

## ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.3.019.3

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-50-57](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-50-57)

Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Сафиуллин Б.И., Черепенькин И.В., Ферапонтова М.В.

Казанский государственный энергетический университет

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

На стадии разработки электротехнических систем, если они являются восстанавливаемыми и для них определены требования к долговечности и сохраняемости, общее количество задаваемых единичных и комплексных показателей надежности находится в пределах 5-7 единиц. Разрабатываемые схемно-конструктивные варианты этих систем имеют различные по величине количественные показатели надежности, не позволяющие четко дать предпочтение тому или иному техническому решению. Поэтому возникает объективная необходимость в формировании единого показателя, который характеризовал бы всю совокупность основных свойств надежности электротехнической системы при условии соответствия отдельных показателей требованиям, указанным в техническом задании. В статье предлагается подход к формированию интегральных показателей надежности альтернативных вариантов разрабатываемой электротехнической системы. Подход базируется на использовании метода анализа иерархий, разработанного Т. Саати. Применение этого метода позволяет выполнить глубокий анализ большого объема экспертной и статистической информации о надежности с учетом весовых характеристик анализируемых показателей. В качестве интегрального (комплексного) показателя надежности предлагается применить вычисленные значения глобальных (составных) приоритетов альтернативных вариантов разрабатываемой системы. Интегральный показатель надежности вариантов электротехнической системы представляет собой единый показатель, синтезирующий отдельные единичные и комплексные показатели надежности. 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 электротехнической системы над другим. Проверка работоспособности и адекватности предложенного подхода проведена на примере определения интегральных показателей надежности вариантов центробежного сепаратора, применяемого в химической промышленности.

**Ключевые слова:** надежность, система, показатель, анализ, метод, иерархии, уровень, декомпозиция, этап.

## ВВЕДЕНИЕ

При задании требований по надежности технического объекта на стадии формирования исходных технических требований и разработки технического задания определяют и согласовывают между заказчиком и разработчиком номенклатуру и значения показателей надежности (ПН). Состав задаваемых ПН выбирают из числа показателей, регламентированных ГОСТ 27.002-2015 [1] и в соответствии с положениями ГОСТ 27.003-2016 [2]. Количество задаваемых ПН должно быть минимальным в целях снижения затрат на проверку, подтверждение и оценку заданных ПН при изготовлении и в эксплуатации. В то же время эти показатели должны быть достаточными и в полной мере характеризовать надежность технического объекта на всех этапах жизненного цикла. Для электротехнических систем используются комплексные ПН или определенный набор единичных показателей безотказности и ремонтпригодности, а также их комбинации. Если технический объект в процессе эксплуатации может находиться на хранении или транспортироваться, то также необходимо задание показателей сохраняемости, а также задание показателей долговечности, если для технического объекта определены критерии достижения предельного состояния. Численные значения ПН устанавливают расчетными, экспериментальными или расчетно-

экспериментальными методами с использованием справочных статистических данных о надежности аналогов (прототипов) разрабатываемого технического объекта, а также данных эксплуатации и испытаний, полученных от поставщиков компонентов. Разрабатываемый технический объект соответствует требованиям по надежности при условии соответствия установленным требованиям всех ПН [3, 4].

На этапе разработки допускается: уточнение требований по надежности при соответствующем технико-экономическом обосновании в ходе рассмотрения возможных вариантов технического объекта и последующего расчета их надежности; выбор схемно-конструктивного варианта структуры, удовлетворяющей требованиям заказчика по совокупности ПН и затрат; уточнение значений ПН технического объекта и его элементов.

