

Я.А. ИВАКИН, А.А. ШИЛЧИКОВ, А.С. ЛЬВОВ
**СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СЕТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ДЛЯ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Ивакин Я.А., Шилчиков А.А., Львов А.С. Синтез адаптивной сети показателей для квалиметрической оценки результатов проектирования и разработки программного обеспечения.

Аннотация. Широкое внедрение в процесс проектирования и разработки прикладного программного обеспечения CASE-средств, баз и библиотек повторно используемого кода, а также широкое применение сервис-ориентированной архитектуры требует качественно новых методов оценивания результатов и диагностики состояния проектов создания программных и программно-технических систем. Обоснованная оценка результатов проектирования и разработки невозможна без использования соответствующих сетей показателей. Рассмотрению принципиальных возможностей и специфике синтеза таких сетей посвящена данная статья.

Ключевые слова: прикладное программное обеспечение, CASE-средства, базы и библиотеки повторно используемого кода, сервис-ориентированная архитектура, оценка результатов разработки, адаптивная сеть показателей оценки.

Ivakin Y.A., Shilchikov A.A., Lvov A.S. Synthesis of indices' adaptive net intended for quality metering of estimated results at software design and development.

Abstract. Widespread adoption of CASE- means, the reused code's bases and libraries along with service-oriented architecture in the process of applied software design and development requires the qualitatively new system of results estimation and diagnostics of the projects' state of the software and program-technical systems developing. A reasonable estimate of results in design and developments is possible only with the use of the matching indices' nets. The given paper considers principle possibilities and specific character of such nets' synthesis.

Keywords: applied software, CASE, software reuse, service oriented architecture, SOA, evaluation of development, adaptive network of evaluation measures.

1. Введение. Решение задачи интеграции современных информационных технологий эффективной (быстрой) разработки прикладного программного кода в существующие методы проектирования и разработки во многом определяется уровнем их интеграции с подсистемами оценки результатов такой разработки. При этом предполагается, что оценка проводится на основании объективных контролируемых параметров разрабатываемого кода с использованием адаптивной к особенностям вида разрабатываемого программного обеспечения сети показателей. Такая сеть выступает не только как универсальная метрика свойств программного обеспечения, нанизанных на иерархическую структуру упорядоченных требований, но и как информационная модель для определения отдельных, конкретных аномалий в рассматриваемом проекте программной

системы. Именно адаптивная сеть показателей оценки результатов проектирования и разработки определяет возможности адекватности и объективности результатов создания соответствующих программных и программно-технических систем.

Таким образом, интегральную оценку результатов проектирования и разработки программного обеспечения можно обоснованно рассматривать как обобщенный комплексный показатель. Его декомпозиция на составляющие частные показатели позволяет детализировать совокупность частных показателей оценки — свойств $\{c_i\}$, определяющих элементарные показатели оценки. Сложность составляющих показателей приводит к многоуровневости описанной декомпозиции [1].

Оценка результатов процессов проектирования и разработки осложняется отсутствием общепринятых определений составляющих ее показателей (свойств). Различными авторами предлагаются различные наборы показателей и их метрик, т.е. мер наличия у разрабатываемого проекта программного обеспечения соответствующего свойства [2, 3]. Однако основной трудностью является сложность взаимосвязей показателей и их, во многих случаях, противоположная направленность.

Другие трудности связаны с тем, что метрики результатов проектирования и разработки обычно являются лишь неполными мерами соответствующих показателей, часто определяются лишь косвенным путем и не всегда поддаются измерению.

Таким образом, в настоящее время методы оценки результатов проектирования и разработки прикладного программного обеспечения лучше всего применять как индикаторы отдельных аномалий, которые могут использоваться в качестве ориентиров для сравнительного анализа и планирования этапов дальнейшего совершенствования рассматриваемого проекта.

Предложить универсальную сеть показателей, составляющих интегральный показатель «качество разработки программного обеспечения» и входящие в него сложные показатели (свойства), не представляется возможным. Это объясняется тем, что в каждой конкретной предметной области применения прикладного программного обеспечения существуют свои потребности в тех или иных свойствах применяемой сети показателей оценки. Однако, возможно предложить подход, который позволил бы для каждого случая проектирования и разработки программной системы быстро и эффективно синтезировать такую сеть показателей (свойств) с учетом их взаимозависимости. Именно этому посвящена данная статья.

Суть этого подхода заключается в синтезе или сведении в единую сеть всех требований к уровню разработки проекта прикладного программного обеспечения путем прямой формализации и обоснованного выбора на полученной сети аналитической формы интегрального критерия оценки. Очевидно, что такая сеть будет иметь иерархическую структуру как следствие декомпозиции и многоуровневости. В свою очередь, наличие подобной иерархии показателей в каждом конкретном случае позволит провести оценку результатов проектирования и разработки программного обеспечения путем выявления значений показателей у оцениваемого проекта.

Синтез сети показателей для оценки результатов проектирования и разработки программного обеспечения проводится в три этапа:

- 1) Построение иерархической сети показателей.
- 2) Структурная адаптация иерархической сети показателей.
- 3) Взвешивание иерархической сети показателей.

Последовательная детализация указанных этапов позволяет раскрыть содержание процедуры синтеза, в целом.

2. Построение начальной иерархической сети показателей.

