

Научная статья

УДК 004.032

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-10-15>

Оценка состояния сложной эргатической системы на примере системы обеспечения единства измерений

Илья Владимирович Красавин^{1✉}, Андрей Валерьевич Яшин²

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, ¹i.krasavin@vniims.ru✉, ²Ayashin1@mail.ru

Аннотация. Оценка состояния системы обеспечения единства измерений является актуальной и необходима для мониторинга и прогнозирования состояния. Предложен подход к разработке методологии мониторинга и прогнозирования состояния системы обеспечения единства измерений, обеспечивающий учёт взаимного влияния подсистем друг на друга. Подход основан на методе анализа иерархий. Рассмотрена декомпозиция системы обеспечения единства измерений для дальнейшей обработки последовательности суждений лица (группы лиц), принимающего решение. Суждения основаны на парных сравнениях элементов декомпозиции. Описана методика обработки суждений группы экспертов в целях получения обобщённого суждения по парным сравнениям. Полученные результаты могут применяться при мониторинге состояния системы обеспечения единства измерений и прогнозировании измерительных потребностей экономики и общества.

Ключевые слова: система обеспечения единства измерений, мониторинг состояния, анализ иерархий

Для цитирования: Красавин И. В., Яшин А. В. Оценка состояния сложной эргатической системы на примере системы обеспечения единства измерений // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 10–15. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-10-15>

Assessing the state of a complex ergatic system on the example of a system for ensuring the uniformity of measurements

Ilya V. Krasavin^{1✉}, Andrey V. Yashin²

^{1, 2} Russian Research Institute for Metrological Service, Moscow, Russia, ¹i.krasavin@vniims.ru✉, ²Ayashin1@mail.ru

Abstract. Assessment of the state of the system of ensuring the uniformity of measurements is an urgent task, the solution of which is necessary for monitoring and forecasting its state. The paper proposes an approach to the development of a methodology for monitoring the state of the system to ensure the uniformity of measurements and forecasting its state, which takes into account the mutual influence of subsystems on each other. The approach is based on the hierarchy analysis method. The decomposition of the system of ensuring the uniformity of measurements for further processing of the sequence of judgments of the person (group of persons) making the decision is considered. The judgments are based on paired comparisons of the decomposition elements. The method of processing the judgments of a group of experts in order to obtain a generalized judgment on paired comparisons is described. The obtained results can be used as part of monitoring the state of the system for ensuring the uniformity of measurements and forecasting the measurement needs of the economy and society.

Keywords: system for ensuring the uniformity of measurements, state monitoring, hierarchy analysis

Введение. Основные направления и приоритеты развития системы обеспечения единства измерений (далее – Системы) определены в Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 г., которая утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 апреля 2017 г. № 737-р. Одним из основных направлений и приоритетов развития Системы является создание механизма прогнозирования потребностей экономики и общества в измерениях, а отсутствие этого механизма отнесено к системным проблемам обеспечения единства измерений в России. Актуальность данной задачи была подтверждена Федеральным законом от 27 декабря 2019 г. № 496-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений».

В часть 2 статьи 21 (определяющей задачи Минпромторга России и Росстандарта) данного закона внесён дополнительный пункт 7, где указаны следующие задачи: организация мониторинга состояния Системы; прогнозирование измерительных потребностей экономики и общества. Решение этих задач обеспечивает формирование необходимых управленческих решений для перевода Системы в требуемое целевое состояние.

Согласно ГОСТ Р 8.000-2015 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения» обеспечение единства измерений подразумевает деятельность, направленную на установление и применение научных, правовых, организационных и технических основ, правил, норм и средств, необходимых для достижения

состояния измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы. Совокупность субъектов, норм, средств и видов деятельности, предназначенная для обеспечения единства измерений, образует Систему.

Система – это сложная эволюционирующая эргатическая система, состояние которой оценивается по текущему состоянию в целом и по состоянию подсистем. К особенностям Системы как объекта исследований относят следующее: функционирование в условиях стремительно изменяющейся внешней среды, которая оказывает влияние на структуру Системы и выполняемые функции; невозможность построения «классической» математической модели, обладающей полнотой в части возможности оценки состояния; необходимость использования вербального описания ряда свойств; иерархичность.

Общей методологией решения подобных задач является системный подход. В методическом аппарате оценки состояния Системы необходимо учитывать взаимодействие между подсистемами и возможность преобразования вербального описания показателей в численные значения с целью дальнейшей обработки для принятия решений. Одним из методов, позволяющих реализовать указанные требования, является метод анализа иерархий [1–3].

