

УДК 004.052.2

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.2.05

Л.А. Клейман

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

МЕТОДИКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

В процессе управления техническими системами часто возникают задачи принятия решений. Для повышения эффективности и достоверности процедуры принятия решений задачи должны быть автоматизированы и основываться на объективных знаниях о сфере функционирования системы. Процедуры принятия решений в таких системах обычно являются многокритериальными, это значит, что для принятия решения необходимо учесть множество факторов. Введение такого параметра, как *важность критериев*, позволяет использовать универсальные методы принятия решений в различных системах, по-разному учитывая критерии, от которых это решение зависит. Численное определение важности критериев для автоматического принятия решений в сложных технических системах в настоящее время является актуальной задачей. Это связано с развитием систем мониторинга и диагностики как средств повышения эксплуатационной надежности систем управления и их элементов. При неверно принятых решениях в системах диагностики под угрозу ставится работоспособность диагностируемой системы. **Целью исследования** является разработка метода численного определения важности критериев для принятия решений в многокритериальных задачах. **Методы и результаты исследования:** проведён сравнительный анализ существующих методик численного определения важности критериев, обнаружены их недостатки, обозначена актуальность решаемой проблемы. Разработана методика численного определения важности критериев применительно к рассматриваемой предметной области – технической диагностики. На примере реальной задачи распределения диагностической нагрузки между автономными элементами встроенной системы тестового диагностирования был определён набор критериев и характеристик, для которых произведен численный расчёт. В заключении проанализированы результаты применения разработанной методики, описаны направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: надежность, безотказность, ремонтпригодность, диагностика, критерии, важность критерия.

L.A. Kleiman

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DECISION-MAKING TECHNIQUE IN THE PROBLEM OF INFORMATION MANAGEMENT SYSTEMS ELEMENTS DIAGNOSTICS

In the process of managing technical systems, decision-making problems often arise. To increase the efficiency and reliability, decision-making procedures should be automated and based on objective knowledge about the scope of the system's functioning. Decision-making procedures in such systems are usually multi-criteria, which means that many factors must be taken into account for making a decision. The introduction of such a parameter as the *importance of criteria* allows the usage of universal decision-making methods in various systems, taking into account the criteria on which this decision depends in different ways. Numerical determination of the importance of criteria for automatic decision-making in complex technical systems is currently an urgent problem. This is due to the development of monitoring and diagnostic systems as a means of increasing the operational reliability of control systems and their elements. If decisions are made incorrectly in diagnostic systems, the operability of the system being diagnosed is jeopardized. The **goal** of the study is to develop a method for numerically determining the importance of criteria for decision-making in multicriteria problems. **Research methods and results:** a comparative analysis of the existing methods for the numerical determination of the importance of criteria is carried out, their shortcomings are revealed, the urgency of the problem being solved is indicated. A technique has been developed for the numerical determination of the importance of criteria in relation to the considered subject area - technical diagnostics. On the example of a real problem of distributing the diagnostic load between autonomous elements of the built-in test diagnostics system, a set of criteria and characteristics was determined for which a numerical calculation was made. In the conclusion, the results of the application of the developed technique are analyzed, directions for further research are described.

Keywords: reliability, operability, maintainability, diagnostics, criteria, criterion importance

Введение

В настоящее время эффективное управление в технических системах является основой их корректного функционирования [1]. Для решения задач управления необходимо сформировать и внедрить методики принятия решений. Такие методики должны быть адаптированы к автоматизированному расчёту, а также иметь возможность учёта множества критериев, от которых и будет зависеть принятое решение [2]. При решении многокритериальных задач, а именно учёта множества критериев при принятии решения, основным способом является введение весовых коэффициентов критериев для определения важности каждого из них [3]. Такой подход позволяет универсализировать методики принятия решений для различных систем, меняя при этом только перечень учитываемых характеристик и их важность.

В силу развития информационно-управляющих систем (ИУС) [4] особенно остро встаёт вопрос обеспечения их надёжности.

Корректность и своевременность выполнения задач, которые решают ИУС, могут сильно влиять на качество жизни человека [5]. Поэтому так важно эффективно и точно принимать решения, учитывая множество факторов. Принятие решений используется и при обеспечении надежности элементов ИУС [6]. Так, одним из наиболее эффективных способов повышения надежности является использование системы диагностирования. Она позволяет вовремя предупредить, обнаружить и локализовать неисправность [7].

Большое распространение получили встроенные системы тестового диагностирования [8] из-за их удобства и максимальной осведомленности об объектах диагностирования. В таких системах дополнительные задачи диагностики выполняются самими элементами системы. Это, в свою очередь, требует эффективного использования ресурсов самих элементов с целью минимизации затрат ресурсов и повышения надежности.