Анализ ГОСТ 27.003-2016 позволяет сделать вывод, что для сложных электротехнических систем, если они являются восстанавливаемыми и для них определены требования к долговечности и сохраняемости, общее количество задаваемых единичных и комплексных ПН находится в пределах 5-7 показателей. В ситуации, когда электротехническая система является уникальной, состоящей из перспективных, не имеющих аналогов элементов, достаточно того, чтобы все заданные ПН соответствовали установленным в техническом задании требованиям. Однако часто на практике в состав разрабатываемой или модернизируемой электротехнической

системы частично или полностью входят существующие элементы, для которых известны статистические данные о надежности. Поэтому на этапе разработки может быть несколько возможных схемно-конструктивных вариантов построения подобных систем, соответствующих заданным требованиям по надежности. Большое значение приобретает взвешенный подход к проблеме выбора того или иного проекта системы, представляющий собой решение многокритериальной задачи сравнительной оценки уровней надежности как одного из технических требований, предложенных к разработке вариантов. Также в соответствии с ГОСТ 15.016-2016 [5] аналогично требованиям по надежности в техническом задании указывают требования, характеристики, нормы, показатели и другие параметры, определяющие назначение, эксплуатационные характеристики разрабатываемых изделий. Поэтому перед разработчиком встает задача выбора такого варианта электротехнической системы, который бы удовлетворял всем техническим требованиям (требованиям к эксплуатации, стойкости, электромагнитной совместимости и т.д.), в том числе требованиям по надежности, указанным в задании. Различные схемно-конструктивные варианты электротехнической системы имеют разные по величине количественные ПН, не позволяющие однозначно отдать предпочтение тому или иному техническому решению. При этом разница между ПН может быть от незначительной до существенной, а превосходство одного варианта технического решения над другим возможно только в отдельных показателях из заданных в требованиях по надежности.

Таким образом, актуальность проведенного исследования обусловлена объективной необходимостью в формировании такого показателя надежности  $R$ , который характеризовал бы всю совокупность основных свойств надежности электротехнической системы, при условии соответствия требованиям по надежности всех заданных в техническом задании отдельных показателей [6]. В связи с тем, что в ГОСТ 27.002-2015 определения и перечень комплексных показателей строго регламентированы, предложено назвать этот показатель интегральным показателем надежности (ИПН).

Необходимо отметить, что авторы не ставят задачу разработки подхода к оценке ИПН электротехнической системы, цель предложенной методики – определение обобщенных показателей для нескольких схемно-конструктивных вариантов, синтезирующих отдельные ПН в единый. На следующем этапе оценки технического уровня альтернативных вариантов разрабатываемой системы уже с учетом всех требований, указанных в техническом задании, численное значение, характеризующее надежность, будет представлено одним единым показателем – ИПН, а не набором единичных и комплексных ПН.

#### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИПН 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 г. 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 [7-9].

Подробное описание порядка решения многокритериальных задач с использованием МАИ широко представлено в различных источниках [9-12].

МАИ обладает следующими достоинствами:

- учитывает различные факторы и множественность целей;
- учитывает возможный эффект взаимодействия факторов;
- сравнительная простота математических вычислений;
- для попарных сравнений используется шкала относительной важности, упорядочивающая и упрощающая процедуру выставления экспертных оценок;
- обладает возможностью присвоения альтернативным вариантам рангов (цифровых показателей, отображающих значимость или важность объекта).

Последнее положение предлагается использовать для формирования количественного значения ИПН альтернативных вариантов электротехнической системы, где в качестве критериев будут выступать соответствующие им ПН [13]. В качестве ИПН предлагается применить вычисленные значения глобальных (составных) приоритетов. Обращаем внимание, что определение ИПН осуществляется для конкретных структурно-схематических вариантов построения разрабатываемой системы и соответствующих им количественных значений ПН. Изменение какого-либо из этих положений приведет к повторному определению ИПН.

В качестве недостатка МАИ можно отметить следующее:

- количество показателей не должно превышать  $7 \pm 2$ , так как человеческое сознание не способно к одновременному восприятию и переработке более указанного числа блоков информации [14, 15];
- 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 разрабатываемой электротехнической системы проведем на конкретном примере.

АППРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИПН

Проверку работоспособности предложенной методики проведем на основе номенклатуры ПН, аналогичной номенклатуре сепаратора СДС 531 К-01, представленной в методических указаниях [16]. В соответствии с предложенной номенклатурой для центробежного сепаратора СДС 531 К-01, применяемого для обработки неагрессивных тонкодисперсионных суспензий химической и других отраслей промышленности, задают следующие требования по надежности:

- средняя наработка на отказ  $T_0$  – не менее 8000 ч;
- средний ресурс до капитального ремонта  $T_{р.к.р}$  – не менее 20000 ч;
- назначенный (полный) ресурс ротора  $T_{р.р}$  – не менее 40000 ч;
- назначенный (полный) срок службы  $T_{сл.н}$  – не менее 5 лет;
- коэффициент технического использования  $K_{т.и}$  – не менее 0,8.

Для того чтобы учесть требования к сохраняемости разрабатываемого сепаратора, введем еще один показатель – средний срок сохраняемости  $T_{с.сп}$ , и требования к нему – не менее 20 месяцев [17].

Допустим, что предложено три возможных варианта разрабатываемого центробежного сепаратора (ЦС) с предварительно рассчитанными значениями показателей, приведенными в **табл. 1**.

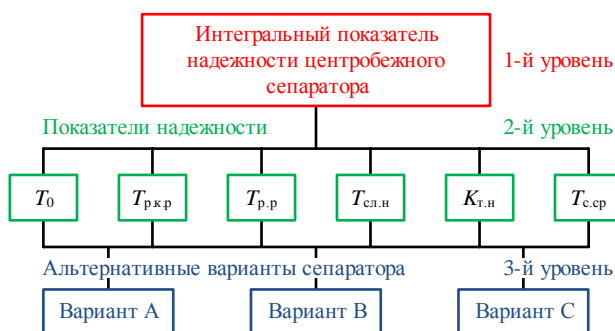
Используя МАИ, требуется рассчитать ИПН  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  альтернативных вариантов ЦС, для последующего комплексного анализа соответствия всех технических требований к разрабатываемой системе.

Декомпозиция задачи в иерархию. Декомпозиция задачи вычисления ИПН представлена на **рис. 1**.

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 трех альтернативных вариантов ЦС. Такая иерархия называется доминантной.

**Таблица 1**  
Показатели надежности вариантов ЦС

Вариант ЦС	Показатели надежности					
	$T_0$	$T_{р.к.р}$	$T_{р.р}$	$T_{сл.н}$	$K_{т.и}$	$T_{с.сп}$
<b>A</b>	8,5	23	43	7	0,9	24
<b>B</b>	11	20	43	6	0,87	24
<b>C</b>	9	21,5	41	5	0,89	36



**Рис. 1.** Декомпозиция задачи вычисления ИПН ЦС

**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 ЦС по отношению к элементам 2-го уровня. Для проведения субъективных парных сравнений автором Т. Саати была разработана численная шкала относительной важности [11,15], в соответствии с которой экспертами определяется вес функций (показателей), характеризующих разрабатываемую электротехническую систему.

Для построения матрицы попарных суждений для 2-го уровня  $A_1$  размерностью  $k \times k$ , где  $k = 6$  – 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 (средняя наработка на отказ  $T_0$ ), при этом задаются вопросом, насколько этот показатель важнее показателей, указанных в заголовке графы, соответственно среднего ресурса до капитального ремонта  $T_{р.к.р}$  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 [18], 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**).

Для составления матрицы попарных суждений для 2-го уровня  $A_1$  привлекается группа экспертов, которая в ходе обсуждений и на основании консенсуса, устанавливает числовые значения для элементов матрицы, используя шкалу относительной важности.

Примечание:  $j = \overline{1, k}$  – порядковый номер показателя надежности.

Составление матриц  $A_2(j = \overline{1, k})$  для 3-го уровня (уровня альтернативных вариантов) существенно упрощается, так как значения ПН выражены количественно, а не качественно. Элементы матриц  $A_2(j = \overline{1, k})$  формируются делением значений ПН соответствующих альтернативных вариантов ЦС применительно к каждому показателю  $j$  (матрицы  $A_{21}, \dots, A_{26}$ ). Матрицы  $A_{2j}$  попарных сравнений для третьего уровня представлены в **табл. 3**. Таким образом, результатом действий на этом этапе является матрица попарных сравнений для уровня ПН и матрицы для уровня альтернативных вариантов ЦС.

