласованности S в зависимости от порядка матрицы приведено в таблице 2 [7].

Таблица 2 / Table 2

Случайная согласованность матрицы
Random Matrix Consistency

m	3	4	5	6	7	8	9	10
S	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Локальный приоритет — количественная оценка значимости критериев, рассматриваемых в составе одной группы по отношению к вышестоящему критерию, с которым данная группа связана. Для каждой матрицы попарных сравнений нужно вычислять указанные локальные приоритеты. Процедура вычисления локальных приоритетов сводится к определению нормированных значений компонент собственного вектора матрицы.

Для определения максимального собственного значения матриц попарных сравнений можно использовать различные математические методы. Наиболее быстрый результат дает метод геометрических средних [7; 8].

Максимальное собственное число по этому методу:

$$L_{max} = V_1 * P_1 + V_2 * P_2 + \dots + V_m * P_m V_1$$

где V_1, V_2, \dots, V_m суммы значений по столбцам матрицы;

P_1, P_2, \dots, P_m — нормированные значения компонент собственных векторов:

$$P_i = (A_{i1} * A_{i2} * 1 * \dots * A_{im})^{1/m} / \sum_i a_i,$$

где a_i — компонент собственного вектора:

$$a_i = (A_{i1} * A_{i2} * 1 * \dots * A_{im})^{1/m},$$

$A_{ij} = w_{ij}/w_{ji}$ — член матрицы попарных сравнений.

Глобальные приоритеты вычисляются по локальным приоритетам. Значения глобального приоритета для варианта D равны:

$$IP(D) = P_{11}(D) * P_1 * P_{11} + P_{12}(D) * P_1 * P_{12} + \dots$$

В результате будут получены глобальные приоритеты для всех вариантов, сумма которых равна 1 [9].

Модификации метода анализа иерархий, представленные в работах [10–14], основываются на использовании теории «нечетких» множеств как альтернативы детерминированным числам и множествам. Работа [10] содержит информацию, позволяющую сузить рассматриваемый спектр нечетких множеств и формализовать арифметические операции над ними.

В статье [11] предложена вариация метода анализа иерархий с применением нечетких множеств, для построения вектора весов задача поиска приоритетов сводится к задаче линейного программирования. В [12] представлен еще один способ, в котором задача поиска вектора приоритетов сведена к решению задачи нелинейной оптимизации и проанализированы различные подходы поиска требуемых экстремумов. В работе [13] представлена модификация метода анализа критериев с использованием нечетких чисел треугольного типа.

В данной статье автором использованы более простые методы линейной алгебры с упрощенным методом геометрических средних для определения собственных векторов матриц сравнения.

Расчеты по методу анализа системы критериев для принятия решений по очередности замены пролетных строений

Calculations by the criteria system analysis method for making decisions on bridge superstructure replacement priority

В качестве системы критериев взята их совокупность, необходимая для оценки наиболее рациональной очередности замены пролетных

строений. Иерархия критериев включает несколько уровней. Система критериев показана в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Система критериев
System of criteria

K_0 — очередность замены пролетных строений K_0 — bridge superstructure replacement priority												
K_1				K_2				K_3			K_4	
K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{14}	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}	K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{41}	K_{42}
Варианты: Options:		Замена пролетных строений моста «D» Bridge superstructure replacement "D"			Замена пролетных строений моста «B» Bridge superstructure replacement "B"			...			Замена пролетных строений моста «C» Bridge superstructure replacement "C"	

Разработано автором / Developed by the author

Первый уровень соответствует глобальной цели K_0 — очередности замены пролетных строений.

Выбраны критерии для определения приоритетов. Второй уровень включает основные критерии:

K_1 — обеспечение безопасности движения современных и перспективных поездов;

K_2 — затраты на реконструкцию и эксплуатацию пролетных строений, при разной длине пролетов затраты нужно отнести к 1 тонне металлоконструкций;

K_3 — трудоемкость реконструкции;

K_4 — соответствие эксплуатационным требованиям на сети железных дорог.