Цель настоящей работы – формирование такой методологии оценки состояния Системы, которая при решении

задач мониторинга состояния обеспечивает учёт взаимного влияния элементов (подсистем) друг на друга.

Построение иерархической модели Системы. Метод анализа иерархий – математический инструмент системного подхода к решению проблем принятия решений. Сущность метода состоит в декомпозиции проблемы на более простые составляющие с дальнейшей обработкой методом парных сравнений последовательности суждений лица, принимающего решение. В результате можно получить относительную степень (интенсивность) взаимодействия элементов иерархии. Метод анализа иерархий включает процедуры синтеза множественных суждений, получения приоритетности критериев и нахождения альтернативных решений [4]. К основным этапам метода анализа иерархий относятся следующие:

построение качественной модели проблемы в виде иерархии, включающей цель, альтернативные варианты достижения цели и критерии для оценки качества альтернатив;

определение приоритетов всех элементов иерархии с использованием метода парных сравнений;

синтез глобальных приоритетов альтернатив путём линейной свёртки приоритетов элементов иерархии;

проверка суждений на согласованность;

принятие решения на основе полученных результатов.

Рассмотрим применение метода анализа иерархий для оценки состояния Системы. Первым этапом метода анализа иерархии является декомпозиция задачи оценки состояния Системы. На первом (высшем) уровне находится общая



Рис. 1. Иерархическая модель оценки состояния системы обеспечения единства измерений (Системы): СИ – средства измерений; ЮЛ/ИП – юридические лица/индивидуальные предприниматели; ОЕИ – обеспечение единства измерений

Fig. 1. Hierarchical model for assessing the state of the system for ensuring the uniformity of measurements (System): SI – measuring instruments; LE/SP – legal entities/individual entrepreneurs; EUM – ensuring the uniformity of measurements

Таблица 1

Шкала относительной важности $I_{ОВ}$

$I_{ОВ}$	Определение (пояснение)
1	Равная важность (равный вклад двух видов деятельности в цель)
3	Умеренное превосходство (опыт и суждение дают лёгкое превосходство одному виду деятельности над другим)
5	Существенное или сильное превосходство (опыт и суждение дают существенное превосходство одному виду деятельности над другим)
7	Значительное превосходство (одному виду деятельности дается настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным)
9	Очень сильное превосходство (очевидность превосходства одного вида деятельности над другим подтверждается наиболее сильно)
2, 4, 6, 8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями (применяются в компромиссном случае)
$I_{ОВ}^{-1}$	При сравнении первого вида деятельности со вторым получено значение $I_{ОВ}$, тогда результатом сравнения второго вида деятельности с первым будет значение $I_{ОВ}^{-1}$

цель – оценка состояния, на следующем уровне – цели функционирования Системы: результаты измерений выражены в узаконенных единицах величин или в значениях, допустимых для принятых шкал измерений; показатели точности измерений не выходят за установленные границы [5–7].

На достижение данных целей направлены формы государственного регулирования в области обеспечения единства измерений (Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»): утверждение типов стандартных образцов или средств измерений (СИ); поверка СИ; метрологическая экспертиза; федеральный государственный метрологический надзор; аттестация методик (методов) измерений; аккредитация юридических лиц и индивидуальных предпринимателей на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений.

В составе Системы можно выделить следующие подсистемы: научную (фундаментальную и прикладную); правовую; организационную; нормативно-методическую; техническую. Таким образом, в первом приближении можно построить иерархическую модель, характеризующую состояние Системы (рис. 1). В полученной иерархии каждый элемент уровня зависит от всех расположенных ниже элементов, т. е. элемент вышестоящего уровня является критерием для элементов нижестоящего уровня, а элементы нижестоящего уровня – альтернативами для элементов вышестоящего уровня.

Определение приоритетов элементов иерархии с использованием метода парных сравнений. Следующим этапом является разработка и установление приоритетов критериев, а также построение и оценка альтернатив по каждому из критериев с целью выявления доминанты. Для этого элементы иерархии попарно сравнивают с использованием субъективных суждений. Субъективные суждения численно оценивают по шкале измерений относительной важности (ОВ) суждений и находят веса (интенсивности) каждого критерия. Для сравнения ОВ критериев на втором уровне по отношению к общей цели на первом уровне строят матрицу парных сравнений каждой альтернативы второго

Таблица 2

Пример согласованности случайных матриц

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ИС _p	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

уровня по отношению к цели первого уровня. Подобные матрицы строят для парных сравнений каждой альтернативы на третьем и четвертом уровнях по отношению к критериям второго и третьего уровней соответственно.