**Таблица 2**  
Матрица попарных сравнений для 2-го уровня

Показатели	$T_0$	$T_{р.к.р}$	$T_{р.р}$	$T_{сл.н}$	$K_{т.и}$	$T_{с.сп}$
$T_0$	<b>1</b>	3	2	1/4	1/5	2
$T_{р.к.р}$	1/3	<b>1</b>	1/3	1/2	1/4	2
$T_{р.р}$	1/2	3	<b>1</b>	1/2	1/2	3
$T_{сл.н}$	4	2	2	<b>1</b>	1/2	3
$K_{т.и}$	5	4	2	2	<b>1</b>	5
$T_{с.сп}$	1/2	1/2	1/3	1/3	1/5	<b>1</b>

Таблица 3  
Матрицы попарных сравнений для уровня альтернативных вариантов ЦС

Матрица $A_{21}$ попарных сравнений для показателя $T_0$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	11/8,5=1,294	9/8,5=1,059
<i>B</i>	8,5/11=0,773	1	9/11=0,818
<i>C</i>	8,5/9=0,944	11/9=1,222	1
Матрица $A_{22}$ попарных сравнений для показателя $T_{p,k,p}$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	20/23=0,87	21,5/23=0,935
<i>B</i>	23/20=1,15	1	21,5/20=1,07
<i>C</i>	23/21,5=1,07	20/21,5=0,93	1
Матрица $A_{23}$ попарных сравнений показателя $T_{p,p}$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	43/43=1	41/43=0,953
<i>B</i>	43/43=1	1	41/43=0,953
<i>C</i>	43/41=1,049	43/41=1,049	1
Матрица $A_{24}$ попарных сравнений показателя $T_{cl,n}$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	6/7=0,867	5/7=0,714
<i>B</i>	7/6=1,167	1	5/6=0,833
<i>C</i>	7/5=1,4	6/5=1,2	1
Матрица $A_{25}$ попарных сравнений показателя $K_{r,n}$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	0,87/0,9=0,967	0,89/0,9=0,989
<i>B</i>	0,9/0,87=1,035	1	0,89/0,87=1,023
<i>C</i>	0,9/0,89=1,011	0,87/0,89=0,978	1
Матрица $A_{26}$ попарных сравнений показателя $T_{c,cp}$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	24/24=1	36/24=1,5
<i>B</i>	24/24=1	1	36/24=1,5
<i>C</i>	24/36=0,667	24/36=0,667	1

**Определение локальных приоритетов и согласованности мнений экспертов для второго уровня**

Для матрицы 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

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

где  $\bar{a}_i$  – среднее геометрическое элементов  $i$ -й строки матрицы  $A_1$ ,  $i = \overline{1, k}$ .

$$\bar{a}_i = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k a_i}.$$

В условиях решения нашей задачи собственный вектор  $\bar{A}$  матрицы  $A_1$  получил следующие значения:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,125 \\ 0,075 \\ 0,139 \\ 0,232 \\ 0,371 \\ 0,057 \end{bmatrix},$$

где  $x_1$  – оценка приоритета показателя  $T_0$ ;  $x_2$  – оценка приоритета показателя  $T_{p,k,p}$ ;  $x_3$  – оценка приоритета показателя  $T_{p,p}$ ;  $x_4$  – оценка приоритета показателя  $T_{cl,n}$ ;  $x_5$  – оценка приоритета показателя  $K_{r,n}$ ;  $x_6$  – оценка приоритета показателя  $T_{c,cp}$ .

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

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

где  $\lambda_{\max i}$  – собственные значения вектора Перрона [15];  $a_{ij}$  – значение элемента матрицы  $A_1$  в  $i$ -й строке  $j$ -м столбце,  $j = \overline{1, k}$ .