Так, методика численного определения важности критериев может быть использована для решения реальной задачи распределения диагностической нагрузки во встроенной системе тестового диагностирования. Это позволит повысить надежность элементов, правильно учитывая критерии их работоспособности при распределении диагностической нагрузки.

1. Анализ существующих методик численного определения важности критериев

Определение весовых коэффициентов требуется для расчёта некоторого интегрального (итогового) показателя в системе. В данной работе таким показателем является коэффициент работоспособности элемента информационно-управляющей системы, в зависимости от которого элементу будут назначены дополнительные диагностические задачи. Существует несколько способов расчёта интегральных критериев [9], их классификация представлена на рис. 1.

Наиболее распространённым в настоящее время является аддитивный интегро-дифференциальный критерий, относящийся к классу *алгебраических*. Он может быть вычислен как среднее арифметическое (гармоническое), среднее арифметическое (гармоническое) взвешенное.

Медиана и мода, относящиеся к классу *количественных* критериев, вычисляются по соответствующим алгоритмам математической стати-

стики. Существенным недостатком алгебраических и количественных критериев является возможность компенсации (парирования) одних оценок другими. Таким образом, при сильном разбросе дифференциальных оценок, средняя оценка в реальности не отражает действительное распределение. Информационные и качественные критерии отчасти решают проблему компенсации, но имеют ряд других проблем, таких как субъективизм оценки эксперта, сложность автоматизации.

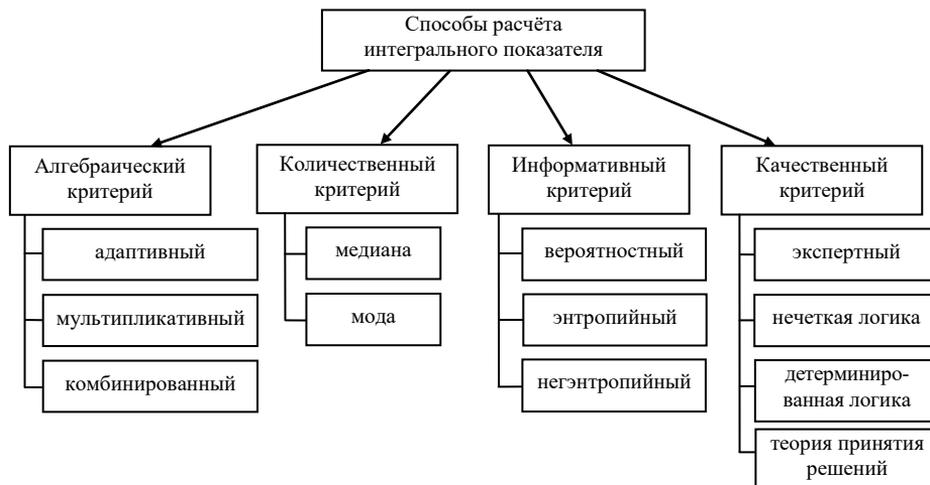


Рис. 1. Классификация способов расчёта интегрального показателя

В данной работе в качестве интегрального показателя был выбран аддитивный интегро-дифференциальный критерий. Несмотря на его недостатки, он является наиболее показательным и подходящим при решении задач системы диагностирования. Общий вид формулы расчёта интегрального критерия выглядит следующим образом:

$$O_i = \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot V_{ij}, \quad (1)$$

где λ_j – весовой коэффициент критерия под номером j , V_{ij} – значение критерия j у i -го элемента системы диагностирования.

Одним из самых простых способов численного определения важности критериев является определение всех критериев как равнозначные [10]. При использовании данного способа вес определяется по формуле:

$$\lambda_i = \frac{1}{N}, \quad (2)$$

где N – число учитываемых критериев, i – порядковый номер критерия.

Использование данного подхода означает, что все критерии между собой равнозначны. Такой способ хотя и обладает простотой, но не решает задачи определения относительной важности критериев между друг другом. В большинстве систем получение именно относительной важности является целью использования методики [11]. На этапе проектирования в таких системах очевидным становится тот факт, что различные критерии имеют разную роль при принятии решения. Таким образом, данный подход применим для простых систем либо системы, в которой был проведен выбор наиболее значимых критериев, им были назначены одинаковые веса, а остальные критерии не учитывались при принятии решений.

Аксиоматическое решение проблемы оценки важности критериев было предложено В.В. Подиновским [12]. В данной работе автор формализовал и строго описал такие понятия, как коэффициент важности критериев, равенство и неравенство критериев по важности. Также была проведена структуризация методов решения многокритериальных задач. В данной работе также были показаны недостатки существующих методов, так, например, было показано, что метод анализа иерархий, предложенный Саати [13], использующий взвешенную сумму критериев, может привести к ошибочным результатам. Одним из часто используемых методов численного определения важности критериев является метод множественной экспертной оценки [14] с последующим определением среднего. При использовании данного метода несколькими экспертами дают на субъективную оценку критерии для получения их важности (табл. 1).