Построение начальной иерархической сети показателей оценки программного обеспечения производится путем формирования группового мнения экспертной группы о структуре композиционных связей показателей $\{c_i\}$, оценки результатов проектирования и разработки, выявления на его базе единой иерархической сетевой структуры.

Исходная информация, используемая при синтезе сети показателей — матрица предпочтений $\|a_{ij}^k\|$, $i, j, k \in N$, представляет собой двумерную матрицу, элементы которой определяются на дискретном множестве:

$$a_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = \overline{1, \rho}, \quad (1)$$

где ρ — общее число всех показателей оценки, учитываемых исходя из правила:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & C_i \text{ важнее } C_j \\ 0, & C_j \text{ важнее } C_i \text{ или имеют одинаковую важность.} \end{cases}$$

Для матрицы $\|a_{ij}\|$ выполняется условие:

$$a_{ii} = a_{jj} = 0. \quad (2)$$

Полученная совокупность $\|a_{ij}^k\|$ от всех k экспертов позволяет синтезировать промежуточную матрицу $\|z_{ij}\|$:

$$z_{ij} = \sum_{k=1}^K a_{ij}^k, \quad (3)$$

которая представляет собой групповое мнение экспертов.

Получение матрицы строгого порядка $\|d_{ij}\|$, в которой

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } C_i \succ C_j, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (4)$$

а знак « \succ » обозначает отношение доминирования, на базе матрицы $\|z_{ij}\|$ представляет собой задачу проверки вероятностного вывода. При этом под строгим порядком понимается антирефлексивное, антисимметричное и транзитивное отношение, задаваемое между элементами множества $\{C_p\}$. Множество $\{C_p\}$, на котором задано отношение порядка, является полностью упорядоченным, если любые два элемента $c_i \in \{C_p\}$ сравнимы, и частично упорядоченным в противном случае. Тогда на языке строгого упорядочивания задача проверки вероятностного вывода состоит в выявлении матрицы $\|d_{ij}\|$ путем анализа $\|z_{ij}\|$ с целью частичного строгого упорядочивания $\{C_p\}$. Именно выявление такого порядка позволяет синтезировать структуру G сети показателей оценки результатов проектирования и разработки программного обеспечения.

С точки зрения вероятностного вывода в формальной интерпретации процесс формирования $\|z_{ij}\|$ представляет собой ансамбль реализаций повторных независимых испытаний, а значит, к ним может быть применен математический аппарат испытаний Бернулли с тремя исходами. В силу введенных в модели условий проведения экспертизы исходы в каждом дискретном испытании считаются равновероятными:

$$q = q_{ij} = q_{ji}, \quad (5)$$

где q_{ij} — вероятность того, что отношение строгого порядка между i -ым и j -ым показателями есть и $c_i \succ c_j$; q_{ji} - вероятность того, что отношение строгого порядка между i -ым и j -ым показателями есть и $c_i \prec c_j$; q - вероятность того, что отношений строгого порядка между i -ым и j -ым показателями нет, или они не сравнимы по отношению доминирования при оценке результатов подготовки на тренажерном комплексе. Из чего следует:

$$](q_{ij} + q_{ji} + q = 1) \geq q_{ij} = q_{ji} = q = 1/3. \quad (6)$$

Числом испытаний Бернулли является число k экспертов. Случайная величина z_{ij} подчиняется биномиальному закону распределения, описываемому функцией

$$F(r, k, q_{ij}) = \binom{K}{r} q_{ij}^r (q_{ji} + q)^{k-r}, \quad (7)$$

где $F(r, k, q_{ij})$ — вероятность того, что из k экспертов r выскажется

за отношение порядка $c_i \succ c_j$ с вероятностью q_{ij} ; $\binom{K}{r}$ -

комбинаторный коэффициент, равный числу сочетаний из k по r .

$$F(r, k, q_{ij}) = P(z_{ij} = r). \quad (8)$$

В виду того, что принятие решения одним отдельно взятым экспертом не зависит от мнения остальных экспертов и опрос проводится в один тур, то биномиальное распределение $F(r, k, q_{ij})$ в предельном случае может быть аппроксимировано законом Пуассона. Полученное распределение $F(r, k, q_{ij})$ при классическом пуассоновском приближении для биномиального распределения имеет вид

$$F(r, K, q_{ij}) \approx (\mu^K / r!) \exp(-\mu), \quad (9)$$

где

$$\mu = Kq_{ij}. \quad (10)$$

Аппроксимация пуассоновского распределения (9) для непрерывного распределения описывается нормальным законом

$$F^*(r, K, q_{ij}) \approx (1 / \sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^K \exp(-r^2 / 2) dr \quad (11)$$

с плотностью распределения

$$f(r, K, q_{ij}) \approx (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-r^2/2). \quad (12)$$

Априорное принятие закона распределения $F(r, K, q_{ij})$ нормальным позволяет использовать стандартный аппарат проверки вероятностного вывода для испытаний Бернулли. Он сводится к нахождению граничного числа S_k высказавшихся за отношение строгого порядка $c_i \succ c_j$ из всего числа k экспертов, которое позволит с заданной степенью риска α определить это отношение.