В перечень матриц парных сравнений ОВ критериев для иерархии, представленной на рис. 1, входят матрица парных сравнений для критерия «Состояние Системы» альтернатив второго уровня, две матрицы парных сравнений для критериев второго уровня и альтернатив третьего уровня, шесть матриц сравнения для критериев третьего уровня и альтернатив четвертого уровня.

Клетки матриц заполняют оценками или суждениями об интенсивности ОВ $I_{ОВ}$ сравниваемых отдельных подсистем (предметов) по отношению к верхней цели или верхнему критерию. В рассматриваемом случае оценки должны быть получены в результате субъективных, но продуманных суждений группы экспертов по данной проблеме. При этом целесообразно использовать шкалу измерения таких суждений, приведенную в табл. 1. Эффективность данной шкалы подтверждена большим количеством приложений, а правомочность доказана теоретически при сравнении со многими шкалами [4, 8–10].

По результатам сбора суждений экспертов строят матрицы парных сравнений размерностью $n \times n$:

$$W = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & \dots & w_1/w_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}.$$

Затем рассчитывают вектор локальных приоритетов $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, где

$$x_i = \sqrt[n]{\frac{w_i}{w_1} \frac{w_i}{w_2} \dots \frac{w_i}{w_n}} / \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\frac{w_i}{w_1} \frac{w_i}{w_2} \dots \frac{w_i}{w_n}}.$$

Далее рассчитывают собственное значение $\lambda_{\max}$ матрицы W , индекс согласованности ИС и отношение согласованности ОС для контроля согласованности матрицы W по следующим формулам:

$$\lambda_{\max} = XY^T; Y = \left(\sum_{j=1}^n \frac{w_j}{w_1}, \sum_{j=1}^n \frac{w_j}{w_2}, \dots, \sum_{j=1}^n \frac{w_j}{w_n} \right);$$

$$ИС = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1); ОС = ИС / ИС_p,$$

где $ИС_p$ – показательное значение индекса согласованности матрицы размерностью n , заполненной при случайном моделировании (табл. 2).

При этом значение ОС не должно превышать 10 %, в противном случае необходимо исследовать задачу более детально и проверить суждения.

Примеры заполнения матриц парных сравнений для критериев К1 «Состояние Системы», К2 «Выражение результатов измерений в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений» и К3 «Утверждение типов стандартных образцов или СИ» представлены в табл. 3–5. В табл. 3 приведены обозначения целей функционирования системы: Ц1 – выражение результатов измерений в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным

шкалам измерений; Ц2 – нахождение показателей точности измерений в установленных границах.

В табл. 4 введены следующие обозначения форм государственного регулирования в области обеспечения единства измерений: Ф1 – утверждение типов стандартных образцов или СИ; Ф2 – поверка СИ; Ф3 – метрологическая экспертиза; Ф4 – федеральный государственный метрологический надзор; Ф5 – аттестация методик (методов) измерений; Ф6 – аккредитация ЮЛ/ИП на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений.

Таблица 3

Матрица парных сравнений для критерия К1 альтернатив второго уровня

К1	Ц1	Ц2
Ц1	1	5 ⁻¹
Ц2	5	1

Таблица 4

Матрица парных сравнений для критерия К2 альтернатив третьего уровня

К2	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6
Ф1	1	7 ⁻¹	3 ⁻¹	7 ⁻¹	1	7 ⁻¹
Ф2	7	1	3 ⁻¹	5 ⁻¹	7 ⁻¹	1
Ф3	3	3	1	7	3 ⁻¹	3
Ф4	7	5	7 ⁻¹	1	7 ⁻¹	1
Ф5	1	7	3	7	1	7 ⁻¹
Ф6	7	1	3 ⁻¹	1	7	1

Таблица 5

Матрица парных сравнений для критерия К3 альтернатив четвертого уровня

К3	П1	П2	П3	П4	П5
П1	1	1	3 ⁻¹	3 ⁻¹	5 ⁻¹
П2	1	1	3 ⁻¹	1	5 ⁻¹
П3	3	3	1	3 ⁻¹	5 ⁻¹
П5	3	1	3	1	3 ⁻¹
П6	5	5	5	3	1

Ф3 – метрологическая экспертиза; Ф4 – федеральный государственный метрологический надзор; Ф5 – аттестация методик (методов) измерений; Ф6 – аккредитация ЮЛ/ИП на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений (ЮЛ, ИП – юридические лица и индивидуальные предприниматели).