Таблица 1

Расчёт весовых коэффициентов по оценкам экспертов

Критерий/Эксперт	Э1	Э2	Э _{Nэ}
K1	O ₁₁	O ₂₁	O _{Nэ1}
K2	O ₁₂	O ₂₂	O _{Nэ2}
K _{Nкр}	O _{1Nкр}	O _{2Nкр}	O _{NэNкр}

Эксперты должны заполнить свои столбцы оценками важности критериев с выполнением условия нормирования:

$$\sum_{j=1}^N O_{ij} = 1, \quad (3)$$

где N – число критериев для оценки, i – порядковый номер эксперта, j – порядковый номер критерия. Далее, исходя из этих оценок, для каждого критерия вычисляется среднее значение, которое и является численным значением важности:

$$\lambda_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} O_{ij}}{N_3}. \quad (4)$$

Данный подход обладает рядом минусов, например, необходимость конкордации (согласования) результатов [15], ведь оценки экспертов могут быть сильно различными, тогда возникнет эффект компенсации. При оценке критерия как «очень важного» одним экспертом и «мало важного» другим экспертом в результате критерий оказывается средней важности, что не является реальным отражением действительности [16].

Проблема эффекта компенсации может решаться несколькими способами. Одним из основных является использование усеченного среднего [17]. В таком случае среднее считается без учета максимальных и минимальных оценок. Такой метод является менее чувствительным к различным «выбросам» по оценкам и дает более правильную картину. Но в таком случае возникает задача определения минимального числа экспертов [18].

Одним из принципиальных недостатков большинства методов, использующих взвешенную свертку критериев, является независимость процедур нормализации критериев и назначения их весов (коэффициентов важности), что в [19] названо «интеллектуальной ошибкой». Существует еще ряд недостатков, среди которых можно выделить фиксированность весов на всем диапазоне значений критериев. Это может быть справедливо для простых модельных задач, но в реальных задачах это условие, как правило, не выполняется. Все эти факторы, а также сложность и число итераций существующих алгоритмов делают задачу разработки методики численного определения важности критериев достаточно актуальной.

2. Методика численного определения важности критериев

Методика, предложенная в данной работе, является развитием методики, описанной в работе [9]. Развитие заключается в адаптации методики под задачи встроенной системы тестового диагностирования, а также в предложении общей формулы расчёта, которую можно применять на

последних 2 этапах без изменений. Данная доработка позволит оптимизировать вычислительную сложность при автоматизации расчётов.

В разрабатываемой методике требуется совместить знания о критериях и их вкладе в результат принятия решений с возможностью усиления вклада дополнительной субъективной экспертной оценкой. Для разработки методики необходимо ввести некоторые определения:

1. Характеристика (системы или элемента) – количественный интегральный показатель системы или элемента.

2. Критерий характеристики – количественный показатель системы или элемента, влияющий определённым (положительным или отрицательным) образом на одну или несколько характеристик.

Также необходимо применить условие нормирования, которое свидетельствует о том, что:

$$\sum_{i=1}^{N_{CR}} \lambda_i = \sum_{i=1}^{N_{CR}} \left(\sum_{j=1}^{N_{CHAR}} U_{ij} \cdot COV_{CHAR}^j \right) \cdot x = 1, \quad (5)$$

где U_{ij} – численное значение факта участия критерия характеристики в формировании значения характеристики (0 – при отсутствии влияния на значение характеристики, 1 – при наличии влияния критерия на значение характеристики и равнозначности влияния каждого критерия на характеристики, $[0;Z]$ – при неравнозначном влиянии критериев на значение характеристик, Z – максимальное значение относительного влияния критерия), COV_{CHAR}^j – значение покрытия характеристики критериями, x – нормирующий коэффициент.

Таким образом, если в системе при принятии решений в условиях многокритериальности необходимо численно определить важность критериев и данным критериям в однозначное соответствие можно поставить численные критерии характеристик системы или элементов, то полученные в результате использования разработанной методики веса можно использовать для определения важности критериев.

На **первом** этапе расчёта по предлагаемой методике необходимо каждому оцениваемому критерию привести в соответствие критерий характеристики, элемента или системы. Так, например, в технических системах, если необходимо рассчитать коэффициент важности для такой характеристики, как отказоустойчивость кластера, то ей можно поставить в соответствие такие критерии характеристики, как число элементов кластера, число попыток переотправки и т.д.