Для m исходов величина S_k определяется испытаний как:

$$S_k \geq m^{-1} [K + t_\alpha \sqrt{K(m-1)}] \text{ для } (q_{ij} = 1/m). \quad (13)$$

Значение α зависит от согласованности экспертов в экспертной группе, и в силу качественного характера оценки можно принять $\alpha \in (0, 1; 0, 2)$. В дальнейшем принято $\alpha = 0, 1$.

Для $m = 3$ конкретизировано соотношение (13)

$$S_k \geq 1/3(K + t_\alpha \sqrt{2K}), \quad (14)$$

где t_α — квантиль нормального распределения, полученный из уравнения

$$\alpha = 1 - F^*(t_\alpha). \quad (15)$$

Таким образом, правило преобразования промежуточной матрицы $\|z_{ij}\|$ в матрицу строгого порядка $\|d_{ij}\|$ можно представить в виде:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, S_k \leq Z_{ij} \\ 0, S_k > Z_{ij} \end{cases}. \quad (16)$$

В случае $Z_{ij} = Z_{ji} = S_k$ необходимо либо увеличить число экспертов в группе во избежание соотношения, либо снизить степень риска α и определить более жесткий порог S_k для имеемой матрицы $\|z_{ij}\|$. Матрица $\|d_{ij}\|$ удовлетворяет условию $d_{ii} = d_{jj} = 0$ и описывает полную структуру G сети показателей оценки результатов проектирования и разработки программного обеспечения:

$$G = \langle C, U \rangle, \quad (17)$$

где C - множество вершин, соответствующих показателям результатов разработки $\{C_p\}$; U - множество дуг сети, соответствующих отношению строгого порядка $\|d_{ij}\|$.

В силу транзитивности отношений строгого порядка, определяющего установление связей между $\{C_p\}$, правомочно произвести эквивалентное преобразование удаления дуг. Дуга (c_i, c_k) называется транзитивно замыкающей, если она удовлетворяет условию:

$$\forall c_i, c_j, c_k \in C((c_i < c_j) \& (c_j < c_k) \& (c_i < c_k)). \quad (18)$$

Транзитивно замыкающие дуги должны быть удалены.

Таким образом, синтезированная на базе экспертных оценок сеть показателей G^+ оценки результатов подготовки на тренажерном комплексе представляет собой двойку

$$G^+ = \langle C, U^+ \rangle \quad (19)$$

где $U^+ (U^+ \subseteq U)$ — множество дуг, не соответствующих условию (18).

3. Структурная адаптация иерархической сети показателей.

Сеть показателей G^+ оценки может оказаться малопригодной для определения композиционной значимости нижестоящих показателей в составе вышестоящих показателей в иерархии интегрального показателя «качество разработки программного обеспечения». Этот факт определяется возможным наличием показателей C_i , которые декомпозируются на ξ и более дочерних, где $\xi = (5 \pm 2)$ — число Ингве–Миллера, которое определяет предельное для эксперта число альтернатив, которое тот может анализировать одноактно.

Для взвешивания указанных декомпозиций сложных показателей C_i необходимо адаптировать сеть G^+ к условиям восприятия эксперта. Такая адаптация осуществляется путем введения ряда мнимых вершин в декомпозицию сложного свойства $c_i (c_i', c_i'', \dots)$ с помощью расщепления вершины c_i на графе G^+ с целью группировки дочерних вершин с числом меньшим ξ (см. рисунок).

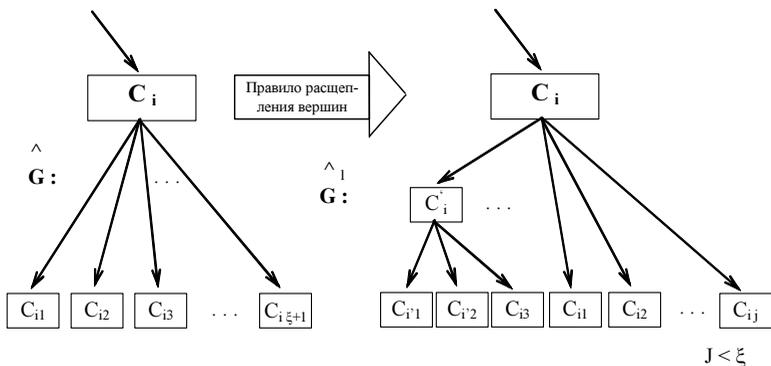


Рис. Группировка дочерних вершин на графе декомпозиции.

Процесс группировки формально описывается математическим аппаратом метода структурной обработки данных, также обозначаемым как метод иерархической группировки или метод кластерного анализа. Процесс адаптации заключается в иерархической группировке показателей и может осуществляться по различным признакам, но почти все они основаны на понятии “близости” или “расстояния” между одноранговыми (т.е. занятыми в одной декомпозиции более сложного показателя) $\{c_i\}$ в некотором метрическом пространстве. Следовательно, необходимо ввести некоторую метрику $\bar{\rho}(c_i, c_j)$, определяющую расстояние между двумя показателями c_i и c_j в метрическом пространстве данной декомпозиции, а затем установить расстояние, при котором два показателя можно считать близкими. Таким образом, выбираемые признаки являются осями координат n -мерного метрического пространства, в рамках которого определяется близость показателей оценки результатов проектирования и разработки программного обеспечения.