В табл. 5 приведены обозначения следующих подсистем Системы: П1 – научная (фундаментальная и прикладная); П2 – правовая; П3 – организационная; П4 – нормативно-методическая; П5 – техническая.

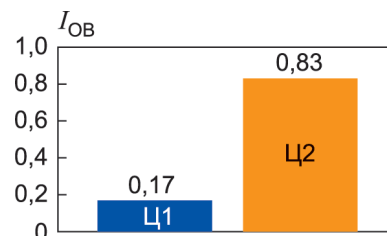


Рис. 2. Вектор приоритетов для критерия К1 «Состояние Системы»: Ц1 – выражение результатов измерений в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений; Ц2 – нахождение показателей точности измерений в установленных границах

Fig. 2. Hierarchical model for assessing the state of the system for ensuring the unity of measurements priority vector for the criterion K1 “State of the system for ensuring the unity of measurements”:

C1 – expression of measurement results in legalized units of quantities or in values according to established measurement scales; C2 – finding measurement accuracy indicators within the established boundaries

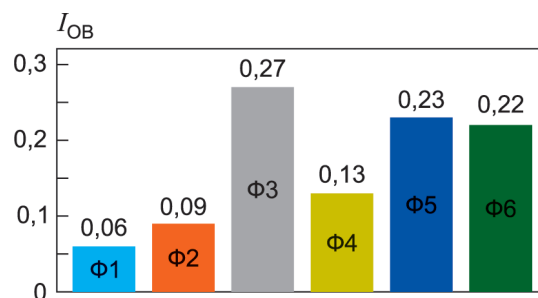


Рис. 3. Вектор приоритетов для критерия К2 «Выражение результатов измерений в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений»:

Ф1 – утверждение типов стандартных образцов или СИ; Ф2 – поверка СИ; Ф3 – метрологическая экспертиза; Ф4 – федеральный государственный метрологический надзор; Ф5 – аттестация методик (методов) измерений; Ф6 – аккредитация ЮЛ/ИП на выполнение работ и (или) оказание услуг в области ОЕИ; СИ, ЮЛ, ИП, ОЕИ – см. подрисуючную подпись к рис. 1

Fig. 3. Priority vector for the K2 criterion “Expression of measurement results in legalized units of quantities or in values according to established measurement scales”:

F1 – approval of types of standard samples or SI; F2 – SI verification; F3 – metrological examination; F4 – federal state metrological supervision; F5 – certification of measurement methods; F6 – accreditation of legal entities/sole proprietor for the performance of works and (or) the provision of services in the field of system for ensuring the uniformity of measurements

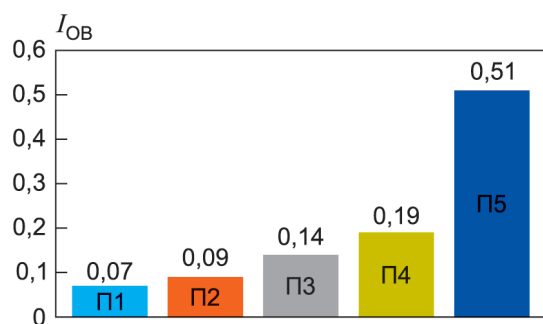


Рис. 4. Вектор приоритетов для критерия К3 «Утверждение типов стандартных образцов или СИ»; подсистемы системы обеспечения единства измерений:

П1 – научная (фундаментальная и прикладная); П2 – правовая; П3 – организационная; П4 – нормативно-методическая; П5 – техническая

Fig. 4. Priority vector for the criterion K3 "Approval of types of standard samples or SI"; subsystems of the system for ensuring the uniformity of measurements:

S1 – scientific (fundamental and applied); S2 – legal; S3 – organizational; S4 – normative and methodological; S5 – technical

Поскольку матрицы парных сравнений для критериев К1, К2, К3 заполнены в качестве примера, то для них не вычисляли индексы согласованности, однако рассчитали векторы приоритетов (рис. 2–4). Данные расчёты проводят для каждого уровня иерархии по всем матрицам парных сравнений, затем вычисляют глобальный вектор приоритетов. Полученные собственные векторы (один для каждого критерия) взвешивают с помощью соответствующей компоненты собственного вектора объединённого критерия, результаты суммируют и нормализуют. Таким образом, на основании опроса ряда экспертов для каждого критерия на различных уровнях и для общей цели можно получить обобщённые векторы приоритетов. В качестве экспертов могут выступить руководители региональных метрологических центров и национальных метрологических институтов. Для обеспечения корректности опроса экспертов целесообразно провести семинар, посвящённый особенностям заполнения опросных листов-анкет. Проведение опроса позволяет выявить подсистемы, оказывающие наибольшее влияние на состояние Системы с учётом взаимосвязей между подсистемами, что при дальнейшем их описании позволит получить достоверное представление о состоянии системы.