На **втором** этапе необходимо определить характеристики системы и её элементов, на значение которых оказывают влияние выделенные на первом этапе критерии характеристики. Так, например, такими характеристиками могут являться характеристики надежности, представленные в ГОСТе по надёжности [20], а именно составляющие характеристики безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

На **третьем** этапе методики необходимо сформировать табл. 2, в которой строками будут являться характеристики системы и элементов, а столбцами – критерии характеристик. Также с помощью эксперта можно (на этапе проектирования) проставить соответствие влияния критерия характеристики на саму характеристику. С помощью «+» обозначается наличие влияния значения критерия на значенные характеристики. Отсутствие «+» означает, в свою очередь, отсутствие влияния.

Таблица 2

Таблица соответствия после 3-го этапа

Параметр	CR_1	CR_2	CR_{Ncr}	COV_{CHAR}
$CHAR_1$	+	+		2
$CHAR_2$		+		1
$CHAR_{Nchar}$			+	1
COV_{CR}	1	2	1	4

На данном этапе уже можно посчитать весовые значение критериев характеристик. Для этого необходимо воспользоваться формулой и решить уравнение нормирования (4) относительно коэффициента нормирования:

$$\sum_{i=1}^{N_{CR}} \lambda_i = \sum_{i=1}^{N_{CR}} \left(\sum_{j=1}^{N_{CHAR}} U_{ij} \cdot COV_{CHAR}^j \right) \cdot x = (2 \cdot 1 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0)x + 3x + x = 1, \quad (6)$$

$$x = \frac{1}{6}, \lambda_1 = \frac{1}{3}, \lambda_2 = \frac{1}{2}, \lambda_3 = \frac{1}{6}.$$

На **четвертом** этапе так же при помощи эксперта возможно увеличить относительную степень влияния критерия на характеристику при помощи увеличения числа плюсов в их пересечении (табл. 3).

Таблица соответствия после 4-го этапа

	CR_1	CR_2	CR_{Ncr}	COV_{CHAR}
$CHAR_1$	++	+		3
$CHAR_2$		+++		3
$CHAR_{Nchar}$			+	1
COV_{CR}	2	4	1	7

Так же, используя формулу (4), подставляя правильные значения участия критерия в значения характеристики, получим обновленные значения весов:

$$\sum_{i=1}^{N_{CR}} \lambda_i = \sum_{i=1}^{N_{CR}} \left(\sum_{j=1}^{N_{CHAR}} U_{ij} \cdot COV_{CHAR}^j \right) \cdot x = (3 \cdot 2 + 3 \cdot 0 + 1 \cdot 0)x +$$

$$+ 10x + x = 17x = 1, \quad (7)$$

$$x = \frac{1}{17}, \lambda_1 = \frac{6}{17}, \lambda_2 = \frac{10}{17}, \lambda_3 = \frac{1}{17}.$$

Таким образом, стоит отметить, что данная методика является масштабируемой как на число критериев, так и на число учитываемых характеристик. Также данная методика готова к внедрению как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации. В процессе эксплуатации значения весовых коэффициентов могут быть пересчитаны, что полезно при решении задачи оптимизации распределения нагрузки.

3. Применение методики при решении реальной задачи распределения диагностической нагрузки

Развитие информационно-управляющих систем влечет за собой увеличение роли этих систем в жизни человека, а значит, и ответственности задач, возлагаемых на эту систему. В силу повышения ответственности требования по надёжности, возлагаемые на систему и её элементы, растут. Одним из наиболее популярных способов повышения надёжности элементов информационно-управляющих систем является использование современной и эффективной системы диагностирования [21]. В статье [22] представлены методика и алгоритм распределения диагностической нагрузки между энергетически автономными элементами встроенной системы тестового диагностирования (рис. 2).

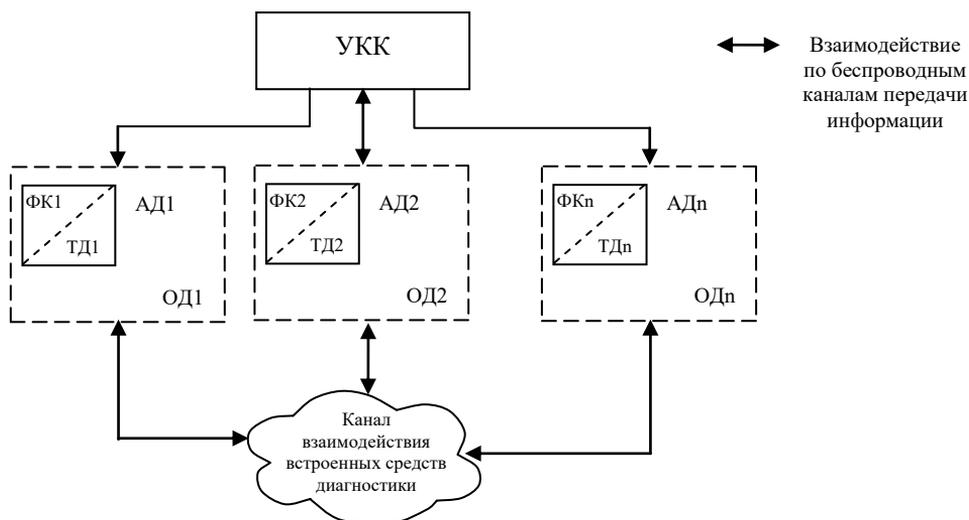


Рис. 2. Схема встроенной системы тестового диагностирования с энергетически автономными элементами

