

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ  
Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.3.019.3  
DOI 10.17816/transsyst20217171-84

© Р. С. Литвиненко, А. Э. Аухадеев, К. Т. Ле, Г. Р. Ахсаниев  
Казанский государственный энергетический университет  
(Казань, Россия)

## ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

При задании требований по надежности на стадии разработки сложных технических систем, если они являются восстанавливаемыми, а также для них определены требования к долговечности и сохраняемости, общее количество, задаваемых в соответствии с нормативными документами, единичных и комплексных показателей надежности находится в пределах 5–7 единиц, что определяет сложность процедуры их проверки, подтверждения и оценки.

**Цель:** Формирование единого (интегрального) показателя надежности, который характеризовал бы всю совокупность основных свойств надежности тягового электрооборудования, как сложной технической системы, при условии соответствия отдельных показателей требованиям, указанным в техническом задании.

**Методы:** Предлагается использовать метод анализа иерархий, разработанного Т. Саати и широко применяемого при решении различных многокритериальных задач.

**Заключение:** Использование для определения уровня надежности интегрального показателя позволяет получить формализованный результат, выражаемый через соответствующее значение вектора глобальных приоритетов и дающий возможность количественной оценки превосходства в плане надежности одного альтернативного варианта тягового электрооборудования над другим.

**Ключевые слова:** городской электротранспорт, надежность, интегральный показатель, метод анализа иерархий, уровень, матрица, тяговое электрооборудование.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS  
Field – Electrical Engineering

© R. S. Litvinenko, A. E. Auhadeev, K. T. Le, G. R. Akhsaniev  
Kazan State Power Engineering University  
(Kazan, Russia)

## CALCULATION INTEGRAL RELIABILITY INDICATOR OF THE URBAN ELECTRIC TRANSPORT TRACTION ELECTRICAL EQUIPMENT

When reliability requirements at the stage of developing complex technical systems are setting, the total number of individual and complex reliability indicators set in accordance

with regulatory documents is within 5-7 units. This is done provided that they are recoverable, and also for them the requirements for durability and preservation are determined. All this determines the complexity of the procedure for their verification, confirmation and evaluation.

**Aim:** Formation of a common (integral) indicator of reliability, which can characterize the basic reliability properties multitude of traction electrical equipment, as a complex technical system, subject to the compliance of individual indicators with the requirements specified in the terms of reference.

**Methods:** It is proposed to use of T. Saati's hierarchy analysis method, which is widely used in solving various multicriteria problems.

**Conclusion:** Using an integral indicator to determine the level of reliability allows getting a formalized result, expressed through the vectors of global priorities corresponding value, which makes it possible to get a quantitative assessment of the superiority for one of alternative traction electrical equipment.

**Key words:** urban electric transport, reliability, integral indicator, hierarchies analysis method, level, matrix, traction electrical equipment.

## ВВЕДЕНИЕ

Современный городской электрический транспорт (ГЭТ) является сложной производственно-технической системой, основным назначением которой является удовлетворение населения в безопасных и стабильных перевозках. В связи с этим, вопросы обеспечения заданных параметров надежности системы ГЭТ как на этапе проектирования, так и в эксплуатации является очень актуальными.

Наиболее высокие требования по надежности предъявляются именно к техническим объектам данной системы, а, в частности, к тяговому электрооборудованию электроподвижного состава. Именно на тяговое электрооборудование приходится наибольшее число отказов и неисправностей, что объясняется такими объективными причинами как: высокая сложность технического устройства; экстремальность условий эксплуатации (высокие скорости, влажность, вибрация, перепад температур и т. д.) и интенсивность режимов работы (высокие температуры, частоты вращения, плотности тока и т. д.). Все это определяет необходимость развития и совершенствования методов определения надежности тягового электрооборудования, являющегося неотъемлемой составной частью сложного электротехнического комплекса, обеспечивающего преобразование, передачу и использование электрической для организации перевозочного процесса ГЭТ, обусловленную высокой экономической и технической ценой отказа.

Основные требования по надежности тягового электрооборудования формируются на этапе разработки технического задания. При этом устанавливается номенклатура и значения показателей надежности (ПН),

состав которых регламентируется ГОСТ 27.002-2015 [1] и положениями ГОСТ 27.003-2016 [2].

