



УДК 621.3.019.3

Ар.А. МУХА*

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ГАРАНТОСПОСОБНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев, Украина

Анотація. У статті розглянуті актуальні на сьогоднішній час питання кількісної оцінки рівня гарантоздатності комп'ютерних систем. Запропоновано метод, який дозволяє, отримавши чисельне значення рівня гарантоздатності досліджуваної системи, проводити її аналіз, а також виносити рішення про перевагу того чи іншого варіанта реалізації гарантоздатної системи. З цією метою сформульовано атрибутивну модель гарантоздатності комп'ютерних систем (АМГ), що базується на основних властивостях (атрибутах) гарантоздатних комп'ютерних систем (ГКС) і метриках цих властивостей. Наведено визначення атрибутів і метрик, а також їх розрахункові та якісні характеристики. У статті вирішена задача формалізації узагальненого критерію рівня досягнутої гарантоздатності системи, що розробляється. Запропоновано формалізований критерій оцінки рівня гарантоздатності, що представляє собою лінійний функціонал. Кожен атрибут гарантоздатної системи розглядається як комплекс метрик, які можуть бути оцінені розрахунковими, експериментальними або експертними методами. На основі кількісних оцінок метрик обчислюються кількісні оцінки атрибутів, що дозволяє обчислювати кількісну оцінку досягнутого рівня гарантоздатності даної системи для одного з варіантів її виконання. Наведений критерій також включає коефіцієнти впливу атрибутів і ваги метрик досліджуваної системи. Кількісні оцінки рівня виконання метрик є безрозмірними величинами, нормованими на задані у специфікації або граничні значення. За допомогою описаного прикладу продемонстровано розрахунок кількісної оцінки рівня гарантоздатності комп'ютерної системи. Описаний спосіб розрахунку дозволяє детально аналізувати значення рівнів гарантоздатності різних варіантів реалізації досліджуваної КС та робити аргументовані висновки про переважність однієї створеної системи над іншою.

Ключові слова: гарантоздатність, атрибутивна модель гарантоздатності, атрибут, метрика, кількісна оцінка рівня гарантоздатності.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы количественной оценки уровня гарантоспособности компьютерных систем. Предложен метод, который позволяет, получив численное значение уровня гарантоспособности исследуемой системы, проводить ее анализ, а также выносить решение о предпочтительности того или иного варианта реализации гарантоспособной системы. С этой целью сформулирована атрибутивная модель гарантоспособности компьютерных систем (АМГ), базирующаяся на основных свойствах (атрибутах) гарантоспособных компьютерных систем (ГКС) и метриках этих свойств. Приведены определения атрибутов и метрик, а также их расчетные и качественные характеристики. В статье решена задача формализации обобщенного критерия уровня достижений гарантоспособности разрабатываемой системы. Предложен формализованный критерий оценки уровня гарантоспособности, представляющий собой линейный функционал. Каждый атрибут гарантоспособной системы рассматривается как комплекс метрик, которые могут быть оценены расчетными, экспериментальными или экспертными методами. На основе количественных оценок метрик вычисляются количественные оценки атрибутов, что позволяет вычислять количественную оценку достигнутого уровня гарантоспособности рассматриваемой системы для одного из вариантов ее выполнения. Приведенный критерий также включает коэффициенты влияния атрибутов и веса метрик исследуемой системы. Количественные оценки уровня выполнения метрик представляют собой безразмерные величины, нормированные на заданные в спецификации или предельные значения. С помощью примера продемонстриро-

ван расчет количественной оценки уровня гарантоспособности компьютерной системы. Описанный способ расчета позволяет детально анализировать значения уровней гарантоспособности различных вариантов реализации исследуемой КС и делать аргументированные выводы о преимуществе одной создаваемой системы над другой.

Ключевые слова: гарантоспособность, атрибутивная модель гарантоспособности, атрибут, метрика, количественная оценка уровня гарантоспособности.