В данной методике, в зависимости от состояния работоспособности каждого элемента, ему назначается/не назначается определенное число задач диагностирования. Данная методика позволяет повысить надежность элементов ИУС путем повышения такой характеристики надежности, как наработка между отказами.

Для расчёта коэффициента работоспособности каждого элемента при решении задачи распределения нагрузки в данной методике производится учёт текущих значений характеристик работоспособности элементов. Данная методика подразумевает возможность учёта этих характеристик с разными весовыми коэффициентами для возможности более гибкого масштабирования методики между различными системами. Далее будет показан пример, как разработанная методика может быть применена для расчёта весовых коэффициентов характеристик работоспособности.

Как было изложено выше, применение разработанной методики необходимо для расчёта коэффициента работоспособности элемента ИУС. Он необходим для определения статуса элемента и числа диагностических проверок, которые могут быть проведены данным элементом. Данное распределение позволит оптимизировать ресурсы автономных элементов ИУС, повысить такую характеристику, как наработка между отказами, повысив тем самым надежность элементов и системы в целом.

Формула для определения коэффициента работоспособности выглядит следующим образом:

$$K_i = \sum_{j=1}^{N_{CR}} \lambda_j \cdot V_{ij}, \quad (8)$$

где λ_j – весовой коэффициент критерия под номером j , V_{ij} – текущее значение критерия работоспособности j для i -го элемента, N_{CR} – число учитываемых критериев.

Стоит отметить, что значение V_{ij} должно быть из абсолютного пересчитано в относительное и нормировано в диапазоне $[0;1]$. Так, например, уровень заряда батареи может быть из абсолютного пересчитан в относительное и использованием процентов от максимального уровня заряда. Такой критерий, как текущая загрузка процессора, необходимо также нормировать в указанный диапазон, но в формуле учитывать величину $V_{ij} = 1 - CPU(t)$, так как увеличение уровня загрузки процессора оказывает отрицательный эффект на работоспособность элемента.

На первом этапе необходимо составить перечень критериев характеристики работоспособности элементов ИУС. Вот примерный перечень таких характеристик для энергетически автономных элементов ИУС [23]:

- текущий заряд батареи элемента;
- текущая загрузка процессора;
- средняя загрузка процессора;
- загрузка ОЗУ текущая;
- средняя загрузка ОЗУ;
- тип файловой системы/скорость чтения записи;
- соотношение сигнал/шум (для беспроводной передачи информации).

На втором этапе необходимо составить перечень характеристик, на которые имеют влияние данные критерии. Если целью распределения диагностической нагрузки является повышение надежности элементов ИУС, то и характеристиками должны являться характеристики надежности [24]:

- наработка между отказами (безотказность);
- среднее время восстановления (ремонтотпригодность);
- удельная стоимость технического обслуживания/ремонта (ремонтотпригодность).

На третьем этапе необходимо составить таблицу из характеристик и критериев и расставить наличие или отсутствие влияния критерия на значение характеристики (табл. 4).

Таблица 4

Таблица влияния критериев работоспособности элементов ИУС на характеристики надежности

Параметр	POW_t	CPU_t	CPU_{av}	RAM_t	RAM_{av}	V_{rw}	SN	COV_{CHAR}
Наработка между отказами	+		+		+		+	4
Среднее время восстановления	+	+		+		+		4
Стоимость ремонта	+					+		2
COV_{CR}	3	1	1	1	1	2	1	10

Произведём расчёт значений весовых коэффициентов по формуле (4) на текущем этапе.

$$\sum_{i=1}^{N_{CR}} \lambda_i = \sum_{i=1}^{N_{CR}} \left(\sum_{j=1}^{N_{CHAR}} U_{ij} \cdot COV_{CHAR}^j \right) x = 10x + 4x + 4x + 4x + 4x + 6x + 4x = 36x = 1, \quad (9)$$

$$x = \frac{1}{36}, \lambda_1 = \frac{5}{18}, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_7 = \frac{1}{9}, \lambda_6 = \frac{1}{6}.$$

Подставим полученные весовые коэффициенты в формулу (8) для определения окончательной формулы расчёта коэффициента работоспособности:

$$K_i = \frac{5V_i^{POW} + 2(V_i^{CPU_t} + V_i^{CPU_{av}} + V_i^{RAM_t} + V_i^{RAM_{av}} + V_i^{SN}) + 3V_i^{V_{rw}}}{18}. \quad (10)$$

Теперь немного скорректируем степень участия критериев в формировании характеристик.

