

ИНФОРМАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ

Бурый А.С.*

Ключевые слова: программные продукты, бинарные отношения, признаки качества, признаковое пространство, сертификация программных средств, диаграмма размаха, диаграмма Хассе, меры сходства.

Аннотация.

Цель работы: совершенствование научной и методической базы сертификации программной продукции как элемента нормативно-правового регулирования в области стандартизации.

Методы: информационный анализ, моделирование, дискретный анализ, статистический анализ, экспертное оценивание, функционально-логическая классификация.

Результаты: на основе существующих тенденций в области развития методов интеллектуального анализа данных показана актуальность разработки методов информационной поддержки принятия решений в ходе тестирования программных продуктов при их сертификации и предложен понятийный аппарат для научно-методического представления и теоретического обоснования разрабатываемых методик тестирования программных продуктов, основываясь на аппарате бинарных отношений и модификации мер сходства, за счет их обобщения относительно выбранных параметров; достоверность сделанных выводов подтверждается результатами моделирования процесса сравнения объектов контроля относительно бинарных признаков для выбранной модели и уровня меры сходства.

DOI: 10.21681/1994-1404-2019-2-15-25

Введение

Развивая идею совершенствования методического инструментария взаимодействия организационно-технических структур за счет выявления когнитивных факторов в информационных коммуникациях в ходе подготовки и проведения тестирования программных продуктов, изложенную в [5], предлагается общетеретическое обоснование основного применяемого понятийного аппарата. Основное практическое приложение предлагаемого подхода направлено на методы экспертного оценивания, в основе которых все активнее используются бинарные отношения, реализуемые в процедурах ранжирования (упорядочения), отношения эквивалентности и сходства. Наибольшее распространение при выработке персональных и коллективных экспертных оценок получили способы на основе парных сравнений, а также на основе вектора предпочтений на элементах проблемной ситуации, которые наиболее применимы, на наш взгляд, на этапах тестирования программных продуктов. Федеральный закон № 149-ФЗ «Об информации, информатизации и защите информации» определяет информационные ресурсы как объекты отношений между физическими (юриди-

ческими) лицами и государством, подлежащими обязательному учету и защите как всякое материальное имущество собственника¹. Оценка информационного уровня качества представляется как совокупность процедур по выбору номенклатуры показателей качества (ПК), характеризующих информацию. В зависимости от типа программных продуктов выделяются приоритетные ПК, большинство из которых имеют вероятностно-временной вид, оценивают эксплуатационные факторы [4], защищенность [2], а также эргономические свойства программ [8, 9]. Активное применение методов искусственного интеллекта и машинного обучения при разработке методик тестирования программных продуктов связано с переходом к процедурам постоянного контроля качества программных изделий за счет автоматизации тестирования, что особенно важно в условиях постоянных доработок программ и расширении решаемых функций². На рис. 1 показаны направления совершенствования моделей качества (МК) программных изделий. Представленные результаты получены на

¹ Об информации, информатизации и защите информации [Текст]: Федер. Закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ. URL: <https://fzrf.su/zakon/ob-informacii-149-fz/> (дата обращения 23.05.2019).

² Makadia M. Why AI and machine learning will redefine software testing in 2019 // DZone. URL: <https://dzone.com/articles/why-ai-and-machine-learning-will-redefine-software> (дата обращения 31.05.2019).

* Бурый Алексей Сергеевич, доктор технических наук, эксперт РАН, директор департамента ФГУП «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия», Российская Федерация, г. Москва
E-mail: a.s.burij@gostinfo.ru