Для снижения затрат на проверку, подтверждение и оценку заданных ПН на этапе производства и в эксплуатации их число целесообразно выбирать минимальным, при условии возможности в полной мере характеризовать надежность тягового электрооборудования на всех этапах жизненного цикла. При этом, как правило, формируется определенный набор единичных показателей безотказности и ремонтпригодности, а также их комбинации, а также, возможно, применение комплексных ПН, что наиболее характерно для тягового электрооборудования, как сложной технической системы.

Для определения численных значений ПН разрабатываемой технической системы используются расчетные, экспериментальные или расчетно-экспериментальные методы с использованием справочных статистических данных о надежности аналогов (прототипов). Также могут быть использованы результаты опыта эксплуатации или испытаний, предоставляемых поставщиками компонентов. При этом считается, что только при условии соответствия установленным требованиям всех ПН, разрабатываемый технический объект соответствует требованиям по надежности [3].

Для восстанавливаемых сложных технических систем, такими как тяговое электрооборудование ГЭТ, с установленными требованиями к долговечности и сохраняемости, общее количество задаваемых единичных и комплексных ПН, согласно ГОСТ 27.003-2016 [2], находится в пределах 5–7 показателей.

Аналогично требованиям по надежности, согласно ГОСТ 15.016-2016 [4], в техническом задании могут быть указаны требования, характеристики, нормы, показатели и другие параметры, определяющие назначение и эксплуатационные характеристики разрабатываемых технических объектов. В связи с этим выбор варианта технической системы, удовлетворяющего всем техническим требованиям (требованиям к эксплуатации, стойкости, электромагнитной совместимости и т.д.), в том числе требованиям по надежности, указанным в задании, является важнейшей задачей, стоящей перед разработчиком. На практике различные схемно-конструктивные варианты технической системы имеют разные по величине количественные ПН, что не позволяет однозначно отдать предпочтение тому или иному техническому решению. При этом превосходство одного варианта технического решения над другим возможно только в отдельных показателях из заданных в требованиях по надежности, а разница между ПН может быть от незначительной до существенной.

Таким образом, идентификация показателя, позволяющего характеризовать совокупность основных свойств надежности тягового электрооборудования ГЭТ при условии соответствия требованиям по надежности всех заданных в техническом задании отдельных показателей, является важнейшей проблемой, определяющей актуальность проведенного исследования. Для решения этой проблемы авторы вводят понятие «интегральный показатель надежности» (ИПН), а также предлагают методику определения обобщенных показателей для нескольких схемно-конструктивных вариантов тягового электрооборудования, синтезирующих отдельные ПН в единый. Это позволит на этапе оценки технического уровня альтернативных вариантов разрабатываемой системы перейти от набора единичных и комплексных ПН к ИПН, характеризующем надежность тягового электрооборудования ГЭТ с учетом всех требований указанных в техническом задании.

### **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ**

В общем случае метод аналитических иерархических процессов или метод анализа иерархий (МАИ) представляет собой математический аппарат системного подхода к технологии принятия решений на основе расчетов и использования метода попарных сравнений, позволяющего найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом соответствует сути поставленной проблемы и требованиям к ее решению. Метод был разработан американским ученым Томасом Саати в 1970 году и активно используется при решении различных многокритериальных задач (анализ возможных вариантов развития событий, составления рейтинга, распределение ресурсов, управление рисками и др.). Также МАИ получил широкое распространение при практическом решении задач сравнительного анализа технического уровня альтернативных вариантов разрабатываемых технических объектов [5–7].

Подробное описание содержания этапов МАИ широко представлено в различных источниках [8–10].

В связи с тем обстоятельством, что МАИ обладает возможностью присвоения альтернативным вариантам рангов (цифровых показателей отображающих значимость или важность объекта), предлагается использовать эти характеристики для формирования количественного значения ИПН альтернативных вариантов тягового электрооборудования, где в качестве критериев будут выступать соответствующие им ПН [11]. В качестве ИПН предлагается применить вычисленные значения глобальных (составных) приоритетов. Обращаем внимание, что определение ИПН осуществляется для конкретных структурно-схематических вариантов

построения тягового электрооборудования и соответствующих ему количественных значений ИПН. Изменение какого либо из этих положений приведет к повторному определению ИПН.

В качестве недостатка МАИ можно отметить:

- количество показателей не должно превышать  $7 \pm 2$ , так как человеческое сознание не способно к одновременному восприятию и переработке более указанного числа блоков информации [12, 13];
- метод позволяет найти ранги выбранных альтернатив, но не имеет внутренних средств интерпретации этих рангов;
- несмотря на проверку согласованности суждений экспертов, экспертные оценки носят субъективный характер.