Таблица 5

Скорректированная таблица влияния критериев работоспособности элементов ИУС на характеристики надежности

Параметр	POW_t	CPU_t	CPU_{av}	RAM_t	RAM_{av}	V_{rw}	SN	COV_{CHAR}
Наработка между отказами	+++		+		+		+	6
Среднее время восстановления	+	++		++		++		7
Стоимость обслуживания/ремонта	++					+		3
COV_{CR}	6	2	1	2	1	3	1	16

Соответственно, обновлённые (более точные) весовые коэффициенты будут равны:

$$\sum_{i=1}^{N_{CR}} \lambda_i = \sum_{i=1}^{N_{CR}} \left(\sum_{j=1}^{N_{CHAR}} U_{ij} \cdot COV_{CHAR}^j \right) x = 94x = 1, \quad (11)$$

$$x = \frac{1}{94}, \lambda_1 = \frac{31}{94}, \lambda_2 = \lambda_4 = \frac{7}{47}, \lambda_3 = \lambda_5 = \lambda_7 = \frac{3}{47}, \lambda_6 = \frac{17}{94}.$$

Аналогично расчету третьего этапа получим окончательный (уточненный) вид формулы (8) для расчёта коэффициента работоспособности элемента ИУС:

$$K_i = \frac{31V_i^{POW} + 14(V_i^{CPU_t} + V_i^{RAM_t}) + 6(V_i^{CPU_{av}} + V_i^{RAM_{av}} + V_i^{SN}) + 17V_i^{V_{rw}}}{94}. \quad (12)$$

Формулы (10) и (12) можно использовать для определения коэффициентов работоспособности элементов ИУС, которые участвуют в распределении диагностической нагрузки.

Можно сделать вывод о том, что заряд батареи для автономных элементов является наиболее критичным критерием, оказывающим влияние на наибольшее число характеристик надежности с наибольшей силой. Разработанная методика позволяет определить весовые коэффициенты критериев для решения реальной задачи динамического распределения диагностической нагрузки между элементами встроенной системы тестового диагностирования.

Заключение

В данной работе была представлена методика численного определения важности критериев в задачах принятия решения в процедурах диагностики элементов ИУС. При анализе существующих методик

и алгоритмов были выявлены некоторые недостатки, такие как вычислительная сложность, эффекты компенсации, сложность автоматизации. Эти недостатки, а также активные обсуждения данной тематики в современных научных публикациях, делают задачу разработки методики численного определения важности критериев достаточно актуальной.

Масштабирование числа критериев и учитываемых характеристик является наиболее важным требованием к разработанной методике. Это позволяет использовать её в различных по сложности и назначению технических системах. Возможность уточнения важности вклада каждого критерия в значение характеристики является существенным достоинством разработанной методики. Это позволяет как в рамках одной системы в процессе эксплуатации, так и в разных системах использовать унифицированные критерии, но в зависимости от предъявляемых требований (надёжности и функционирования) вносить минимальные коррективы, получая при этом возможность автоматического расчёта весовых коэффициентов.

Сложность данного алгоритма является небольшой, что подтверждается числом итераций оценивания [25]. Это означает, что такая методика будет достаточно эффективной при её автоматизации.

В качестве дальнейших направлений развития разработанной методики можно предложить использование полученных весовых коэффициентов критериев для исключения некоторых из них из числа учитываемых в рассчитываемом интегральном показателе. Это позволит сэкономить ресурсы на получение, передачу и обработку текущих значений критериев работоспособности, так как их вклад в интегральный показатель очень мал.

Библиографический список

1. Фролов Н.А. Анализ проблем управления сложными организационно-техническими системами // Вестник Оренбург. гос. ун-та – 2007. – № 6. – С. 27–32.

2. Юркова Т.М. К проблеме многокритериального выбора в системах принятия решений // НиКа. – 2008. – № 2. – С. 333–335.

3. Бойко А.А., Дягтерёв И.С. Метод оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 2.

4. Zaritskyi O., Pavlenko P., Classification of decision-making information models as a part of aircraft control system // 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). – October, 2016. – P. 228–231. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783149

5. Hubka V., Eder W. Theory of Technical Systems, A Total Concept Theory for Engineering Design // Springer-Verlag. – 1988. – С. 270.