Третий уровень объединяет критерии $K_{11} - K_{42}$, уточняющие понимание сути критериев, расположенных на втором уровне:

K_{11} — обеспечение несущей способности по прочности (категория моста по грузоподъемности);

K_{12} — обеспечение ресурса по выносливости;

K_{13} — соответствие деформаций, колебаний нормам (по II предельному состоянию);

K_{14} — соответствие габариту приближения строений «С»;

K_{21} — стоимость изготовления, доставки и монтажа новых пролетных строений;

K_{22} — стоимость работ по усилению и ремонту старых пролетных строений;

K_{23} — расходы, связанные с ограничениями эксплуатации при усилении и ремонте;

K_{24} — увеличение эксплуатационных расходов отремонтированных и усиленных пролетных строений по сравнению с новыми;

K_{31} — наличие пролетных строений для замены данного пролета, транспортабельность для перевозки;

K_{32} — возможность организации окон для замены пролетных строений;

K_{33} — технологичность монтажа новых ферм при реконструкции моста;

K_{41} — приспособленность к ремонту старых пролетных строений;

K_{42} — доступность для периодического обследования и осмотра старых пролетных строений.

На последнем уровне рассматриваются варианты замены пролетных строений на разных мостах, для которых надо решить вопрос об очередности.

При составлении системы критериев учтены экономические, технологические и социальные аспекты. Последовательность перечисления критериев в одном уровне значения не имеет.

Для выявления относительной значимости каждого критерия выполняется процедура попарных сравнений критериев. Сравниваются критерии K_{11} - K_{14} по отношению к K_1 ; K_{21} - K_{14} к K_2 ; K_{31} - K_{33} к K_3 ; K_{41} - K_{42} к K_4 .

Попарное сравнение всех критериев сводится в матрицы попарных сравнений. Каждый член матрицы сравнений A_{ij} (i — номер строки, j — столбца) соответствует относительной важности критерия K_i по отношению к критерию K_j .

Если при сравнении показателей, например, $A_{ij} = 3$, то $A_{ji} = 0,33$, т. е. обратной величине.

Величина глобального приоритета для каждого из вариантов определит очередность замены. В первую очередь необходимо заменять пролетные строения моста, соответствующего варианту с самым большим значением IP.

При использовании этой методики в практических целях необходимо заполнить матрицы попарных сравнений по критериям K_{11} - K_{42} и рассчитать максимальные собственные значения матриц и глобальные приоритеты.

При этом по каждому критерию надо сравнивать варианты (в баллах), отдавая преимущество тому варианту, который в первую очередь нуждается в замене, присваивая ему больший балл.

Рассмотрим 3 варианта замены пролетных строений мостов D, B, C. Число мостов для сравнения может быть любым, их количество определит порядок матриц попарных сравнений последнего уровня при критериях K_{11} — K_{42} . Определим глобальные приоритеты для мостов D, B, C. При заполнении матриц попарных сравнений по критериям K_{11} — K_{42} преимущество к замене дается мосту, на котором по данному критерию необходимо быстрее заменить пролетные строения. Для удобства вычислений сначала заполняем таблицу критериев. Рассмотрим критерии:

K_{11} . Мост D имеет V категорию по грузоподъемности, B — III, C — IV. Преимущество моста D к замене существенней, чем у B, а у C превосходит B. В баллах заполняется в таблице для критерия K_{11} . столбец для D — 5, B — 1, C — 3 балла.

Тогда в матрице попарных сравнений 1-ая строка будет определяться по отношению баллов варианта D к другим: $5:5 = 1$, $5:1 = 5$, $3:1 = 3$, строка: (1, 5, 3).

Вторая строка матрицы определяется по варианту B к остальным. Члены строки равны отношению балла варианта B к остальным. В матрице сравнения числа, большие 1 должны быть целыми, поэтому при отношении показателей $5:3$ принимается 2.

K_{12} . Мосты D и C имеют усталостные повреждения, их остаточный ресурс по выносливости невелик, мост B имеет мало усталостных повреждений.

K_{13} . Мосты D, B, C имеют деформации в пределах нормы.

K_{14} . Мосты D, B, C соответствуют габариту “С”.

K_{21} . По стоимости изготовления, доставки конструкций и монтажу экономичен мост D.

K_{22} . Стоимость работ по усилению и ремонту, если не осуществлять замену меньше всего у моста B, выше всего у C и D, т. е. для моста D больше оснований к замене.

K_{23} . Наибольшие расходы, связанные с ограничением эксплуатации при ремонте у моста C, затем B и D.

K_{24} . Эксплуатационные расходы выше после ремонта на мосту D, чем на C и на мосту B.

K_{31} . По наличию пролетных строений и доставке значительный приоритет у моста B, затем D и нет в наличии у C.

K_{32} . Возможность организации окон удобней на мосту D, чем на мостах B и C.

K_{33} . Технология и удобство монтажа одинаковы.