Используя описанную процедуру, определим локальные приоритеты  $\lambda_{\max i}$  для 2-го уровня (уровня показателей). В условиях решения задачи формирования ИПН альтернативных вариантов ЦС вектор локальных приоритетов представлен следующими значениями:

$$\lambda_{\max} = \begin{bmatrix} 1,421 \\ 1,015 \\ 1,068 \\ 1,063 \\ 0,982 \\ 0,92 \end{bmatrix}.$$

Сумма всех элементов полученного вектора локальных приоритетов  $\lambda_{\max}$  равна 6,469. Обозначим ее буквой  $\Lambda$  [15]. При абсолютной согласованности матрицы соблюдается условие  $\Lambda = k$ .

После определения локальных приоритетов  $\lambda_{\max i}$  и величины  $\Lambda$  следует процедура оценки согласованности мнений экспертов при формировании матрицы попарных сравнений  $A_1$  для 2-го 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. Если согласованность существенно нарушена, то рекомендуется поиск дополнительной информации и пересмотр суждений экспертов на втором туре экспертизы.

Вычисляем индекс согласованности по формуле

$$\mu = \frac{\Lambda - k}{k - 1} = \frac{6,469 - 6}{5} = 0,094.$$

Сравним величину  $\mu$  с величиной случайной согласованности  $\mu_{rand}$ , которая получилась бы при случайном наборе количественных суждений из шкалы 1/9,

1/8, 1/7, ..., 1, 2, ..., 9, но при условии создания обратносимметричной матрицы. В источнике [9] приводится таблица, позволяющая определить среднюю согласованность  $\mu_{rand}$  для случайных матриц различного порядка. В условиях решения нашей задачи для  $k=6$  величина  $\mu_{rand} = 1,24$ . Для сравнения величин  $\mu$  и  $\mu_{rand}$  найдем отношение согласованности (англ. *consistency ratio* – CR) по формуле

$$CR = \frac{\mu}{\mu_{rand}} \cdot 100\% = 7,6\%.$$

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 [15, 19]. Так как  $CR = 7,6\%$ , можно сделать вывод о хорошей согласованности матрицы попарных сравнений  $A_1$ .

**Определение локальных приоритетов для третьего уровня**

Далее аналогичным образом определяются локальные приоритеты для 3-го уровня (уровня вариантов ЦС). Так как значения показателей надежности выражены в числах, то элементы матриц определяются делением значений показателей из табл. 1 соответствующих вариантов ЦС. Результаты вычислений представлены в табл. 4.

Таблица 4

Матрицы попарных сравнений для 3-го уровня вариантов ЦС

Вариант ЦС	A	B	C	Оценка вектора приоритетов $x_i$	Вектор приоритетов $\lambda_{\max i}$
<b>Для средней наработки на отказ <math>T_0</math></b>					
A	1	1,294	1,059	0,368	1
B	0,773	1	0,818	0,284	1
C	0,944	1,222	1	0,347	1
Определение $\Lambda_1$					3
<b>Для среднего ресурса до капитального ремонта <math>T_{p.k.p}</math></b>					
A	1	0,87	0,935	0,311	1
B	1,15	1	1,07	0,357	1
C	1,07	0,93	1	0,332	1
Определение $\Lambda_2$					3
<b>Для назначенного (полного) ресурса ротора <math>T_{p.p}</math></b>					
A	1	1	0,953	0,328	1
B	1	1	0,953	0,328	1
C	1,049	1,049	1	0,344	1
Определение $\Lambda_3$					3
<b>Для назначенного (полного) срока службы <math>T_{cл.н}</math></b>					
A	1	0,867	0,714	0,28	1
B	1,167	1	0,833	0,327	1
C	1,4	1,2	1	0,393	1
Определение $\Lambda_4$					3
<b>Для коэффициента технического использования <math>K_{т.н}</math></b>					
A	1	0,967	0,989	0,328	1
B	1,035	1	1,023	0,34	1
C	1,011	0,978	1	0,332	1
Определение $\Lambda_5$					3
<b>Для среднего срока сохраняемости <math>T_{c.ср}</math></b>					
A	1	1	1,5	0,375	1
B	1	1	1,5	0,375	1
C	0,667	0,667	1	0,25	1
Определение $\Lambda_6$					3