К метрике $\bar{\rho}(c_i, c_j)$ предъявляются следующие требования. Пусть $\bar{\rho}(c_i, c_j)$ есть функция расстояния между показателями c_i и c_j в некотором метрическом пространстве показателей рационализации, тогда:

1) расстояние показателя качества до самого себя минимально, то есть

$$\bar{\rho}(c_i, c_j) \geq \bar{\rho}(c_i, c_i); \quad (20)$$

2) расстояние от показателя c_i до показателя c_j равно расстоянию от c_j до c_i , то есть

$$\bar{\rho}(c_i, c_j) = \bar{\rho}(c_j, c_i); \quad (21)$$

3) расстояние между двумя показателями, измеренное по прямой, короче расстояния, измеренного по любой другой линии (т.е. пространство признаков классификации метрическое)

$$\bar{\rho}(c_i, c_j) \leq \bar{\rho}(c_i, c_l) + \bar{\rho}(c_l, c_j). \quad (22)$$

Выбор конкретного вида метрики (меры близости в пространстве признаков) осуществляется проектировщиком исходя из семантического значения показателей оценки и особенностей конкретной реализации проекта программного обеспечения. Наиболее простой метрикой является евклидово расстояние:

$$\bar{\rho}_a(c_i, c_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p (c_i^{(k)} - c_j^{(k)})^2}. \quad (23)$$

Если возможна оценка важности признаков, то используется взвешенное евклидово расстояние:

$$\bar{\rho}_b(c_i, c_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p \omega_k (c_i^{(k)} - c_j^{(k)})^2}, \quad (24)$$

где ω_k — вес k -го признака.

Так же могут использоваться расстояние Хэмминга и расстояние Махаланобиса, соответственно определяемые как:

$$\bar{\rho}_c(c_i, c_j) = \sum_{k=1}^p |c_i^{(k)} - c_j^{(k)}|, \quad (25)$$

$$\bar{\rho}_d(c_i, c_j) = \sqrt{(c_i - c_j) \sum_{k=1}^p (c_i^{(k)} - c_j^{(k)})^T}. \quad (26)$$

Процесс группировки показателей, как выше указывалось, формально описывается математическим аппаратом метода структурной обработки данных и носит название “кластеризации”. Процесс кластеризации представляет собой итеративный многошаговый процесс объединения c_i в группы (кластеры) по степени их близости в соответствии с признаком группировки. При этом на первом шаге процесса группировки каждый c_{ij} представляет собой кластер. На каждом шаге два самые близлежащие, в соответствии с показателем группировки, кластера объединяются в

большой кластер. Таким образом, за $(\xi^{\wedge} - 1)$ шагов (где ξ^{\wedge} - количество дочерних вершин в декомпозиции) получается кластер, объединяющий все c_{ij} . После чего из совокупности структур сгруппированных связей U_{ij}^{+} (соответствующих c_{ij}) в соответствии с требованиями оптимальности выбирается наиболее удовлетворительная. При этом оптимальной считается структура, в которой для всех декомпозиций (как самого сложного показателя c_i , так и порождаемых мнимых мнимых $c_i', c_i'' \dots$) верно соотношение $\xi^{\wedge} < \xi$, и при этом количество введенных мнимых вершин минимально. При минимальной размерности пространства признаков признаком группировки является значение обоснованности связи E , определяемое как

$$E_{U_{ij}^{+}} = \frac{z_{ij}}{z_{ji} + (K - (z_{ij} + z_{ji}))}. \quad (27)$$

Величина $E_{U_{ij}^{+}}$ есть отношение количества экспертов z_{ij} , высказавшихся за наличие связи U_{ij}^{+} , к суммарному числу экспертов z_{ji} , высказавшихся за наличие связи U_{ji}^{+} и за ее отсутствие $(k - (z_{ij} + z_{ji}))$. Данный показатель позволяет сгруппировать C_{ij} таким образом, что в дальнейшем группа менее обоснованных связей (U_{ij}^{+}), при анализе погрешностей согласованности на сети показателей качества, может быть удалена, как несущественная. Расстояния между кластерами в соответствии с показателем группировки E определяются на одномерном пространстве (прямой) с линейной метрикой

$$\bar{\rho}(E_{U_i}, E_{U_e}) = |E_{U_i} - E_{U_e}|. \quad (28)$$

Известна формула пошаговой группировки $\{c_{ij}\}$ по множеству связей U_{ij}^{+}

$$\begin{aligned} \bar{\rho}(E_{(U_e U_i)}, E_{U_m}) &= \alpha \bar{\rho}(E_{U_m}, E_{U_e}) + \beta \bar{\rho}(E_{U_m}, E_{U_i}) - \gamma \bar{\rho}(E_{U_e}, E_{U_i}) + \\ &+ \delta | \bar{\rho}(E_{U_m}, E_{U_e}) - \bar{\rho}(E_{U_m}, E_{U_i}) |, \end{aligned}$$

при этом

$$\bar{\rho}(E_{(U_e U_i)}, E_{U_m}) = \min m, \quad (29)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ — числовые коэффициенты, значения которых определяют алгоритм пошагового присоединения к группам (кластерам).