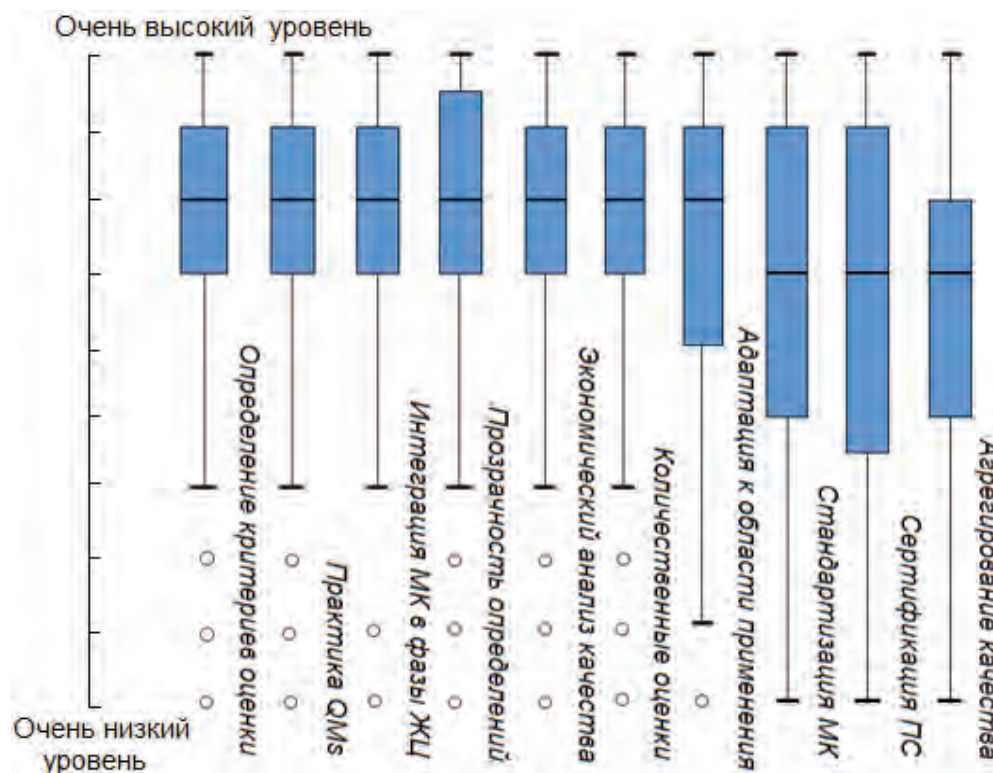


Рис. 1. Оценка направлений потенциального улучшения моделей качества

основании проведенного опроса среди IT-директоров, которые по 10-бальной шкале давали оценку каждому направлению³. С помощью диаграмм размаха (*box plot*) удастся визуализировать выбранные направления развития моделей качества, применяя описательные статистики и такие параметры, как межквартильный размах, максимальное и минимальное выборочные значения, медиана и др.⁴ Практически все направления являются востребованными и получили высокие оценки потенциального роста в системе управления качеством (QMs). Наибольшие параметры размаха в моделях стандартизации и сертификации объясняются дополнительными временными затратами на выполнение данных организационных процессов, которые, следует заметить, не являются обязательными в процессе жизненного цикла (ЖЦ) программной продукции.

Основные понятия признакового пространства оценки качества

Формальное представление признаков качества, каждый из которых, как правило, характеризуется своей шкалой, можно представить в виде кортежа $\langle N_j, W_{N_j} \rangle$, где N_j — имя j -го признака, а W_{N_j} —

значение признака в заданной шкале измерений. С другой стороны, в контексте теории отображений:

$$f: Q \rightarrow D_f, \quad (1)$$

где D_f — множество допустимых значений признака, которое представляет собой знаковую систему; Q — множество признаков, характеризующих программные средства (ПС) в виде вектора $\mathbf{q} = (f_1(q), \dots, f_h(q))$, $\mathbf{q} \in Q$. При этом структура признакового пространства имеет вид:

$$Q = D_{f_1} \times \dots \times D_{f_j} \times \dots \times D_{f_h}, \quad j = 1, h. \quad (2)$$

При теоретико-множественном представлении метрологических задач измерения признаков качества ПС измерительная шкала для признаков качества записывается в виде кортежа $\langle Q, D_{f_j}, f_j \rangle$, объединяющего множества признаков Q , множество допустимых значений признака — D_j для j -го признака и соответствующее отображение f_j . Такие тройки являются морфизмами [12], т. е. отображениями, с областью определения Q и областью значений D_f . Любой морфизм ассоциируется с соответствующим образом $\text{im } f$ и ядром $\text{ker } f$ в виде:

$$\text{im } f \stackrel{\text{def}}{=} \bigcup_{q \in Q} f(q) \quad \text{ker } f \stackrel{\text{def}}{=} \bigcup_{d \in \text{im } f} f^{-1}(d)$$

В ходе испытаний ПС производят измерения необходимых признаков качества и сравнение полученных результатов с требуемыми (эталонными) значениями. При этом выполняются следующие аксиомы:

1). *Аксиома соответствия эталону*. На шкале любого j -го признака качества существует значение, со-

³ Lochmann K. Defining and assessing software quality by quality models // Thesis was on 31.07.2013 at the Technical University of Munich. URL: <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1169637/955300.pdf> (дата обращения 31.05.2019).

⁴ ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017. Статистические методы. Статистическое представление данных. Ч. 4. Выявление и обработка выбросов. Введ. 2018-12-01. М.: Стандартинформ, 2017. IV, 48 с.

ответствующее эталону q_j^3 , уровень которого должен обеспечиваться для тестируемого ПС [11]:

$$d_{jн} \leq f(q_j^3) \leq d_{jв}, \quad (3)$$

причем нижняя и верхняя границы интервала шкалы имеют вид: $d_{jн} = \inf_{q \in Q} f_j(q)$, $d_{jв} = \sup_{q \in Q} f_j(q)$.

2). Аксиома предпочтения эталону. Предпочтение отдается эталонному признаку качества, если $q_j < q_j^3$, что представляется предикатом вида:

$$Pr_{>}(q_j^3, f_j(q)), \quad (4)$$

где $Pr_{>}$ — предикат предпочтения, т. е. выполнения требований к ПС, отраженных в признаках q_j^3 относительно фактического (измеренного) значения данного признака (свойства ПС) — $f_j(q)$, $j = 1, h$.