Проверку работоспособности и адекватности предложенного подхода к решению задачи определения ИПН методом анализа иерархий для последующей оценки технического уровня структурно-схематических вариантов тягового электрооборудования ГЭТ проведем на конкретном примере.

## ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для разрабатываемого многодвигательного электропривода (МЭП) применяемого на электрическом транспорте заказчик в техническом задании установил следующие требования по надежности:

- гамма-процентная наработка до отказа (GPTF) – не менее 7500 ч;
- средняя наработка на отказ (MTBF) – не менее 12000 часов;
- средний срок службы до капитального ремонта (AOL) не менее 5 лет;
- коэффициент готовности (AF) – не менее 0,99;
- средний срок службы до списания (MLTD) – не менее 20 лет.

Разработчиком предложено три возможных варианта МЭП с предварительно рассчитанными значениями показателей, приведенными в Табл.1.

Используя МАИ, требуется рассчитать ИПН  $R_1, R_2$  и  $R_3$  альтернативных вариантов МЭП, для последующего комплексного анализа соответствия всех технических требований к разрабатываемой системе.

Таблица 1. Показатели надежности вариантов МЭП

Многодвигательный электропривод	Показатели надежности				
	GPTF, ч	MTBF, тыс.ч	AOL, лет	AF	MLTD, лет
Вариант №1	7,6	12,5	7	0,998	22
Вариант №2	8	13,5	6,5	0,999	24
Вариант №3	5,2	14	5	0,994	25

Декомпозиция задачи в иерархию. Декомпозиция задачи вычисления ИПН представлена на Рис.

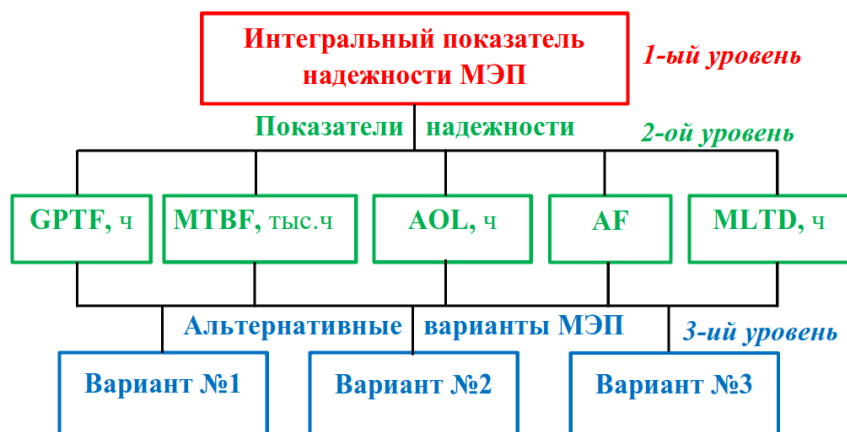


Рис. Декомпозиция задачи вычисления ИПН вариантов МЭП

В наиболее элементарном виде иерархия состоит из вершины (условно здесь находится общая цель – формирование ИПН), от которой идут промежуточные уровни, состоящие из пяти критериев (показателей надежности), уточняющих цель, к нижнему уровню, состоящему из 3 альтернативных вариантов МЭП.

*Построение матриц попарных суждений.* При использовании МАИ решаемая задача была представлена иерархически, поэтому матрица сравнения важности ПН второго уровня составляется относительно общей цели (1-го уровня). Подобные матрицы также строятся для парных сравнений каждого альтернативного варианта МЭП по отношению к элементам 2-го уровня. Для проведения субъективных парных сравнений автором Т.Саати была разработана численная шкала относительной важности [9,13], в соответствии с которой экспертами определяется вес функций (показателей), характеризующих разрабатываемую систему.

Для построения матрицы попарных суждений для 2-го уровня  $A_1$  размерностью  $k \times k$ , где  $k = 5$  – количество заданных ПН составляется таблица в  $k$  строк и столбцов, в которой в заголовках граф и строк записываются применяемые при формировании ИПН и заданные в техническом задании показатели. Действия начинают с показателя, расположенного в заголовке 1-й строки, при этом задаются вопросом, насколько этот показатель важнее показателей, указанных в заголовке графы, и далее остальные показатели. При сравнении показателя с самим собой отношение равно единице. Если сравниваемый показатель важнее, чем ПН из заголовка графы, то используется целое число из шкалы

относительной важности [14], в противном случае - обратная величина. Таким образом, поочередно производится сравнение важности всех ПН между собой и определяются все элементы матрицы  $A_1$  попарных сравнений для 2-го уровня (уровня ПН) (Табл. 2).