K_{41} . Приспособленность к текущему ремонту существенней у варианта B, а у моста C имеет умеренное преимущество по сравнению с вариантом D.

K_{42} . Доступность для периодического осмотра у варианта C имеет преимущество.

Таблица показателей по вариантам замены пролетных строений мостов D, B, C для составления матриц попарных сравнений по отношению к критериям $K_{11} — K_{42}$. представлена в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Показатели для сравниваемых вариантов
Properties for the compared options

	K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{14}	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}	K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{41}	K_{42}
D	5	1	1	1	3	5	1	5	3	3	1	1	3
B	1	3	1	1	1	1	3	1	7	1	1	5	3
C	3	1	1	1	1	3	5	3	1	1	1	3	1

Разработано автором / Developed by the author

На основе таблицы 4 удобно составлять матрицы попарных сравнений для каждого критерия. Матрица попарных сравнений квадратная, с размерностью, равной числу сравниваемых критериев в соответствующей группе. Составлены матрицы попарных сравнений для второго, третьего и четвертого уровня. В матрицах каждого уровня анализируется группа критериев по отношению к соответствующим критериям предыдущего уровня. В таблице 5 приведены матрица попарных сравнений и результаты расчетов собственных векторов и оценка согласования для критериев второго уровня.

Таблица 5 / Table 5

Матрица попарных сравнений для второго уровня критериев
Pair-wise comparisons matrix for the second criteria level

K_0	Элементы матрицы Matrix elements				Векторы приоритетов Priority vectors	Максимальные собственные числа и оценки согласования Maximum eigenvalues and concordance estimates
K_1	1	3	5	5	$P_1 = 0,573$	$L_{max} = 3,998$ ИС = 0,001 Concordance index ОС = 0,001 Concordance estimates
K_2	1/3	1	2	2	$P_2 = 0,509$	
K_3	1/5	1/2	1	1	$P_3 = 0,109$	
K_4	1/5	1/2	1	1	$P_4 = 0,109$	

Разработано автором / Developed by the author

В таблице 6 дана матрица попарных сравнений и результаты расчетов собственных векторов, и оценка согласования для критериев третьего уровня.

Таблица 6 / Table 6

Матрица попарных сравнений для третьего уровня критериев
Pair-wise comparisons matrix for the third criteria level

	Матрицы и их элементы Matrices and matrices' elements				Векторы приоритетов Priority vectors	Максимальные собственные числа и оценки согласования Maximum eigenvalues and concordance estimates
K_1 K_{11} K_{12} K_{13} K_{14}	K_{11} 1 1/3 1/3 1/5	K_{12} 3 1 1 1/2	K_{13} 3 1 1 1/2	K_{14} 4 2 2 1	$P_{11} = 0,533$ $P_{12} = 0,185$ $P_{13} = 0,185$ $P_{14} = 0,097$	$L_{max} = 3,962$ ИС = 0,012 Concordance index OC = 0,013 Concordance estimates
K_2 K_{21} K_{22} K_{23} K_{24}	K_{21} 1 1 1 1	K_{22} 1 1 1 1	K_{23} 1 1 1 1	K_{24} 1 1 1 1	$P_{21} = 0,250$ $P_{22} = 0,250$ $P_{23} = 0,250$ $P_{24} = 0,250$	$L_{max} = 3,962$ ИС = 0,012 Concordance index OC = 0,013 Concordance estimates
K_3 K_{31} K_{32} K_{33}	K_{31} 1 1/3 1/3	K_{32} 3 1 1	K_{33} 3 1 1		$P_{31} = 0,598$ $P_{32} = 0,201$ $P_{33} = 0,201$	$L_{max} = 3,962$ ИС = 0,012 Concordance index OC = 0,013 Concordance estimates
K_4 K_{41} K_{42}	K_{41} 1 1	K_{42} 1 1			$P_{41} = 0,500$ $P_{42} = 0,500$	$L_{max} = 3,962$ ИС = 0,012 Concordance index OC = 0,013 Concordance estimates

Разработано автором / Developed by the author

Аналогично составляется матрица попарных сравнений для четвёртого уровня. По матрицам попарных сравнений вычислены локальные и глобальные приоритеты для всех вариантов замены пролетных строений, приведенные в таблице 7.