Значения $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ для стандартных алгоритмов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов в формуле пошаговой группировки

Алгоритм \ Коэффициенты	α	β	γ	δ
“Ближнего соседа”	0,5	0,5	0	-0,5
“Дальнего соседа”	0,5	0,5	0	0,5
“Средней связи”	0,5	0,5	0	0

Возможны и другие значения $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, которые будут определять иные алгоритмы пошагового присоединения. Значения $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ позволяют добиться различной содержательной интерпретации объединения кластеров в больший кластер. Так, α, β позволяют прежде всего учесть расстояние между концами кластера и присоединяемого к нему показателя, их соотношение определяет приоритетность расположения нового показателя в кластере объединения. В случае отсутствия конкретно выраженной приоритетности принято считать:

$$\alpha = \beta = 0,5. \quad (30)$$

К случаю (30) относится рассматриваемая группировка C_{ij} по E_{U+ij} в силу отсутствия конкретной приоритетности стороны присоединения к кластеру новых объектов на числовой прямой E_{U+ij} с линейной метрикой (28). Коэффициент γ определяет степень однородности объектов в кластере. Максимальной однородности удастся добиться при

$$\gamma = -0,5. \quad (31)$$

Для анализируемого случая декомпозиции C_i максимальная однородность (т.е. примерная эквивалентность значений E_{Uij} для объединяемых C_{ij} в кластер) является предпочтительной по двум причинам: 1) примерно одинаково обоснованные показатели в группе в дальнейшем проще сравнивать; 2) в случае низкой обоснованности

всей группы обособленных показателей качества может быть отсечена вся эта группа показателей.

Коэффициент δ определяет, каким образом в (32) учитывается исходный кластер. Например, по ближайшей точке к присоединяемому объекту (алгоритм «ближнего соседа»), с учетом всех объектов кластера, включая дальний от присоединяемого объекта (алгоритм «дальнего соседа») или с учетом усредненной точки кластера, принимаемой за его центр (алгоритм «средней связи»). Из соображений однородности образуемых групп C_i рационально учитывать весь присоединяемый кластер, а не его ближайшую или среднюю точку, а значит, в анализируемом случае следует принять $\delta = 0,5$. Т.о., выше приведенное выражение для декомпозиций сложных показателей оценки качества C_i с количеством дочерних вершин более ξ в соответствующей иерархической сети примет вид:

$$\begin{aligned} \bar{\rho}(E_{(U_e U_l)}, E_{U_m}) = & 0,5\bar{\rho}(E_{U_m}, E_{U_e}) + 0,5\bar{\rho}(E_{U_m}, E_{U_l}) - 0,5\bar{\rho}(E_{U_e}, E_{U_l}) + \\ & + 0,5 |\bar{\rho}(E_{U_m}, E_{U_e}) - \bar{\rho}(E_{U_m}, E_{U_l})|. \end{aligned} \quad (32)$$

Графически результаты иерархической группировки представляются в виде дендрограммы. В соответствии с описанными ранее условиями наилучшей является структура, получаемая на втором шаге, т.к. число введенных мнимых вершин минимально, и для каждой расщепляемой вершины $\xi^{\wedge} < \xi$.

4. Взвешивание иерархической сети показателей. Наличие адаптированной к условиям конкретного проекта программного обеспечения и предметной области иерархической сети показателей позволяет определить значения локальных и глобальных приоритетов как весовых коэффициентов простых показателей в составе интегрального показателя качества. Значения указанных приоритетов могут быть рассчитаны с использованием различных методов. Например, с использованием метода Анализа и Синтеза Показателей при Информационном Дефиците (АСПИД) [4–6] или Метода Анализа Иерархий [7]. Выбор метода предопределяется возможностью в рамках конкретной реализации обеспечить необходимую входную информацию для избранного математического аппарата взвешивания иерархической сети показателей в декомпозиции интегрального показателя “ качество проектирования и разработки программного обеспечения ”. В частности, применение в качестве указанного аппарата математических моделей метода АСПИД позволяет учесть высокую несогласованность мнений экспертов при большой размерности пространства учитываемых показателей качества. Это

связано с тем, что первоначально указанный математический метод упрощает задачу эксперта до совокупности не градуированных, попарных сравнений альтернативных показателей с допуском частичной несогласованности и неполной информации. Применение в качестве математического аппарата взвешивания иерархической сети показателей метода анализа иерархий позволяет быстро добиться результата для задач с суммарным числом показателей 60-80, небольшим числом уровней иерархии декомпозиции интегрального показателя и приемлемым уровнем согласованности экспертных оценок.

Анализ иерархии сети показателей результатов проектирования и разработки программного обеспечения необходим для выявления степени композиционного взаимодействия более простых показателей в составе более сложных как отражения важности каждого более простого свойства в композиции более сложного. Метод анализа иерархии позволяет на основе количественного попарного сравнения показателей нижнего уровня иерархии рассчитывать численный вектор, характеризующий порядок предпочтительности этих показателей в показателях близлежащего верхнего уровня, и пересчитывать эти значения в числовой вектор, характеризующий порядок предпочтительности более простых показателей иерархии в любом вышестоящем более сложном показателе, с которыми они связаны. Значения вектора, характеризующего порядок предпочтительности в показателях близлежащего верхнего уровня, являются локальными приоритетами, в корневом показателе иерархии - глобальными приоритетами.