**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, то есть 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.

Полученные в табл. 4 результаты представим в виде матрицы  $A_3$  размером  $6 \times 3$ , где столбцы будут соответствовать оценкам вектора приоритетов ПН 2-го уровня, а строки – альтернативным вариантам ЦС. Таким образом, матрица  $A_3$  приоритетов по каждому показателю примет следующий вид:

$$A_3 = \begin{bmatrix} x_1^{(T_0)} & x_1^{(T_{p.k.p})} & x_1^{(T_{p.p})} & x_1^{(T_{cл.н})} & x_1^{(K_{т.н})} & x_1^{(T_{c.ср})} \\ x_2^{(T_0)} & x_2^{(T_{p.k.p})} & x_2^{(T_{p.p})} & x_2^{(T_{cл.н})} & x_2^{(K_{т.н})} & x_2^{(T_{c.ср})} \\ x_3^{(T_0)} & x_3^{(T_{p.k.p})} & x_3^{(T_{p.p})} & x_3^{(T_{cл.н})} & x_3^{(K_{т.н})} & x_3^{(T_{c.ср})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,368 & 0,311 & 0,328 & 0,28 & 0,328 & 0,375 \\ 0,284 & 0,357 & 0,328 & 0,327 & 0,34 & 0,375 \\ 0,347 & 0,332 & 0,344 & 0,393 & 0,332 & 0,25 \end{bmatrix}.$$

Для определения вектора глобальных приоритетов воспользуемся формулой

$$\bar{W} = A_3 \cdot \bar{A} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,323 \\ 0,331 \\ 0,345 \end{bmatrix},$$

где  $W_1, W_2, W_3$  – глобальные приоритеты соответствующих альтернативных вариантов ЦС. Подставив полученные числовые значения, получим следующие оценки глобальных (собственных) приоритетов:

1. Сумма глобальных приоритетов должна быть равна 1.

2. Приравнявая вычисленные значения глобальных приоритетов  $W_1, W_2, W_3$  показателям  $R_1, R_2$  и  $R_3$ , получим численные значения ИПН соответствующих вариантов ЦС, характеризующие набор единичных и комплексного ПН. В результате решения нашей задачи наибольший ИПН соответствует третьему варианту сепаратора, так как  $R_3 = 0,345 > 0,331 > 0,323$ . В дальнейшем эти показатели, представляющие собой обобщенный (единый) ПН, могут быть использованы наряду с другими технико-экономическими требованиями к ЦС для последующего выбора наиболее предпочтительного схемно-конструктивного варианта разрабатываемой электротехнической системы.

Анализ результатов проведенных расчетов показал адекватность и корректность предложенного подхода и его пригодность к использованию для дальнейшего анализа ИПН альтернативных вариантов разрабатываемых электротехнических систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, подход к определению ИПН электротехнических систем на этапе разработки, синтезирующих до 5-7 отдельных показателей, характеризующих различные свойства надежности, позволяет дать комплексную оценку и на ее основе ранжировать варианты схемно-конструктивных решений. Предложенный механизм определения ИПН вариантов разрабатываемой электротехнической системы 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 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.
- ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: Стандартинформ, 2018. 19 с.
- Методика выбора рационального варианта многофункциональной авиационной системы / П.П. Павлов, Р.С. Литвиненко, М.Н. Мубаракшин, И.О. Юшин, В.М. Нигматуллин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2008. №2. С. 62-66.
- Георгиевская Е.В. Методические принципы оценки надежности оборудования на ранних стадиях проектирования // Новое в Российской электроэнергетике. 2018. №11. С. 25-36.
- ГОСТ 15.016–2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. М.: Стандартинформ, 2020. 28 с.
- Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Залялов Р.Р. Подход к исследованию надежности электротранспортной системы города как сложной технической системы // Мир транспорта и технологических машин. 2017. №3(58). С. 108-114.
- Оценка технического уровня сложных систем на этапе разработки / Р.С. Литвиненко, П.П. Павлов, В.М. Гуреев, Р.Ш. Мисбахов // Вестник машиностроения. 2015. №6. С. 35-39.
- Cultural ranking of countries using the analytic hierarchy process methodology / J. Li, Y. Yang, T.L. Saaty, H. Guo // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1074. Pp. 949-963. doi: 10.1007/978-3-030-32456-8\_102.
- Saaty T.L. 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. Vol. 233. Pp. 363-419. doi: 10.1007/0-387-23081-5\_9.
- Saaty T.L. Relative measurement and its generalization in decision making: why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors - the analytic hierarchy // Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics (RACSAM). 2008. Vol. 102. No. 2. Pp. 251-318. doi: 10.1007/BF03191825.
- 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.
- Выбор альтернативного варианта разрабатываемого транспортного средства с использованием метода анализа иерархий / Р.С. Литвиненко, П.П. Павлов, В.М. Гуреев, Р.Ш. Мисбахов // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. Т.11. №4. С. 21-25.
- 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. doi: 10.12737/article\_5bf7e35fd74483.00537194.
- Saaty T.L. Seven is the magic number in nature // Proceedings of the American philosophical society. 2016. Vol. 160. No. 4. Pp. 335-360.
- 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.
- РД 26.260.005–1991. Методические указания. Оборудование химическое. Номенклатура показателей и методы оценки надежности. М.: НИИХиммаш, 1992. 14 с.
- ГОСТ 24.885–1991. Сепараторы центробежные жидкостные. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1992. 22 с.
- 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.
- 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. doi: 10.20310/1810-0198-2017-22-6-1335-1340.