Таблица 2. Матрица  $A_1$  попарных сравнений для второго уровня

Показатели	GPTF, $j = 1$	MTBF, $j = 2$	AOL, $j = 3$	AF, $j = 4$	MLTD, $j = 5$
GPTF	1	3	4	1	5
MTBF	1/3	1	4	2	3
AOL	1/4	1/4	1	1/5	3
AF	1	1/2	5	1	6
MLTD	1/5	1/3	1/3	1/6	1

Составление матриц  $A_{2j}$ , ( $j = \overline{1, k}$ ) для 3-го уровня (уровня альтернативных вариантов) существенно упрощается, так как значения ПН выражены количественно, а не качественно. Элементы матриц  $A_{2j}$  формируются делением значений ПН соответствующих альтернативных вариантов МЭП применительно к каждому показателю  $j = \overline{1, k}$  (матрицы  $A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{24}$  и  $A_{25}$ ). Матрицы  $A_{2j}$  попарных сравнений для третьего уровня представлены в Табл. 3.

Таблица 3. Матрицы попарных сравнений для уровня альтернативных вариантов МЭП

Матрица $A_{21}$ попарных сравнений для показателя GPTF, $j = 1$			
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Вариант №1	1	7,6/8=0,95	7,6/8,2=0,9268
Вариант №2	8/7,6=1,0526	1	8/8,2=0,9756
Вариант №3	8,2/7,6=1,0789	8,2/8=1,025	1
Матрица $A_{22}$ попарных сравнений для показателя MTBF, $j = 2$			
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Вариант №1	1	12,5/13,5=0,9259	12,5/14=0,8929
Вариант №2	13,5/12,5=1,08	1	13,5/14=0,9643
Вариант №3	14/12,5=1,12	14/13,5=1,037	1
Матрица $A_{23}$ попарных сравнений показателя AOL, $j = 3$			
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Вариант №1	1	7/6,5=1,0769	7/5=1,4
Вариант №2	6,5/7=0,9586	1	6,5/5=1,3
Вариант №3	5/7=0,7143	5/6,5=0,7692	1
Матрица $A_{24}$ попарных сравнений показателя AF, $j = 4$			
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Вариант №1	1	0,998/0,999=0,999	0,998/0,994=1,004
Вариант №2	0,999/0,998=1,001	1	0,999/0,994=1,005
Вариант №3	0,994/0,998=0,996	0,994/0,999=0,995	1
Матрица $A_{25}$ попарных сравнений показателя MLTD, $j = 5$			
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Вариант №1	1	22/24=0,999	22/25=1,004

Вариант №2	24/22=1,001	1	24/25=1,005
Вариант №3	25/22=0,996	25/24=0,995	1

Таким образом, результатом действий на этом этапе является матрица  $A_1$  попарных сравнений для уровня ПН и матрицы  $A_{21} \dots A_{25}$  для уровня альтернативных вариантов МЭП.

*Определение локальных приоритетов и согласованности мнений экспертов для второго уровня.* Для матрицы  $A_1$  попарных сравнений уровня показателей определяется набор локальных приоритетов, которые выражают относительное влияние множества верхних элементов на нижний элемент иерархии. При этом устанавливается вес каждого отдельного компонента матрицы. С этой целью необходимо вычислить собственный вектор  $\bar{A} = [x_1 \dots x_k]^T$  матрицы  $A_1$ , составляющими которого являются оценки вектора приоритетов по строкам матрицы  $x_i$ , определяемые по формуле:

$$x_i = \frac{\bar{a}_i}{\sum_{i=1}^k \bar{a}_i}, \quad (1)$$

где  $\bar{a}_i = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k a_i}$  – среднее геометрическое элементов  $i$ -ой строки матрицы  $A_1, i = \overline{1, k}$ ;

В условиях решения нашей задачи собственный вектор  $\bar{A}$  матрицы  $A_1$  в соответствии с формулой (1) получил следующие значения

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3573 \\ 0,2388 \\ 0,0817 \\ 0,2708 \\ 0,0514 \end{bmatrix},$$

где  $x_1$  - оценка приоритета показателя  $T_{\gamma=95}$ ;

$x_2$  - оценка приоритета показателя  $T_0$ ;

$x_3$  - оценка приоритета показателя  $T_{\text{сл.ср.к.р.}}$ ;

$x_4$  - оценка приоритета показателя  $K_r$ ;

$x_5$  - оценка приоритета показателя  $T_{\text{сл.ср.сп.}}$ .