Отсюда применительно к синтезированной сети показателей оценки результатов подготовки на тренажерном комплексе G^+ следует, что для каждой декомпозиции вершин сети формируется путем экспертизы на базе специальной шкалы относительной важности, представленной в табл.2, матрица V парных сравнений важности дочерних вершин вида

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & \cdot & v_{ij} & \cdot \\ \vdots & \cdot & \cdot & \cdot \\ v_{n1} & \cdot & \cdot & v_{nn} \end{pmatrix}, \quad (33)$$

где V_{ij} — сравнительная оценка важности («веса», «интенсивности») участия i -го показателя перед j -м в композиционно общем для них показателе.

Матрица парных сравнений является обратно симметричной ($V_{ij} = 1/V_{ji}$) и обладает свойством $V_{ii} = V_{jj} = 1$. Математически задача выявления степени композиционного взаимодействия более простых показателей в составе более сложных как отражения важности каждого более простого показателя качества в композиции более сложного сводится к нахождению собственного вектора W матрицы V , для которого выполняется условие:

$$VW = DW, \quad (34)$$

где D – собственное число (значение) матрицы V .

Соответствующие значения элементов вектора W :

$$W = \langle w_1, w_2, w_3 \dots w_n \rangle > \quad (35)$$

являются локальными приоритетами для данной декомпозиции.

Таблица 2. Шкала парных сравнений

Оценка важности	Качественная оценка	Смысловая интерпретация
1	Равная важность	Равный вклад двух показателей в композиционно сложный показатель (свойство, характеристику)
3	Слабое превосходство	Опыт и суждения экспертов дают предпочтение одному показателю (характеристике) перед другим
5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения экспертов дают надежные доказательства существенного превосходства одного показателя (свойства, характеристики) над другим
7	Очевидное (значимое) превосходство	Существуют убедительные свидетельства в пользу большей важности одного показателя по сравнению с другим, что становится практически значительным
9	Абсолютное (очень сильное) превосходство	Максимально подтверждается предпочтительность одного показателя перед другим, что в высшей степени убедительно
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между соседними оценками	Применяются в компромиссном случае

Подход к решению рассматриваемой задачи, основанный на собственном векторе W , использует информацию, которая содержится в любой, даже несогласованной, матрице и позволяет получать приоритеты, основанные на имеющейся информации, не производя арифметических преобразований исходных данных. Вычисление собственного вектора — трудоемкая математическая операция. Однако, имеются несложные пути получения хорошего приближения к собственному вектору, которые имеют ясную физическую трактовку и могут быть легко реализованы программным способом. Именно этот факт определяет следующую формулу расчета оценки W' вектора приоритетов W (собственного вектора матрицы V)

$$W' = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n v_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n v_{ij}} \right)}, \quad (36)$$

где n — размерность матрицы парных сравнений ($n * n$).

Замена $W' \rightarrow W$ считается эквивалентной, если разница между максимальным (по множеству всех собственных чисел) собственным числом матрицы парных сравнений D_{\max} и порядком этой матрицы n находится в заданных пределах, т.е. в случае идеального согласования экспертов:

$$D_{\max} = n. \quad (37)$$

Эти пределы устанавливаются в виде индекса согласованности (ИС) и отношения согласованности (ОС), определяемые через приближенное значение D_{\max} :

$$D_{\max} \approx \sum_{i=1}^n \left(\left(\sum_{j=1}^n v_{ij} \right) w_i \right), \quad (38)$$

$$ИС = (D_{\max} - n) / (n - 1). \quad (39)$$

При этом для обратно симметричной матрицы парных сравнений:

$$D_{\max} \geq n, \quad (40)$$

$$ОС = \frac{ИС}{\eta} * 100\%, \quad (41)$$

где $\bar{\eta}$ — случайная согласованность матрицы $\|V_{ij}\|$ порядка n (см. табл. 3)

Таблица 3. Значения случайной согласованности парных сравнений

Размерность матрицы (порядок)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайная согласованность ($\bar{\eta}$)	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Отношение согласованности является оценкой согласованности значений в матрице V : величина OC должна быть не более 10-20%, чтобы быть приемлемой. Получаемая совокупность локальных приоритетов (удовлетворяющих требованиям достаточной согласованности) вышеуказанным образом позволяет рассчитать глобальные приоритеты b_i каждого показателя в иерархической сети, которые показывают степень влияния соответствующих свойств C_i на итоговый результат подготовки на тренажерном комплексе. Глобальный приоритет b_i представляет собой произведение локальных приоритетов участия вышестоящих вершин на пути между анализируемой вершиной и корневой вершиной сети, соответствующей интегральному результату подготовки на тренажерном комплексе, в соответствии с теоремой Т. Саати

$$b_i = \prod_{t=1}^T w_{i_t}, \quad (42)$$

где T - число уровней иерархии между i -ым свойством и корневой вершиной, соответствующей интегральному результату подготовки на тренажерном комплексе.

Если показателей в декомпозиции много ($n > 3$), то каждое из них может получить меньший глобальный приоритет, чем каждое из немногих свойств в декомпозиции с меньшим локальным приоритетом.