Поступила в редакцию 25 декабря 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD FOR DETERMINING THE INTEGRAL RELIABILITY INDEX OF THE DEVELOPED ELECTROTECHNICAL SYSTEM

Ruslan S. Litvinenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electrical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: litrus277@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8017-5868>

Aver E. Auhadeev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electrical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: auhadeevkgma@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>



Bulat I. Safiullin

Master's Degree student, Department of Electrical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: gougole2010@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5447-0724>

Ivan V. Cherepenkin

Master's Degree student, Department of Electrical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: iwan.tcherepenkin@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0781-9938>

Mariya V. Ferapontova

Master's Degree student, Department of Electrical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: litrus@km.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7754-743X>

When setting reliability requirements at the stage of designing electrotechnical systems, if they are recoverable given that requirements for durability and preservation are defined for them, the total number of single and complex measures of reliability as defined in reference documents is within 5-7. The developed schematic and design versions of these systems have reliability that differs in quantitative figures, which make it impossible to give clear preference to a certain technical solution. Therefore, there is an objective need to have such a measure of reliability, which would completely describe basic properties of the reliability of a electrotechnical system, if individual measures meet the specification requirements. The paper proposes an approach for generating integrated reliability measures for alternatives of the electrotechnical system being designed. The approach is based on the use of the Analytic Hierarchy Process (AHP) developed by Thomas L. Saaty and widely used in addressing various multicriteria problems. Application of this method makes it possible to carry out the analysis of expert and statistical information on reliability, taking into account the weight characteristics of indicators. Calculated values of global (composite) priorities of alternative variants of the developed system, as an integral (complex) indicator of reliability is proposed to apply. The integrated reliability measure for options of the electrotechnical system is a consolidated characterization that synthesizes individual single and complex reliability measures defined in the specification. The use of the integrated measure to determine the level of reliability makes it possible to obtain a formalized result that is expressed through the corresponding value of the vector of global priorities and facilitates the quantification of the superiority in terms of reliability of one alternative of the electrotechnical system over another. The operability and adequacy of the approach taking as an example determining the integral indicators of the reliability of centrifugal separator options for the chemical industry was carried out