Abstract. This article discusses the issues of present interest of quantitative assessment of the level of computer systems dependability. A proposed method allows having obtained the numerical values of the dependability of system levels of the system under study, to analyze the system under study, as well as decide on the preference of a particular implementation variant of the system dependability. For this purpose, an attribute model of the computer systems dependability (AMD) is presented, which is based on the basic properties (attributes) of dependable computer systems (DCS) and on the metrics of these properties. The definitions of basic attributes and metrics, their calculated and qualitative characteristics are given. The problem of formalization of a generalized criterion of the level of achievement of the dependability system performance is solved. A formalized criterion for assessing the level of dependability, which is a linear functional, is proposed. Each attribute of the dependable system is considered as a set of metrics that can be measured by computational, experimental, or expert methods. On the basis of quantitative estimates of metrics, quantitative estimates of attributes are calculated which makes it possible to calculate quantitative estimates of the achieved level of dependability of the system under consideration for various variants of its implementation. The above criterion also takes into account the weighting factors of the influence of attributes and metrics of the system under study. Quantitative estimates of the level of performance of metrics are relative values, normalized to the required in the specification or limit values. On the basis of a simplified example, the calculation of the quantitative assessment of the level of computer system dependability is demonstrated. On the basis of the given example, it is shown how to obtain the numerical value of the level of system dependability under study. The described method of calculation allows analyzing detailed the values of the levels of dependability of various options for the implementation of the investigated CS, and to make reasoned conclusions about the advantages of one system being created over another.

Keywords: dependability, attribute model of dependability, attribute, metric, quantitative assessment of the level of dependability.

DOI: 10.34121/1028-9763-2019-4-146-153

1. Введение

При разработке компьютерных систем (КС), которые используются в критических инфраструктурах, одной из важнейших задач является обеспечение высоких показателей гарантоспособности – надежности, отказоустойчивости и безопасности сложных компьютерных систем. Гарантоспособность является комплексным показателем и объединяет в себе множество свойств [1]. Поэтому задачи расчета и оптимизации прогнозируемого уровня гарантоспособности являются достаточно сложными. Наряду с этим, они являются актуальными и имеют большое социальное и экономическое значение.

Целью исследования является решение задачи формализации обобщенного показателя гарантоспособности КС в аналитическом виде.

2. Атрибутивная модель гарантоспособности КС

По аналогии с атрибутивной моделью понятия «материя» [2] в области философии, введем определение атрибутивной модели понятия «гарантоспособность КС» как методологической основы построения и развития современных ГКС для критических инфраструктур и технологий.

Атрибутивная модель гарантоспособности КС (Attributive model dependability of computer systems) – модель гарантоспособности, описывающая комплексное свойство КС с помощью атрибутов и метрик.

Понятие «атрибут» охватывает множество самых разных по своей природе признаков и свойств, которые присущи такому объекту, как КС (например, безотказность). Атрибуты могут быть унитарными, имеющими одну измеряемую величину (метрику) (например, достоверность), и многозначными, имеющими несколько метрик (например, безотказность и др.).

Метрикой служит численное значение некоторого параметра атрибута, которое выражает одно из его свойств.

На сегодняшний день АМГ включает следующие атрибуты [1, 3] (табл. 1). Кроме того, атрибутам и метрикам указывается позитивное (+) или негативное (-) влияние данных характеристик на обобщенный уровень гарантоспособности КС.

Таблица 1 – Перечень атрибутов и метрик КС

№	Наименование атрибута	Метрики	Влияние	Границы
1	Безотказность	Вероятность безотказной работы отказоустойчивой системы, ${}_c^f R_s^q$	+	0..1
		Вероятность безотказной работы избыточного канала системы, $R_K(t)$	+	0..1
		Коэффициент отказоустойчивости, K_{OU}	+	1..k
2	Готовность	Коэффициент готовности, K_G	+	0..1
		Коэффициент оперативной готовности, K_{OG}	+	0..1
3	Обслуживаемость	Продолжительность технического обслуживания, T_{TO}	-	1..t
		Среднее время восстановления, T_B	-	1..t
		Коэффициент технического использования, $K_{ТИ}$	+	0..1
4	Живучесть	Коэффициент живучести, $G(q^i)$	+	0..1
		Коэффициент деградации, $D(q^i)$	-	0..1
		Выживаемость системы, $R(n)$	+	0..1
5	Достоверность	Вероятность получения достоверного результата в ходе проведения вычислений, D	+	0..1
6	Функциональная безопасность	Вероятность безопасной работы, $R_{BP}(t)$	+	0..1
		Вероятность опасного отказа, $Q_{OP}(t)$	-	0..1
		Средняя наработка на опасный отказ, T_{OPcp}	+	1..t
		Коэффициент безопасности, K_B	+	0..1
7	Конфиденциальность	Вероятность нарушений, P_H	-	0..1
		Уровень доступности, L_D	+	0..1
		Уровень секретности, L_C	+	0..1
8	Целостность	Уровень целостности вычислительных ресурсов, L_{BP}	+	0..1
		Уровень целостности программных ресурсов, L_{PP}	+	0..1
		Уровень целостности информации, $L_{ЦИ}$	+	0..1

3. Формализованный критерий оценки уровня гарантоспособности

Определение комплекса метрик атрибутов гарантоспособности, описанных выше, позволяет подойти к формализации обобщенного критерия уровня достигнутой гарантоспособности разрабатываемой системы.