Вычисление вектора локальных приоритетов (собственных векторов матрицы  $A_1$ )  $\lambda_{\max} = [\lambda_{\max 1} \dots \lambda_{\max k}]$  производится путем приведения величины  $x_i$  к нормализованному виду по следующей формуле:

$$\lambda_{\max i} = x_i \cdot \sum_{j=1}^k a_{ij}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{\max i}$  - собственные значения вектора Перрона [13, с.15].

$a_{ij}$  - значение элемента матрицы  $A_1$  в  $i$ -ой строке  $j$ -ом столбце,  $j = \overline{1, k}$ .

Используя формулу (2), определим локальные приоритеты  $\lambda_{\max i}$  для второго уровня (уровня показателей). В условиях решения задачи



формирования ИПН альтернативных вариантов МЭП вектор локальных приоритетов представлен следующими значениями

$$\lambda_{max} = \begin{bmatrix} 0,9945 \\ 1,2139 \\ 1,171 \\ 1,1825 \\ 0,9252 \end{bmatrix}.$$

Сумма всех элементов полученного вектора локальных приоритетов  $\lambda_{max}$  равна 5,4871, называется Перроново собственное значение, обозначим ее буквой  $\Lambda$  [13, с.16]. При абсолютной согласованности матрицы соблюдается условие  $\Lambda = k$ .

После определения локальных приоритетов  $\lambda_{maxi}$  и величины  $\Lambda$  следует процедура оценки согласованности мнений экспертов при формировании матрицы попарных сравнений  $A_1$  для второго уровня, поскольку обобщенное мнение группы экспертов не лишено субъективности, так как использовалась качественная шкала оценок. Для этого МАИ предусматривает применение индекса согласованности ( $\mu$ ), который дает информацию о степени нарушения численной и порядковой согласованности.

Вычисляем индекс согласованности:

$$\mu = \frac{\Lambda - k}{k - 1} = \frac{5,4871 - 5}{4} = 0,1218. \quad (3)$$

Сравним величину  $\mu$  с величиной случайной согласованности ( $\mu_{rand}$ ), которая получилась бы при случайном наборе количественных суждений из шкалы  $\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \dots, 1, 2, \dots, 9$ , но при условии создания обратно симметричной матрицы. В источнике [7] приводится таблица, позволяющая определить среднюю согласованность  $\mu_{rand}$  для случайных матриц различного порядка. В условиях решения нашей задачи для  $k=5$  величина  $\mu_{rand} = 1,12$ . Для сравнения величин  $\mu$  и  $\mu_{rand}$  найдем отношение согласованности (анг. *consistency ratio* - CR):

$$CR = \frac{\mu}{\mu_{rand}} \cdot 100 \% = 10,9 \%. \quad (4)$$

Величина CR должна составить 10 % или менее, чтобы быть приемлемой. В некоторых случаях можно допустить 20 %, но не более. Если величина ОС превышает 20 %, необходимо провести второй тур экспертизы и уточнить элементы матрицы попарных сравнений  $A_1$  для 2-го уровня [13, 15]. Так как CR = 10,9 %, можно сделать вывод о допустимой согласованности матрицы попарных сравнений  $A_1$  для 2-го уровня задачи формирования ИПН для альтернативных вариантов МЭП.

*Определение локальных приоритетов для третьего уровня.*

Далее аналогичным образом определяются локальные приоритеты для 3-го уровня (уровня вариантов МЭП), результаты вычислений представлены в Табл. 3. Следует отметить, что если показатели

альтернативных вариантов заданы в виде численных значений, то определять  $\mu$  не нужно, так как  $\mu = 0$ , а следовательно  $\mu_{rand} = 0$ . Поэтому определение  $\mu_{rand}$  для 3-го уровня не производилось.

*Определение глобальных приоритетов.* Для формирования ИПН альтернатив приоритеты синтезируются, начиная с уровня показателей. Локальные приоритеты перемножаются на приоритет соответствующего ПН на вышестоящем уровне и суммируются по каждому элементу в соответствии с критерием, на который воздействует этот элемент (каждый элемент второго уровня умножается на единицу, т.е. на вес единственной цели самого верхнего уровня). Это дает составной, или глобальный приоритет того элемента, который затем используется как критерий для взвешивания локальных приоритетов элементов, расположенных уровнем ниже. Как было сказано выше, величину глобального приоритета предлагается принять в качестве ИПН альтернативных вариантов.