6. Повышение надёжности функционирования элементов информационно-управляющих систем с применением встроенных средств диагностирования / Л.А. Клейман, В.И. Фрейман, Е.Л. Кон [и др.] // Вестник Поволж. гос. технолог. ун-та. Сер. Радиотехнические и информационно-коммуникационные системы. – 2019. – № 3. – С. 29–40. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.3.29

7. Харебов В.Г., Бородин Ю.П., Шапоров В.А. Система комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов // Техническое регулирование. Управление рисками, промышленная безопасность, контроль и мониторинг: сб. материалов междунар. конф.; 03–06 октября. – М., 2006. – 492 с.

8. Fault diagnostics between different type of components: A transfer learning approach / X. Li, Y. Hu, M. Li [et al.] // Applied Soft Computing. – 2020. – Vol. 86. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105950

9. Фрейман В.И. Методы обработки и количественной оценки результатов диагностирования элементов систем управления распределёнными инфраструктурами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – № 1. – С. 83–94.

10. Лобов Б.Н., Белокопытов С.Л., Ким Р.А. Метод равнозначных критериев и его применение для выбора конструкции дугогасительного устройства // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2004. – № 1. – С. 32–36.

11. Noghin V.D. Relative importance of criteria: a quantitative approach // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. – 1997. – Vol. 6. – P. 355–363.

12. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. – М.: Физматлит, 2007. – 64 с.

13. 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/Network

Process // RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics). – 2008. – Vol. 102. – № 2. – P. 251–318.

14. Consensus Modeling in Multiple Criteria Multi-expert Real Options-Based Valuation of Patents / A. Barbazza, M. Collan, M. Fedrizzi [et al.] // Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2014. – Vol. 322. DOI: 10.1007/978-3-319-11313-5_25

15. Гуцыкова С.В. К вопросу согласованности экспертных оценок профессионально важных качеств // Знание. Понимание. Умение. – 2009. – № 4. – С. 200–204.

16. Соколов Д.С., Попукайло В.С. Особенности применения Q-критерия Диксона для обнаружения выбросов в экспериментальных данных // Вестник Приднестров. ун-та. Сер. Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. – 2017. – № 3. – С. 140–144.

17. Miao Z., Jiang X. Weighted Iterative Truncated Mean Filter // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2013. – Vol. 61. – № 16. – P. 4149–4160. DOI: 10.1109/TSP.2013.2267739

18. Рупосов В.Л. Методы определения количества экспертов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 3. – С. 1–7.

19. Edwards W., Barron F.H., Smarts and Smarter: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement // Organizational Behavior and Human Decision Processes. – 1994. – Vol. 60, iss. 3. – P. 306–325.

20. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990.

21. Фрейман В.И. К вопросу о проектировании и реализации элементов и устройств распределенных информационно-управляющих систем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 30.

22. Kleiman L.A., Freyman V.I. Improving the functioning reliability of the information management system elements, using built-in diagnostic tools // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2021. – № 1. – P. 158–171. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-16

23. Карамов Д.Н., Наумов И.В., Пержабинский С.М. Математическое моделирование отказов элементов электрической сети (10 кВ) автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной

генерацией // Известия Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – № 7. – С. 116–130.

24. Марюхненко В.С. Показатели надежности информационных управляющих систем с аппаратными и информационными отказами как комплексные функции времени // Вестник СГАУ. – 2009. – № 2. – С. 143–149.

25. Карпов Ю.Г., Трифонов П.В. Сложность алгоритмов и программ // Компьютерные инструменты в образовании. – 2007. – № 6. – С. 3–10.

References

1. Frolov N.A. Analiz problem upravleniia slozhnymi organizatsionno-tekhnicheskimi sistemami [Analysis of problems of complex organizational and technical systems management]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2007, no. 6, pp. 27-32.

2. Iurkova T.M. K probleme mnogokriterial'nogo vybora v sistemakh priniatiia reshenii [On the problem of multi-criteria choice in decision-making systems]. *NiKa*, 2008, no. 2, pp. 333-335.

3. Boiko A.A., Diagterev I.S. Metod otsenki vesovykh koeffitsientov elementov organizatsionno-tekhnicheskikh sistem [Method for estimating the weighting factors of the elements of organizational and technical systems]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti*, 2018, no. 2.

4. Zaritskyi O., Pavlenko P., Classification of decision-making information models as a part of aircraft control system. *4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. October, 2016, pp. 228-231. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783149

5. Hubka V., Eder W. Theory of Technical Systems, a Total Concept Theory for Engineering Design. *Springer-Verlag*, 1988, 270 p.

6. Kleiman L.A., Freiman V.I., Kon E.L. et al. Povyshenie nadezhnosti funktsionirovaniia elementov informatsionno-upravliaiushchikh sistem s primeneniem vstroennykh sredstv diagnostirovaniia [Improving the reliability of the functioning of the elements of information management systems using built-in diagnostic tools]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2019, no. 3, pp. 29-40. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.3.29

7. Kharebov V.G., Borodin Iu.P., Shaporev V.A. Sistema kompleksnogo diagnosticheskogo monitoringa opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov [Integrated diagnostic monitoring system for hazardous production facilities]. *Tekhnicheskoe regulirovanie. Upravlenie riskami, promyshlennaiia bezopasnost', kontrol' i monitoring. Sbornik materialov mezhdunarodnoi konferentsii, 03-06 Oktober*. Moscow, 2006, 492 p.