Для устранения этого недостатка множество глобальных приоритетов b_i преобразуется в множество глобальных приведенных приоритетов b^*_i . Приведенный приоритет b^*_i рассчитывается путем

умножения глобального приоритета b_i каждого показателя C_i на относительное нормализованное число более простых показателей (n''_i / p), находящихся на более низком уровне иерархии

$$b''_i = \frac{b_i * n''_i}{p}, \quad (43)$$

$$b^*_{1H} = \frac{b''_i}{\sum_i b''_i}. \quad (44)$$

В результате приведения глобальных приоритетов b_i удается добиться равновзвешенности свойств на всех уровнях иерархии по глобальным приоритетам

$$b^*_{4} = b^*_{5} = b^*_{6} = b^*_{7} = b^*_{8}. \quad (45)$$

Таким образом, совокупность множеств w_i и b^*_i позволяет определить весовые коэффициенты согласно (36) для всех связей иерархической сети показателей результатов подготовки на тренажерном комплексе, тем самым обеспечить возможность обоснованного учета и анализа влияния реализованности более простых в более сложных показателях результатов подготовки на тренажерном комплексе. При наличии

$$OC \leq 10 \div 20\% \quad (46)$$

найдется некоторое число показателей, для которых

$$b''_i \leq |w_i - w'_i|. \quad (47)$$

Очевидно, что показатели с b''_i , удовлетворяющими (47), имеют практически незначимое влияние на интегральный показатель, и их можно не учитывать. Для определения показателей, удовлетворяющих условию (47), уравнение (34) преобразуется в форму:

$$(V - DE)W = 0, \quad (48)$$

где E — единичная матрица.

Согласно условию (37) для полностью согласованных мнений экспертов имеет место равенство

$$(V - nE)W = 0, \quad (49)$$

что позволяет найти вектор \overline{W} значений приближения локальных приоритетов для идеальной согласованности экспертов. При этом одно из уравнений заменяется условием нормировки:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (50)$$

Наличие значений w_i , \bar{w}_i позволяет проанализировать все показатели в вершинах сети на соответствие условию (47), после чего выявленные незначимые ветви иерархической сети можно удалить с последующей нормализацией глобальных приоритетов b''_i . Получаемая в результате взвешенная и адаптированная к особенностям обучающегося сеть показателей может быть использована непосредственно для многоуровневого анализа результатов разработки проекта программного обеспечения в соответствии с интегральным критерием оценки.

Групповые показатели позволяют быстро осуществлять сравнение уровня разработки однотипных проектов, а их квантификация на показатели более низких уровней позволяет определить недостатки конкретного проекта.

5. Заключение. Применение предлагаемой схемы синтеза адаптивной сети показателей дает возможность повысить обоснованность оценки результатов проектирования и разработки программного обеспечения. Резюмируя описание новых возможностей, которые дает предлагаемая схема в отличие от традиционных методов, следует указать, что к основным ее достоинствам следует отнести: высокий уровень формализации, относительную простоту используемого математического аппарата, возможность развития и адаптации.

Предлагаемый в данной статье подход к синтезу иерархической сети показателей квалиметрической оценки предусматривает возможность его применения для различных видов программного обеспечения, что позволяет говорить о его универсальности и широкой практической применимости.

Литература

1. Юсутов Р.М., Заболотский В.П. Концептуальные и научно-методологические основы информатизации. – СПб.: Наука, 2009. – 542с.,ил.
2. Пальчун Б. П., Юсутов Р. М. Оценка надежности программного обеспечения. СПб.: Наука, 1994. 86 с.
3. Литавев В.В. Надежность программных средств. М.: Синтер, 1998. 232 с.
4. Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. 196 с.
5. Хованов Н.В. Метод рандомизированных траекторий в задачах оценки функциональной зависимости // Труды СПИИРАН. 2009. Вып. 9. СПб.: Наука, 2009. С. 262–279.
6. Hovanov N.V., Hovanov K.N. Decision support system ASPID-3W (Analysis and Synthesis of Parameters under Information Deficiency). Certificate of the computer program official registration № 960087. March 22, 1996. Russian Federal Agency for

legal safeguard of computer programs, databases, and integrated-circuit layouts (RosAPO). Moscow, 1996.

7. *Saaty T., Kearns K.* Аналитическое планирование. Организация систем: Пер. с англ. – М. Радио и связь, 1991 – 224с; ил. (Saaty, Thomas L.; Kearns, Kevin P. Analytical Planing. The organization of systems – New York, Pergamon Press, 1990.)

Ивакин Ян Альбертович — д.т.н., доцент; ведущий научный сотрудник СПИИРАН. Область научных интересов: интеллектуализация геоинформационных систем. Число научных публикаций — 74. ivakin@oogis.ru; www.oogis.ru; СПИИРАН, 14 линия В.О., д.39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; моб. т. +7 -911-284-36-20; р.т. +7(812) 355-96-81.

Ivakin Yan Albertovich — Dr. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor; senior researcher fellow in SPIIRAS. Research interests: intellectualization of geoinformational systems. The number of publication — 74. ivakin@oogis.ru; www.oogis.ru; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St.Petersburg, 199178, Russia; cell phone +7 -911-284-36-20; office phone +7(812) 355-96-81.

Шилчиков Анатолий Александрович — научный сотрудник Федерального государственного автономного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». Область научных интересов: квалиметрия прикладного программного обеспечения. Число научных публикаций — 12. ashilchik@mail.ru, guar.ru; ГУАП, ул. Большая Морская, д.75, г. Санкт-Петербург, 196000, РФ.

Shilchikov Anatoliy Alexandrovich — senior researcher fellow in Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI). Research interests: qualimetry of applied software. The number of publication — 12. ashilchik@mail.ru, guar.ru; GUAP, 75, Bolshaya Morskaya st., St.Petersburg, 196000, Russia.