Таблица 4. Определение локальных приоритетов для третьего уровня (уровня альтернативных вариантов)

Варианты МЭП	№1	№2	№3	Оценка вектора приоритетов $x_i$	Вектор локальных приоритетов $\lambda_{maxi}$
<i>Для установленной безотказной наработки GPTF</i>					
№1	1	0,95	0,9268	0,3193	0,9999
№2	1,0526	1	0,9756	0,3361	0,9999
№3	1,0789	1,025	1	0,3445	0,9999
Определение $\Lambda_1$					3
<i>Для средней наработки на отказ MTBF</i>					
№1	1	0,9259	0,8929	0,3337	1,001
№2	1,08	1	0,9643	0,334	1
№3	1,12	1,037	1	0,3323	0,9999
Определение $\Lambda_2$					3
<i>Для установленного срока службы до капитального ремонта AOL</i>					
№1	1	1,0769	1,4	0,3784	1,0001
№2	0,9586	1	1,3	0,3514	1,0001
№3	0,7143	0,7692	1	0,2703	1,0001
Определение $\Lambda_3$					3,0003
<i>Для коэффициента готовности AF</i>					
№1	1	0,999	1,004	0,3125	1
№2	1,001	1	1,005	0,3375	1
№3	0,996	0,995	1	0,35	1
Определение $\Lambda_4$					3
<i>Для назначенного срока службы MLTD</i>					
№1	1	0,999	1,004	0,3099	1,0001
№2	1,001	1	1,005	0,338	0,9999
№3	0,996	0,995	1	0,3521	1
Определение $\Lambda_5$					3

Полученные в Табл. 4 результаты представим в виде матрицы  $A_3$  размером  $5 \times 3$ , где столбцы будут соответствовать оценкам вектора приоритетов ПН второго уровня, а строки – альтернативным вариантам МЭП. Таким образом, матрица  $A_3$  приоритетов по каждому показателю примет следующий вид:

$$A_3 = \begin{bmatrix} x_1^{(GPTF)} & x_1^{(MTBF)} & x_1^{(AOL)} & x_1^{(AF)} & x_1^{(MLTD)} \\ x_2^{(GPTF)} & x_2^{(MTBF)} & x_2^{(AOL)} & x_2^{(AF)} & x_2^{(MLTD)} \\ x_3^{(GPTF)} & x_3^{(MTBF)} & x_3^{(AOL)} & x_3^{(AF)} & x_3^{(MLTD)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3193 & 0,3337 & 0,3784 & 0,3125 & 0,3099 \\ 0,3361 & 0,334 & 0,3514 & 0,3375 & 0,338 \\ 0,3445 & 0,3323 & 0,2703 & 0,35 & 0,3521 \end{bmatrix}.$$

Для определения вектора глобальных приоритетов воспользуемся формулой:

$$\bar{W} = A_3 \cdot \bar{A} = \begin{bmatrix} x_1^{(GPTF)} & x_1^{(MTBF)} & x_1^{(AOL)} & x_1^{(AF)} & x_1^{(MLTD)} \\ x_2^{(GPTF)} & x_2^{(MTBF)} & x_2^{(AOL)} & x_2^{(AF)} & x_2^{(MLTD)} \\ x_3^{(GPTF)} & x_3^{(MTBF)} & x_3^{(AOL)} & x_3^{(AF)} & x_3^{(MLTD)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $W_1, W_2, W_3$  - глобальные приоритеты соответствующих альтернативных вариантов МЭП.

Подставив полученные для  $A_3$  и  $\bar{A}$  числовые значения в формулу (5), получим следующие оценки глобальных (собственных) приоритетов:

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} 0,3193 & 0,3337 & 0,3784 & 0,3125 & 0,3099 \\ 0,3361 & 0,334 & 0,3514 & 0,3375 & 0,338 \\ 0,3445 & 0,3323 & 0,2703 & 0,35 & 0,3521 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,3573 \\ 0,2388 \\ 0,0817 \\ 0,2708 \\ 0,0514 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3268 \\ 0,3372 \\ 0,3363 \end{bmatrix}.$$

Сумма глобальных приоритетов должна быть равна 1.