Для этого необходимо каждый атрибут модели рассматривать как комплекс метрик, которые могут быть оценены расчетными, экспериментальными или экспертными методами.

На основе количественных оценок метрик вычисляются количественные оценки атрибутов и далее через них вычисляется комплексная количественная оценка достигнутого уровня гарантоспособности рассматриваемой системы для различных вариантов ее выполнения.

В качестве аналитического представления АМГ предлагается использовать функционал $G_{(AM)}$, составляющими которого являются нормированные значения количественных оценок уровней реализации атрибутов и метрик с соответствующими весовыми коэффициентами. Величины весовых коэффициентов зависят от особенностей применения каждой конкретной системы и могут быть вычислены аналитически или оценены экспертным методом.

$$G_{(AM)} = \sum_{i=1}^n B_i A_i, \quad (1)$$

где n – количество атрибутов АМГ, B_i – коэффициент влияния i -го атрибута, A_i – количественная оценка уровня выполнения i -го атрибута в относительных величинах.

$$A_i = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij}, \quad (2)$$

где m_i – количество метрик i -го атрибута, β_{ij} – вес j -й метрики i -го атрибута, M_{ij} – количественная оценка уровня выполнения j -й метрики i -го атрибута в относительных величинах.

Примечание. Количественные оценки уровня выполнения метрики представляют собой относительные величины, нормированные на заданные в спецификации или предельные значения.

Подставив (2) в (1), получим формулу для комплексной оценки уровня гарантоспособности КС:

$$G_{(AM)} = \sum_{i=1}^n B_i \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij}. \quad (3)$$

4. Количественная оценка уровня гарантоспособности КС

4.1. Основные положения

Согласно определению, понятия гарантоспособность как способность системы предоставлять заданные услуги, которым можно оправданно доверять. Под заданными услугами, в данном случае, можно считать метрики с их нормативными значениями, задаваемыми техническим заданием (ТЗ) или спецификацией. В таком случае предложенный комплексный показатель (3), основанный на АМГ, должен учитывать критерии реализации каждой из метрики системы.

Критерий реализации метрики учитывает установленные в ТЗ требования. Например, установлено минимально допустимое значение вероятности безотказной работы отка-

зоустойчивой системы ${}^f R_s^q$ ТЗ=0,996, а фактическое расчетное или измеренное экспериментальным путем значение параметра создаваемой КС ${}^f R_s^q=0,999$. Для вычисления уровня реализации метрики берется отношение значений вычисленной метрики разрабатываемой КС к нормативному (регламентному) или заданному в ТЗ значению метрики: $M_{11} = {}^f R_s^q / {}^f R_s^q \text{ ТЗ} = 0,999/0,996 = 1,003$. Такое соотношение позволяет учитывать уровень реализации метрики для различных случаев, когда значение рассчитанной метрики больше или меньше заданного значения.

Поскольку значение каждой метрики может быть оценено несколькими методами, такие значения могут быть усреднены либо избран наиболее точный метод вычисления метрики.

Такой подход к вычислению уровня гарантоспособности разрабатываемой КС позволяет осуществлять сравнение между собой различных вариантов реализации или версий разрабатываемой системы.

При проведении расчета количественной оценки уровня реализации каждого из атрибутов необходимо:

- для каждой метрики, имеющей количественную оценку, рассчитывается ее относительное значение (см. выше), а для качественных метрик, не имеющих количественной оценки, экспертным методом устанавливается критерий реализации от 0 до 1;
- для каждой метрики экспертным или расчетным методом устанавливается значение веса β_{ij} ;

- для каждого атрибута вычисляется комплексная оценка $A_i = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij}$.

В случае, когда значения весовых коэффициентов β_{ij} определяются экспертным путем, такое оценивание проводится на этапе установления технических требований к разрабатываемой системе. В этом случае β_{ij} остаются неизменными в процессе расчета уровня гарантоспособности разрабатываемой системы для различных вариантов ее реализации и определяют приоритетность метрик с учетом целевого назначения системы. В случае, если невозможно установить приоритетность метрик для разрабатываемой КС, их оценка может проводиться аналитическим методом, который подробно рассмотрен в [4].