Таблица 7 / Table 7

Локальные и глобальные приоритеты
для четырехуровневой системы критериев
Local and global priorities for a four-tier criteria system

Критерии Criteria		Локальные приоритеты Local priorities				
K_1 $P_1 = 0,573$	K_{11}	0,533	0,305	0,580	0,110	0,310
	K_{12}	0,185	0,106	0,201	0,598	0,201
	K_{13}	0,185	0,106	0,333	0,333	0,333
	K_{14}	0,097	0,056	0,333	0,333	0,333
K_2 $P_2 = 0,209$	K_{21}	0,250	0,052	0,598	0,201	0,201
	K_{22}	0,250	0,052	0,580	0,110	0,310
	K_{23}	0,250	0,052	0,109	0,309	0,582
	K_{24}	0,250	0,052	0,580	0,110	0,310
K_3 $P_3 = 0,109$	K_{31}	0,598	0,065	0,292	0,616	0,092
	K_{32}	0,201	0,022	0,598	0,201	0,201
	K_{33}	0,201	0,022	0,333	0,333	0,333
K_4 $P_4 = 0,109$	K_{41}	0,500	0,055	0,109	0,582	0,309
	K_{42}	0,500	0,055	0,429	0,429	0,142
Варианты замены Replacement options				D	B	C
Глобальные приоритеты IP IP Global Priorities				0,442	0,294	0,264

Разработано автором / Developed by the author

В результате расчетов определены глобальные приоритеты IP для вариантов замены. По очередности замены у варианта D $IP = 0,442$, B $IP = 0,294$, C $IP = 0,264$. Таким образом, преимущество к замене у варианта моста D, затем B и C.

Выводы

Conclusions

Математический аппарат метода иерархии критериев несложен для применения, позволяет получить решение в цифровом виде. Могут быть установлены различные критерии для решения проблемы.

В статье предложен один из возможных подходов решения вопроса по установлению очередности замены пролетных строений. Подготовка системы критериев и оценка их значимости позволяет осуществлять анализ как в целом, так и на каждом уровне. Относительная значимость критериев может быть изменена при экспертизе.

Субъективность подхода к системе критериев и оценке их относительной важности может быть снижена привлечением нескольких экспертов. В этом случае расхождения в их оценках неизбежны, однако величина этого расхождения имеет важное значение. Групповая оценка может считаться достаточно надежной только при условии хорошей согласованности ответов отдельных специалистов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Осипов, В.О.** Долговечность металлических пролетных строений эксплуатируемых железнодорожных мостов / В.О. Осипов. — М.: Транспорт, 1982. — 287 с.
2. **Евграфов, Г.К.** Расчеты мостов по предельным состояниям / Г.К. Евграфов, Н.Б. Лялин. — М.: Трансжелдориздат, 1962. — 336 с.
3. **Круглов, В.М.** Методика оценки и способы повышения усталостного ресурса типовых пролетных строений Гипротранс / В.М. Круглов, В.О. Осипов, Е.П. Феоктистова // Транспортное строительство. — 2008. — № 7. — С. 11–15. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23179670> (дата обращения: 14.04.2021).
4. **Саати Т.** Аналитическое планирование организации систем / Т. Саати, К. Кернс. — пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе; Под ред. И.А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1991. — 223 с.
5. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. — пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. — М.: Радио и связь, 1993. — 314 с.
6. **Саати, Т.Л.** Относительное измерение и его обобщение в принятии решений. Почему парные сравнения являются ключевыми в математике для измерения неосознаваемых факторов / Т.Л. Саати // Cloud of Science. — 2016. — Т. 3. — № 2. — С. 171–262. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27468322> (дата обращения: 14.04.2021).
7. **Азгальдов, Г. Г.** Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании / Г.Г. Азгальдов. — М.: Стройиздат, 1989. — 264 с. — URL: http://www.labrate.ru/azgaldov/qualimetry_in_architectural_and_structural_design.pdf (дата обращения: 14.04.2021).