Приравнявая вычисленные значения глобальных приоритетов  $W_1, W_2, W_3$  показателям  $R_1, R_2, R_3$ , получим численные значения ИПН соответствующих вариантов МЭП, характеризующие набор единичных и комплексного ПН. В результате решения нашей задачи наибольший ИПН соответствует второму варианту МЭП, т.к.  $R_2 = 0,3372 > R_3 > R_1$ . В дальнейшем эти показатели, представляющие собой обобщенный (единый) ПН, могут быть использованы наряду с другими технико-экономическими требованиями к МЭП для последующего выбора наиболее предпочтительного схемно-конструктивного варианта разрабатываемого многодвигательного электропривода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, подход к определению ИПН на этапе разработки, синтезирующих до 5–7 отдельных показателей, характеризующих

различные свойства надежности, позволяет дать комплексную оценку и на ее основе ранжировать варианты схемно-конструктивные решений тягового электрооборудования ГЭТ. Предложенный механизм определения ИПН вариантов тягового электрооборудования является удобным инструментом научных исследований на стадии формирования исходных технических требований и разработки технического задания. Применение в этих целях МАИ позволяет выполнить глубокий анализ большого объема экспертной и статистической информации о заданных критериях надежности с учетом весовых характеристик анализируемых показателей. Использование для определения уровня надежности интегрального показателя позволяет получить формализованный результат, выражаемый через соответствующее значение вектора глобальных приоритетов и дающий возможность количественной оценки превосходства одного альтернативного варианта над другим.

**Авторы заявляют, что:**

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References**

1. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с. [GOST 27.002-2015 Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya. Moscow: Standartinform; 2016. 24 p. (In Russ.)].
2. ГОСТ 27.003-2016 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Стандартинформ, 2018. – 19 с. [GOST 27.003-2016 Nadezhnost' v tekhnike. Sostav i obshchie pravila zadaniya trebovanij po nadezhnosti. Moscow: Standartinform; 2018. 19 p. (In Russ.)].
3. Георгиевская Е.В. Методические принципы оценки надежности оборудования на ранних стадиях проектирования // Новое в Российской электроэнергетике. – 2018. – №11. – С.25-36. [Georgievskaya EV. Metodicheskie printsipy otsenki nadezhnosti oborudovaniya na rannikh stadiyakh proektirovaniya . *Novoe v Rossiiskoi elektroenergetike*. 2018; 11: 25-36. (In Russ.)].
4. ГОСТ 15.016-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. – М.: Стандартинформ, 2017. – 27 с. [GOST 15.016-2016 Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Tekhnicheskoe zadanie. Trebovaniya k soderzhaniyu i oformleniyu. Moscow: Standartinform; 2017. 27 p. (In Russ.)].
5. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Гуреев В.М., Мисбахов Р.Ш. Оценка технического уровня сложных систем на этапе разработки // Вестник машиностроения. – 2015. – № 6. – С. 35–39. [Litvinenko RS, Pavlov PP, Gureev VM, Misbakhov RSh. Assessment of technical level of complicated engineering systems on the stage of their design. *Russian Engineering Research*. 2015;6:35-39. (In Russ.)]. Доступно по: Оценка технического уровня сложных систем на этапе разработки (elibrary.ru). Ссылка активна на: 10.03.2021.