4.2. Пример количественной оценки уровня гарантоспособности КС

В рассмотренном примере расчетные и нормативные значения метрик, а также их весовые коэффициенты, являются вымышленными, так как оценка реальных значений предполагает наличие полной информации о системе и требует учета многих факторов, влияющих на гарантоспособность исследуемой КС, что выходит за рамки данной статьи.

Рассмотрим вычисление уровней реализации атрибутов, входящих в состав АМГ.

Таблица 2 – Атрибут *Безотказность*, A_B

№ п/п	Метрика	Расчетное значение	Установленное нормативное значение	Уровень реализации, M_{ij}	Влияние	Вес, β_{ij}	$\beta_{ij} M_{ij}$
1	${}^f R_s^q$	0,998	0,99	1,008	+	0,4	0,403
2	$R_K(t)$	0,96	0,9	1,066	+	0,2	0,213
3	K_{OV}	1,42	1	1,42	+	0,4	0,568

$$A_B = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 1,184.$$

Таблица 3 – Атрибут *Готовность*, A_G

№ п/п	Метрика	Расчетное значение	Установленное нормативное значение	Уровень реализации, M_{ij}	Влияние	Вес, β_{ij}	$\beta_{ij} M_{ij}$
1	K_G	0,99	0,99	1	+	0,3	0,3
2	K_{OG}	0,995	0,9	1,05	+	0,7	0,735

$$A_G = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 1,035.$$

Таблица 4 – Атрибут *Обслуживаемость*, A_O

№ п/п	Метрика	Расчетное значение	Установленное нормативное значение	Уровень реализации, M_{ij}	Влияние	Вес, β_{ij}	$\beta_{ij} M_{ij}$
1	T_{TO}	80	100	0,8	-	0,4	0,32
2	T_B	2	3	0,66	-	0,2	0,132
3	K_{TH}	0,9994	0,99	1,009	+	0,4	0,403

$$A_O = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = - 0,049.$$

Таблица 5 – Атрибут *Живучесть*, A_J

№ п/п	Метрика	Расчетное значение	Установленное нормативное значение	Уровень реализации, M_{ij}	Влияние	Вес, β_{ij}	$\beta_{ij} M_{ij}$
1	$G(q^i)$	0,68	0,6	1,13	+	0,3	0,34
2	$D(q^i)$	0,2	0,3	0,5	-	0,3	0,15
3	$R(n)$	0,94	0,9	1,044	+	0,4	0,417

$$A_J = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0,607.$$

Таблица 6 – Атрибут *Достоверность*, A_D

№ п/п	Метрика	Расчетное значение	Установленное нормативное значение	Уровень реализации, M_{ij}	Влияние	Вес, β_{ij}	$\beta_{ij} M_{ij}$
1	D	0,998	0,99	1,008	+	1	1,008

$$A_D = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 1,008.$$

Таблица 7 – Атрибут *Функциональная безопасность*, $A_{ФБ}$

№ п/п	Метрика	Расчетное значение	Установленное нормативное значение	Уровень реализации, M_{ij}	Влияние	Вес, β_{ij}	$\beta_{ij}M_{ij}$
1	$R_{БР}(t)$	0,9997	0,999	1	+	0,4	0,4
2	$Q_{ОП}(t)$	0,0002	0,0004	0,5	-	0,3	0,15
3	$T_{ОПср}$	35000	30000	1,16	+	0,2	0,232
4	K_B	0,988	0,9	1,097	+	0,1	0,109

$$A_{ФБ} = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0,591.$$

Поскольку метрики атрибутов конфиденциальность и целостность являются качественными, то каждой метрике, например, конфиденциальности, предложен набор критериев реализации, по которым осуществляется ее оценка. Значение метрик, в таком случае определяется экспертным методом.