**Keywords:** dependability, system, measure, analysis, method, hierarchy, level, decomposition, stage.

#### REFERENCES

1. State Standard 27.002–2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 24 p. (In Russian)
2. State Standard 27.003–2016. Industrial product dependability. Contents and general rules for specifying dependability requirements. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 19 p. (In Russian)
3. Pavlov P.P., Litvinenko R.S., Mubarakshin M.N., Yushin I.O., Nigmatullin V.M. Selection procedure of an efficient variant of a multi-purpose aircraft system. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Aviacionnaya tekhnika* [Izv. VUZ. Aviatcionnaya Tekhnika], 2008, no.2. pp. 62-66. (In Russian)
4. Georgievskaya E.V. Valuation principle of equipment reliability at early stages of development. *Novoe v Rossiiskoi elektroenergetike*. [New developments in electrical engineering], 2018; no. 11: pp. 25-36. (In Russian)
5. State Standard 15.016–2016. System of products development and launching into manufacture. Technical assignment. Requirements to contents and form of presentation. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 28 p. (In Russian)
6. Litvinenko R.S., Aukhadееv A.E., Zalyalov R.R. New approach to reliability study in city electric transport taken as a complex engineering system. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [Transport and Technological Cars], 2017, no. 3(58), pp. 108-114. (In Russian)
7. Litvinenko R.S., Pavlov P.P., Gureev V.M., Misbahov R.Sh. Assessment of technical level of complex systems at the stage of development. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research], 2015, no.6, pp. 35-39. (In Russian)
8. Li J., Yang Y., Saaty T.L., Guo H. Cultural ranking of countries using the analytic hierarchy process methodology. *Advances in intelligent systems and computing*. 2020. Vol. 1074. Pp. 949-963.
9. Saaty T.L. 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. Vol.233. Pp. 363-419.
10. Saaty T.L. 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. Vol. 102. No. 2. Pp. 251-318.
11. Bykova T.V. Method of hierarchy analysis as a tool for solution of practical tasks of multicriteria optimization. *Matematicheskoe modelirovanie, kompyuternyi i naturnyi eksperiment v estestvennykh naukakh* [Mathematical modeling, computer and full-scale experiment in natural sciences], 2019, no.1, pp. 48-62. (In Russian)
12. Litvinenko R.S., Pavlov P.P., Gureev V.M., Misbahov R.Sh. Selection of an alternative variant of the vehicle under development using hierarchy analysis method. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, [Transport: science, equipment, management], 2015, no. 11(4), pp.21-25. (In Russian)
13. Voronkov I.E. Vector of global priorities of hierarchy analysis method as a relative index of reliability level of potential participants of investment and construction projects. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G.Shoukhov], 2018, no. 11, pp. 137-145. (In Russian)
14. Saaty T.L. Seven is the magic number in nature. *Proceedings of the American philosophical society*. 2016. Vol. 160. No. 4. Pp. 335-360.
15. Saati T.L. Measuring of unperceivable. An approach to relative measurements based on the main eigenvector of matrix of pairwise comparison. *Cloud of science*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 5-39. (In Russian)
16. Guidelines 26.260.005–1991. Guidelines. Chemical processing equipment. List of parameters and methods of reliability assessment. Moscow, NIIhimmash Publ., 1992. 14 p. (In Russian)

17. State Standard 24.885–1991. Centrifugal separators for liquids. General specifications. Moscow, Standartinform Publ., 1992. 22 p. (In Russian)
  18. Slavnov K.V. Characteristics of the variant of T. Saati hierarchy analysis method for proprietary information control systems. *Okhrana, bezopasnost, svyaz* [Protection, safety, communication], 2017, no. 1-2, pp. 119-125. (In Russian)
  19. Finogenko I.A., Dyakovich M.P. Method of hierarchy analysis and development of integral indicators complex systems. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tambov university. Series: natural and technical sciences], 2017, vol. 22, no. 6-1, pp. 1335-1340. (In Russian)
- 

Методика определения интегрального показателя надежности разрабатываемой электротехнической системы / Р.С. Литвиненко, А.Э. Аухадеев, Б.И. Сафиуллин, И.В. Черепенькин, М.В. Ферапонтова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 1(50). С. 50-57. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-50-57](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-50-57)

Litvinenko R.S., Auhadeev A.E., Safiullin B.I., Cherepenkin I.V., Ferapontova M.V. Method for Determining the Integral Reliability Index of the Developed Electrotechnical System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 50-57. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-50-57](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-50-57)

---