Львов Александр Сергеевич — научный сотрудник СПИИРАН. Область научных интересов: медицинские информационные системы. Число научных публикаций — 7. lvov@ivs-group.ru; СПИИРАН, 14 линия В.О., д.39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; моб. т. +7 -921-743-25-95; р.т. +7(812) 328-43-12.

Lvov Alexandr Sergeevich — researcher fellow in SPIIRAS. Research interests: medical informational systems. The number of publication — 7. lvov@ivs-group.ru; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St.Petersburg, 199178, Russia; cell phone +7 -921-743-25-95; office phone +7(812) 328-43-12.

Рекомендовано СПИИРАН, научно-исследовательской лабораторией объектно-ориентированных геоинформационных систем, заведующий лабораторией Попович В.В., д-р техн. наук, проф.
Статья поступила в редакцию 12.10.2012

РЕФЕРАТ

Ивакин Я.А., Шилчиков А.А., Львов А.С. Синтез адаптивной сети показателей для квалиметрической оценки результатов проектирования и разработки программного обеспечения.

Задача интеграции современных информационных технологий эффективной (быстрой) разработки прикладного программного кода в существующие методы проектирования и разработки во многом определяется уровнем их интеграции с подсистемами оценки результатов такой разработки. Широкое внедрение в процесс проектирования и разработки прикладного программного обеспечения CASE-средств, баз и библиотек повторно используемого кода, а также широкое применение сервис-ориентированной архитектуры требует качественно новых методов оценивания результатов и диагностики состояния проектов создания программных и программно-технических систем. Обоснованная оценка результатов проектирования и разработки невозможна без использования соответствующих сетей показателей. Рассмотрению принципиальных возможностей и специфике синтеза таких сетей посвящена данная статья.

Синтез сети показателей для оценки результатов проектирования и разработки программного обеспечения проводится в три этапа:

- 4) Построение иерархической сети показателей;
- 5) Структурная адаптация иерархической сети показателей;
- 6) Взвешивание иерархической сети показателей.

Построение иерархической сети показателей оценки программного обеспечения производится путем формирования группового мнения экспертной группы о структуре композиционных связей показателей оценки результатов проектирования и разработки, выявлением на его базе единой иерархической сетевой структуры.

Структурная адаптация иерархической сети показателей осуществляется путем введения ряда мнимых вершин в композицию сложных показателей, которые декомпозируются на число Ингве–Миллера дочерних показателей, определяющее предельное для эксперта число альтернатив, которое тот может анализировать одноактно. Структурная адаптация иерархической сети показателей реализуется путем расщепления вершины, соответствующей указанному сложному свойству на графе сети показателей, с целью группировки дочерних вершин с числом меньшим числа Ингве–Миллера.

Наличие адаптированной к условиям конкретного проекта программного обеспечения и предметной области иерархической сети показателей позволяет «взвесить» ее путем расчета весовых коэффициентов простых показателей в составе сводных и интегрального показателей качества. Значения указанных коэффициентов могут быть рассчитаны с использованием различных методов сводных показателей. В статье рассмотрен метод анализа иерархий.

Предлагаемый в данной статье подход к синтезу иерархической сети показателей квалиметрической оценки предусматривает возможность его применения для различных видов программного обеспечения, что позволяет говорить о его универсальности и широкой практической применимости.

SUMMARY

Ivakin Y.A., Shilchikov A.A., Lvov A.S. **Synthesis of indices' adaptive net intended for quality metering of estimated results at software design and development.**

The task of integrating of modern information technologies of applied software code's effective (fast) development into existing design and development techniques mostly depends on a level of their integration with the estimated results' subsystems for such implementation.

Widespread adoption of CASE- means, the reused code's bases and libraries along with service-oriented architecture in the process of applied software design and development requires qualitatively new system of results estimation and diagnostics of the projects' state of the software and program-technical systems developing.

A reasonable estimate of results in design and developments is possible only with the use of the matching indices' nets. The given paper considers principle possibilities and specific character of such nets' synthesis.

The synthesis of indices' net intended for results' estimation in design and software development can possibly be split into three stages as follows:

- 7) construction of hierarchical indices' net;
- 8) structural adaptation of hierarchical indices' net;
- 9) weighing of hierarchical indices' net.

Development of the hierarchical indices' net for software evaluation is performed by generating a common opinion of an experts' group regarding the structure of composite links between indices of design and development results estimation and is entailed by detection of a uniform hierarchical net structure.

Structural adaptation of the hierarchical indices' net is accomplished via introduction of virtual vertexes indices set into decomposition of complex indices being decomposed into Ingve-Miller number of child indices, thus, defining the limit number of alternatives that the expert can analyze at a time.

Structural adaptation of the hierarchical indices' net is realized by splitting a vertex matching the given complex property on the indices' net graph as aimed at grouping the child vertexes with a number less than Ingve-Miller number.

Existence of hierarchical indices' net adapted to the definite software project terms and subject-area allows for "weighing" the net by calculating weigh coefficients for simple indices within the complex and cumulative quality indices. The values of the above indices could be calculated using different techniques of cumulative indices. This paper considers the technique of hierarchies' analysis.

Proposed by this paper approach to the synthesis of hierarchical indices' net for quality metering evaluation assumes a possibility of its application to various kinds of software in consideration of its universality and broad practical applicability.