8. **Мастаченко, В.Н.** Интегральная оценка решений / В.Н. Мастаченко // Мир транспорта. — 2004. — Т. 2. — № 1. — С. 96–102. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12175339> (дата обращения: 14.04.2021).
9. **Saaty T.** An eigenvalue allocation model for prioritization and planning / T. Saaty // Energy management and policy center. — 1972. — С. 28–31.
10. **Dubois, D.** The mean value of a fuzzy number / D. Dubois, H. Prade. — DOI [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(87\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(87)90028-5) // Fuzzy Sets and Systems. — 1987. — Т 24. — № 3. — С. 279–300. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0165011487900285> (дата обращения: 16.05.2021).
11. **Zhu, B.** Analytic hierarchy process-hesitant group decision making / B. Zhu, Z. Xu. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.06.019> // European Journal of Operational Research. — 2014. — Т 239. — № 3. — С. 794–801. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221714005025> (дата обращения: 16.05.2021).
12. **Javanbarg, M.B.** Fuzzy AHP-based multicriteria decision making systems using particle swarm optimization / M.B. Javanbarg, C. Scawthorn, J. Kiyono, B. Shahbodaghkhan. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.095> // Expert Systems with Applications. — 2012. — Т 39. — № 1. — С. 960–966. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417411010578> (дата обращения: 16.05.2021).
13. **Ayhan, M.B.** A Fuzzy AHP Approach for Supplier Selection Problem: A Case Study in A Gearmotor Company / M.B. Ayhan. — DOI <https://doi.org/10.5121/ijmvs.2013.4302> // International Journal of Managing Value and Supply Chains. — 2013. — Т 4. — № 3. — С. 11–23. — URL: <http://www.airccse.org/journal/mvsc/papers/4313ijmvs02.pdf> (дата обращения: 16.05.2021).
14. **Zhang, H.** The Analysis of the Reasonable Structure of Water Conservancy Investment of Capital Construction in China by AHP Method / H. Zhang. — DOI <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9261-9> // Water Resources Management. — 2009. — Т 23. — № 1. — С. 1–18. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-008-9261-9> (дата обращения: 16.05.2021).

Сведения об авторах:

Феоктистова Елена Павловна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: feok_ep@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1056732
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1650-5372>

Статья получена: 27.10.2021. Принята к публикации: 10.01.2022. Опубликовано онлайн: 24.01.2022.

REFERENCES

1. Osipov V.O. [Durability of metal superstructures of operated railway bridges]. Moscow: Transport Publ.; 1982. (In Russ.).
2. Evgrafov G.K. [Bridge calculations for limit states]. Moscow: Transzheldorizdat; 1962. (In Russ.).
3. Kruglov V.M., Osipov V.O., Feoktistova Ye.P. Method to Assess and Ways to Increase the Fatigue Resource of Giprotrans Standard Spans. *Transport construction*. 2008; (7): 11–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23179670> (accessed 14th April 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Saaty T., Kearns K. Analytical Planning. The Organization of System. Oxford: Pergamon Press; 1985. (In Eng.).
5. Saaty T. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York: McGraw-Hill International Book Company; 1980. (In Eng.).

6. Saaty T. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making. Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors. *Cloud of Science*. 2016; 3(2): 171–262. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27468322> (accessed 14th April 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Azgal'dov G.G. [Qualimetry in architectural and construction design]. Moscow: Stroyizdat; 1989. Available at: http://www.labrate.ru/azgaldov/qualimetry_in_architectural_and_structural_design.pdf (accessed 14th April 2021). (In Russ.).
8. Mastachenko V.N. Comprehensive Assessment of Decisions. *Mir Transporta (World of Transport and Transportation) Journal*. 2004; 2(1): 96–102. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12175339> (accessed 14th April 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Saaty T. An eigenvalue allocation model for prioritization and planning. *Energy management and policy center*. 1972: 28–31.
10. Dubois D., Prade H. The mean value of a fuzzy number. *Fuzzy Sets and Systems*. 1987; 24(3): 279–300. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(87\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(87)90028-5).
11. Zhu B., Xu Z. Analytic hierarchy process-hesitant group decision making. *European Journal of Operational Research*. 2014; 239(3): 794–801. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.06.019>.
12. Javanbarg M.B., Scawthorn C., Kiyono J., Shahbodaghkhan B. Fuzzy AHP-based multicriteria decision making systems using particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications*. 2012; 39(1): 960–966. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.095>.
13. Ayhan M.B. A Fuzzy AHP Approach for Supplier Selection Problem: A Case Study in A Gearmotor Company. *International Journal of Managing Value and Supply Chains*. 2013; 4(3): 11–23. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5121/ijmvsc.2013.4302>.
14. Zhang H. The Analysis of the Reasonable Structure of Water Conservancy Investment of Capital Construction in China by AHP Method. *Water Resources Management*. 2009; 23(1): 1–18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9261-9>.

Information about the authors:

Elena P. Feoktistova — Russian University of Transport (МИИТ), Moscow, Russia, e-mail: 006641@pnu.edu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1056732
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1650-5372>

Submitted: 27th October 2021. Revised: 10th January 2022. Published online: 24th January 2022.