Таблица 8 – Атрибут *Конфиденциальность*, A_K

№ п/п	Метрика	Расчетное значение	Установленное нормативное значение	Уровень реализации, M_{ij}	Влияние	Вес, β_{ij}	$\beta_{ij}M_{ij}$
1	P_H	0,03	0,05	0,6	-	0,2	0,12
2	L_D	0,99	0,9	1,1	+	0,4	0,44
3	L_C	0,95	0,99	0,959	+	0,4	0,383

$$A_K = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0,706.$$

Таблица 9 – Атрибут *Целостность*, $A_{Ц}$

№ п/п	Метрика	Расчетное значение	Установленное нормативное значение	Уровень реализации, M_{ij}	Влияние	Вес, β_{ij}	$\beta_{ij}M_{ij}$
1	$L_{БР}$	0,95	0,9	0,959	+	0,5	0,479
2	$L_{ПР}$	0,91	0,9	1,01	+	0,3	0,303
3	$L_{ЦИ}$	0,93	0,9	1,03	+	0,2	0,206

$$A_{Ц} = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0,988.$$

На основе комплексных оценок уровней реализации атрибутов вычисляется комплексная оценка системы:

- для каждого атрибута экспертным методом устанавливаются значения коэффициента влияния B_i , которые остаются неизменными в процессе расчета уровня работоспособности разрабатываемой системы для различных вариантов ее реализации;
- обобщенная комплексная оценка уровня работоспособности вычисляется по

$$\text{формуле } G_{(AM)} = \sum_{i=1}^n B_i \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij}.$$

Для приведенного примера экспертным методом установлены следующие коэффициенты влияния атрибутов:

V_B	V_G	V_O	$V_{Ж}$	V_D	$V_{ФБ}$	V_K	$V_{Ц}$
0,25	0,1	0,05	0,1	0,15	0,15	0,1	0,1

$$G_{(AM)} = V_B A_B + V_G A_G + V_O A_O + V_{Ж} A_{Ж} + V_D A_D + V_{ФБ} A_{ФБ} + V_K A_K + V_{Ц} A_{Ц} = 0,25 \cdot 1,184 + 0,1 \cdot 1,035 - 0,05 \cdot 0,049 + 0,1 \cdot 0,607 + 0,15 \cdot 1,008 + 0,15 \cdot 0,591 + 0,1 \cdot 0,706 + 0,1 \cdot 0,988 = 0,867.$$

При проведении подсчета для других вариантов реализации системы при неизменных коэффициентах метрик β_{ij} и атрибутов V_i результаты будут отражать изменение уровней реализации каждого из атрибутов ГКС и уровня гарантоспособности системы в целом.

Например, при расчете, когда уровень реализации каждой метрики M_{ij} равен 1, что соответствует полному совпадению с установленными нормативными значениями, значение показателя $G_{(AM)} = 0,59$. Таким образом, сравнив значения для реальной $G_{(AM)} = 0,867$ и системы, заданной в ТЗ $G_{(AM)} = 0,59$, можно сделать заключение о том, что исследуемая система по уровню гарантоспособности превосходит заданную в ТЗ. Это может быть интерпретировано как позитивный результат, однако в некоторых случаях может свидетельствовать об излишних затратах средств, которые были заложены в систему, что неминуемо отразится на увеличении ее стоимости.

Таким образом, детально анализируя значения уровней гарантоспособности разных вариантов реализации исследуемой КС, можно делать аргументированные выводы о предпочтительном варианте ее реализации.

5. Выводы

Предложенный подход к вычислению уровня гарантоспособности компьютерных систем позволяет рассматривать проектируемую систему как комплекс метрик, которые могут быть оценены различными методами. Благодаря предложенной атрибутивной модели и на основе оценок метрик могут быть вычислены количественные оценки атрибутов, что впоследствии позволяет производить комплексную количественную оценку достигнутого уровня гарантоспособности рассматриваемой системы для различных вариантов ее выполнения.

В развитие предложенного подхода представляются дальнейшие исследования по разработке оптимальных методов определения весовых коэффициентов атрибутов и метрик для различного класса компьютерных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федухин А.В., Сеспедес Гарсия Н.В. Атрибуты и метрики гарантоспособных компьютерных систем. *Математичні машини і системи*. 2013. № 2. С. 195–201.
2. Похлебаев С.М., Третьякова И.А. Атрибутивная модель понятия «материя» как методологическая основа построения и развития современной общенаучной картины мира. *Педагогические исследования*. 2005. № 4. С. 65–68.
3. Сербін В.Г., Сухомлин А.І. Визначення і формалізація основних показників гарантоздатності живучих комп'ютерних систем керування на основі ймовірнісно-фізичного підходу для їх проектної оцінки і прогнозування. *Математичні машини і системи*. 2012. № 4. С. 182–189.
4. Федухин А.В., Ярошенко В.Н., Сухомлин А.И., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. К вопросу о сравнительной оценке гарантоспособных систем. *Математичні машини і системи*. 2014. № 1. С. 185–194.

Стаття надійшла до редакції 10.06.2019