6. Li J, Yang Y, Saaty TL, et al. Cultural ranking of countries using the analytic hierarchy process methodology. *Advances in intelligent systems and computing*. 2020;1074:949-963. doi: 10.1007/978-3-030-32456-8\_102
7. Saaty TL. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. *International series in operations research and management science*. 2016;233:363-419. doi: 10.1007/0-387-23081-5\_9
8. Saaty TL. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy. *RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)*. 2008;102(2):251-318. doi: 10.1007/bf03191825
9. Быкова Т.В. Метод анализа иерархий, как инструмент решения практических задач многокритериальной оптимизации // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2019. – №1. – С.48-62. [Bykova TV. Metod analiza ierarkhii, kak instrument resheniya prakticheskikh zadach mnogokriterial'noi optimizatsii. *Matematicheskoe modelirovanie, komp'yuternyi i naturnyi eksperiment v estestvennykh naukakh*. 2019;1:48-62. (In Russ.)]. Доступно по: Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" [http://mathmod\(esrae.ru\)](http://mathmod(esrae.ru)). Ссылка активна на: 10.03.2021.
10. Гривачев А.В., Авдеев В.О., Варганов В.В., и др. Модифицированный метод анализа иерархий для оценки наземных робототехнических комплексов // Экстремальная робототехника. – 2018. – № 1. – С. 409–416. [Grivachev AV, Avdeev VO, Varganov VV, et al. The Modified Method of Hierarchical Analysis of for the Selection of Mobile Robotechnical Complexes. *Extreme Robotics*. 2018; 1:409-416. (In Russ., Engl.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36392881>. Ссылка активна на: 10.03.2021.
11. Воронков И.Е. Вектор глобальных приоритетов метода анализа иерархий как относительный показатель уровня надежности потенциальных участников инвестиционно-строительных проектов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 11. – С. 137–145. [Voronkov IE. Vektor global'nykh prioritetov metoda analiza ierarkhii kak odnositel'nyi pokazatel' urovnya nadezhnosti potentsial'nykh uchastnikov investitsionno-stroitel'nykh proektov. *Vestnik BGTU im.V.G.Shukhova*. 2018;11:137-145. (In Russ.)]. doi: 10.12737/article\_5bf7e35fd74483.00537194.
12. Saaty TL. Seven is the magic number in nature. *Proceedings of the American philosophical society*. 2016;160(4):335-360.
13. Саати Т.Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений // Cloud of science. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 5–39. [Saati TL. On the measurement of intangibles.a principal eigenvector approach to relative measurement derived from paired comparisons. *Cloud of science*. 2015;2(1):5-39. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23174572>. Ссылка активна на: 10.03.2021.
14. Славнов К.В. Особенности модификации метода анализа иерархий Т.Саати для оценки систем контроля конфиденциальной информации // Охрана, безопасность, связь. – 2017. – №1–2. – С.119–125. [Slavnov KV. Modification of the method of analysis hierarchies t. Saati to assess the control systems of confidential information. *Okhrana, bezopasnost', svyaz'*. 2017;1-2:119-125. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28920566>. Ссылка активна на: 10.03.2021.
15. Финогенко И.А., Дьякович М.П. Метод анализа иерархий и построение интегральных показателей сложных систем // Вестник Тамбовского университета.

Серия: естественные и технические науки. – 2017. – Т. 22. – № 6–1. – С. 1335–1340. [Finogenko IA, D'yakovich MP. Method of analysis of hierarchies and construction integrated parameters for multiple systems. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2017;22(6-1):1335-1340. (In Russ.)]. doi: 10.20310/1810-0198-2017-22-6-1335-1340

#### Сведения об авторах:

**Литвиненко Руслан Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 4741-7348; ORCID: 0000-0002-8017-5868;  
E-mail: litrus277@yandex.ru

**Аухадеев Авер Эрикович**, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 2902-4661; ORCID: 0000-0002-7191-4550;  
E-mail: auhadееvkgma@rambler.ru

**Ли Кхак Тхинь**, аспирант;  
eLibrary SPIN: 4088-0521; ORCID: 0000-0001-8967-1641;  
E-mail: thinhlc@vlute.edu.vn

**Ахсаниев Гамаль Рафаэльевич**, магистрант;  
eLibrary SPIN: 3794-4427; ORCID: 0000-0003-0355-6656;  
E-mail: gakhсанiev@gmail.com

#### Information about the authors:

**Ruslan S. Litvinenko**, Candidate of Engineering Science, associate professor;  
eLibrary SPIN: 4741-7348; ORCID: 0000-0002-8017-5868;  
E-mail: litrus277@yandex.ru

**Aver E. Auhadeev**, Candidate of Engineering Science, associate professor;  
eLibrary SPIN: 2902-4661; ORCID: 0000-0002-7191-4550;  
E-mail: auhadееvkgma@rambler.ru

**Khak Thin Le**, graduate student;  
eLibrary SPIN: 4088-0521; ORCID: 0000-0001-8967-1641;  
E-mail: thinhlc@vlute.edu.vn

**Gamal R. Akhsaniev**, undergraduate;  
eLibrary SPIN: 3794-4427; ORCID: 0000-0003-0355-6656;  
E-mail: gakhсанiev@gmail.com

#### Цитировать:

Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Ле К.Т., Ахсаниев Г.Р. Вычисление интегрального показателя надежности тягового электрооборудования городского электротранспорта // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 71–84. doi: 10.17816/transsyst20217171-84

#### To cite this article:

Litvinenko RS, Aukhadееv AE, Le KT, Akhsaniev GR. Calculation Integral Reliability Indicator of the Urban Electric Transport Traction Electrical Equipment. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):71-84. doi: 10.17816/transsyst20217171-84