8. Li X., Hu Y., Li M. et al. Fault diagnostics between different type of components: A transfer learning approach. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 86, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105950

9. Freiman V.I. Metody obrabotki i kolichestvennoi otsenki rezul'tatov diagnostirovaniia elementov sistem upravleniia raspredelennymi infrastrukturami [Methods for processing and quantifying the results of diagnosing elements of distributed infrastructure management systems]. *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2018, no. 1, pp. 83-94.

10. Lobov B.N., Belokopytov S.L., Kim R.A. Metod ravnoznachnykh kriteriev i ego primenenie dlia vybora konstruksii dugogasitel'nogo ustroistva [Method of equivalent criteria and its application for the selection of the design of the arc extinguishing device]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*, 2004, no. 1, pp. 32-36.

11. Noghin V.D. Relative importance of criteria: a quantative approach. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 1997, vol. 6, pp. 355-363.

12. Podinovskii V.V. Vvedenie v teoriuu vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nykh zadachakh priniatiia reshenii [An introduction to the theory of the importance of criteria in multicriteria decision-making problems]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 64 p.

13. 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/Network Process. *RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)*, 2008, vol. 102, no. 2, pp. 251-318.

14. Barbazza A., Collan M., Fedrizzi M. et al. Consensus Modeling in Multiple Criteria Multi-expert Real Options-Based Valuation of Patents. *Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2014, vol. 322. DOI: 10.1007/978-3-319-11313-5_25

15. Gutsykova S.V. K voprosu soglasovannosti ekspertnykh otsenok professional'no vazhnykh kachestv [On the issue of consistency of expert assessments of professionally important qualities]. *Znanie. Ponimanie. Umenie*, 2009, no. 4, pp. 200-204.

16. Sokolov D.S., Popukailo V.S. Osobennosti primeneniia Q-kriteriia Diksona dlia obnaruzheniia vybrosov v eksperimental'nykh dannyykh [Features of the Dixon Q-test for detecting outliers in experimental data]. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. Ekonomika i upravlenie*, 2017, no. 3, pp. 140-144.

17. Miao Z., Jiang X. Weighted Iterative Truncated Mean Filter. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, vol. 61, no. 16, pp. 4149-4160. DOI: 10.1109/TSP.2013.2267739

18. Ruposov V.L. Metody opredeleniia kolichestva ekspertov [Methods for determining the number of experts]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 1-7.

19. Edwards W., Barron F.H., Smarts and Smarter: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 1994, vol. 60, iss. 3, pp. 306-325.

20. GOST 20911-89. Tekhnicheskaiia diagnostika. Terminy i opredeleniia [Technical diagnostics. Terms and Definitions]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1990.

21. Freiman V.I. K voprosu o proektirovanii i realizatsii elementov i ustroystv raspredelennykh informatsionno-upravliaiushchikh sistem [On the issue of design and implementation of elements and devices of distributed information and control systems]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 30.

22. Kleiman L.A., Freyman V.I. Improving the functioning reliability of the information management system elements, using built-in diagnostic tools. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2021, no. 1, pp. 158-171. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-16

23. Karamov D.N., Naumov I.V., Perzhabinskii S.M. Matematicheskoe modelirovanie otkazov elementov elektricheskoi seti (10 kV) avtonomnykh energeticheskikh sistem s vozobnovliaemoi raspredelennoi generatsiei [Mathematical modeling of failures of elements of an electrical network (10 kV) of autonomous power systems with renewable distributed generation]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2018, no. 7, pp. 116-130.

24. Mariukhnenko V.S. Pokazateli nadezhnosti informatsionnykh upravliaiushchikh sistem s apparatnymi i informatsionnymi otkazami kak kompleksnye funktsii vremeni [Reliability indicators of information management systems with hardware and information failures as complex functions of time]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2009, no. 2, pp. 143-149.

25. Karpov Iu.G., Trifonov P.V. Slozhnost' algoritmov i programm [Complexity of algorithms and programs]. *Komp'iuternye instrumenty v obrazovanii*, 2007, no. 6, pp. 3-10.

Сведения об авторах

Клейман Лев Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика», младший научный сотрудник Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-кт, 29, e-mail: smarttty@yandex.ru).

About the authors

Lev A. Kleiman (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Automation and Telemechanics, Junior Researcher Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: smarttty@yandex.ru).

Получено 11.05.2021