Заключение. Предложенный подход к разработке методологии мониторинга и прогнозирования состояния системы обеспечения единства измерений, обеспечивающий учёт взаимного влияния подсистем друг на друга и основанный на методе анализа иерархий, позволяет преобразовать субъективные суждения эксперта (группы экспертов) об относительной важности элементов (подсистем) системы в числовые значения для дальнейшей обработки и анализа и решить задачу комплексной оценки системы с учётом взаимодействия разнородных подсистем.

Изложенный подход может служить основой в дальнейших работах по мониторингу состояния системы обеспечения единства измерений.

Список литературы

1. Сухарев М. Г. Методы прогнозирования: Учеб. пособие. М.: РГУ нефти и газа, 2009. 208 с.
2. Трофимова Л. А., Трофимов В. В. Методы принятия управленческих решений. М.: Юрайт, 2014. 336 с.
3. Терелянский П. В. Непараметрическая экспертиза объектов сложной структуры. М.: Дашков и Ко, 2009. 221 с.
4. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем: Пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1991. 226 с.
5. Krasavin I. V., Yashin A. V., Tulekbaeva A. K., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics (MEA 2020)*, 16–17 October 2020, Moscow, Russia, 2020, vol. 1027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1027/1/012014>
6. Bryant Stephen, Joseph Kearns, *Public Administration Review*, 1982, vol. 42, no. 2, pp. 144–150. <https://doi.org/10.2307/975536>
7. Saaty T. L., Peniwati K., *Group Decision Making*, RWS Publications, Pittsburgh, 2008.
8. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети: Пер. с англ. М.: ЛКИ, 2008. 360 с.
9. Saaty T. L., Thomas 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/network process, *Review of the Royal Spanish Academy of Sciences RACSAM, Series A, Mathematics*, 2008, vol. 102, no. 2, pp. 251–318.
10. Красавин И. В. Методология разработки концепции строительства системы метрологического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации // Материалы 40 Научно-технической конференции молодых учёных-военных метрологов «Актуальные вопросы военной метрологии», Мытищи, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, 2015.

References

1. Sukharev M. G., *Forecasting methods*, Textbook, Moscow, Russian State University of Oil and Gas Publ., 2009, 208 p. (In Russ.)
2. Trofimova L. A., Trofimov V. V., *Methods of making managerial decisions*, Moscow, Yurayt Publ., 2014, 336 p. (In Russ.)
3. Terelyansky P. V., *Nonparametric examination of objects of complex structure*, Moscow, Dashkov and Co. Publ., 2009, 221 p. (In Russ.)
4. Thomas L. Saaty, Kevin P. Kearns, *Analytical Planning. The Organization of Systems*, Pergamon Press, 1985, 226 p.
5. Krasavin I. V., Yashin A. V., Tulekbaeva A. K., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics (MEA 2020)*, 16–17 October 2020, Moscow, Russia, 2020, vol. 1027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1027/1/012014>

6. Bryant Stephen, Joseph Kearns, *Public Administration Review*, 1982, vol. 42, no. 2, pp. 144–150.
<https://doi.org/10.2307/975536>

7. Saaty T. L., Peniwati K., *Group Decision Making*, RWS Publications, Pittsburgh, 2008.

8. Saaty T. L., *Decision making with dependence and feedback: the analytic network process: the organization and prioritization of complexity*, RWS Publications, Pittsburgh, 2001. 370 p.

9. Saaty T. L., Thomas 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/network process, *Review of the Royal Spanish Academy of Sciences RACSAM, Series A, Mathematics*, 2008, vol. 102, no. 2, pp. 251–318.

10. Krasavin I. V., Methodology for developing the concept of building a metrological support system for the Armed Forces of the Russian Federation, *Materials of the 40th scientific and technical conference of young scientists-military metrologists "Actual issues of military metrology"*, Moscow region, FSBI "State Scientific and Research Center" of the Ministry of Defense of Russia, 2015.

Статья поступила в редакцию 22.04.2021; принята к публикации 02.06.2021.