3). Аксиома обобщенного оценивания. Для агрегирования оценок, полученных на разных шкалах по группе признаков на основании их свертки и представления в виде функции полезности [11, 14]

$$\Phi_j : D_j \rightarrow [0, 1], \quad (5)$$

как некоторой степени пригодности объекта оценивания (тестирования, контроля) эффективному целевому использованию приемлемым способом. Для технологий сертификации ПС целевой является задача контроля признаков качества (ЗКП) ПС в ходе сравнения их с эталонными параметрами для выбранного типа программного средства. Базируясь на системном подходе к оценке состояний сложных динамических объектов, можно рассматривать систему управления сертификацией продукции, проводимой испытательными подразделениями, как сложную систему с изменяемой динамикой при переходе от одного этапа испытаний к последующему этапу. Объектами управления при этом выступают отдельные измерительные комплексы [3, 10], технологические процессы, методики испытаний, обеспечивающие достижение целей управления. Когда объектами управления являются технологии, в том числе и технологии для обеспечения ЗКП, на этапе предварительного анализа осуществляется подготовка объектов тестирования: уточнение спецификации выполняемых программным средством функций; уточнение контролируемых признаков; привлекаемые модели измерений и др. По завершению программы оценивания ПС делается заключение о соответствии тестируемой продукции заявленной функциональной (стратегической) цели — требуемым уровням качественных и количественных показателей качества для рассматриваемого этапа существования динамической системы⁵, что условно обозначается как $\Pi(s_i)$ для s_i -го объекта, входящего в множество S , т. е. $s_i \in S$, $i = 1, |S|$.

Для формализации операций сравнения оцениваемого ПС с параметрами признаков эталонного образца вводятся следующие отношения [3]:

а) отношение эквивалентности E имеет место при равенстве целевого функционала объекта оценивания и эталона, т. е. $\Pi(s_i) = \Pi(s_i^3)$, т. е. объект эквивалентен по функциональному назначению (потенциалу) эталонному образцу, что представляется в виде: $s_i E s_i^3$;

б) отношение частичного порядка для объектов, имеющих общий целевой функционал, но упорядоченных по уровню признаков качества, когда все признаки не хуже соответствующих эталонных значений, т. е. $q_j \geq q_j^3$, что представляется отношением вида: $s_i P s_j^3$ при сравнении с эталоном или отношением $s_i P s_j$, при $i \neq j$, например, при попарном сравнении в ходе контроля партии ПС.

Здесь под отношением понимается взаимосвязь и характер расположения элементов (состояний, действий) определенной системы или одной системы относительно другой. Не вдаваясь в подробный анализ алгебры отношений⁶, следует заметить, что бинарные отношения используются для универсального описания связей между элементами различной природы: информационных, структурных, функциональных, математических и др.

На основании отношения эквивалентности (сходства) можно группировать объекты с одинаковыми признаками, например, утверждать, что объект 1 — O_1 и объект 2 — O_2 эквивалентны по соответствующему признаку качества, что характерно при решении задач распознавания образов, при описании структур данных в базах данных, выделяя их в определенный класс.

В задаче контроля и измерения признаков качества важным, с точки зрения алгебры построения сигнатуры (набора операций над множеством данных и отношений, включая приведенные определения и связанную с ними аксиоматику) решаемых измерительных задач, является понятие близости признаков качества к существующим требованиям и нормам (для многопризнакового сравнения объектов, когда в пространстве качественных признаков сравниваются векторные признаки качества).

Для оценок объектов по множеству признаков система предпочтений должна строиться на таких свойствах бинарных отношений, как рефлексивность (или асимметричность), транзитивность и связность. В табл. 1 показаны примеры использование бинарных отношений при реализации различных процедур сравнения объектов и обоснования предпочтений между сравниваемыми признаками. Основными из рассматриваемых свойств, применяемых бинарных отношений в ходе решения задач сравнения, являются связ-

⁵ ГОСТ Р 57700.3-2017. Численное моделирование динамических рабочих процессов в социотехнических системах. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2018. IV, 11 с.

⁶ Соболева Т.С., Чечкин А.В. Дискретная математика. Углубленный курс: Учебник. М.: КУРС: ИНФРА-М, 2017. 278 с.

Соответствие способов сравнения объектов типам бинарных отношений

Способ сравнения объектов	Свойства бинарных отношений
Попарное сравнение	Рефлексивность; антисимметричность
Сортировка	Рефлексивность; симметричность
Ранжирование	Рефлексивность; транзитивность
Попарное выражение предпочтения как доли суммарной или относительной интенсивности	Связанность элементов внутри классов
Проверка на согласованность предпочтений экспертов для устранения противоречивых суждений	Транзитивность; антисимметричность; связанность элементов внутри классов

ность получаемых оценок и результатов, а также транзитивность (отсутствие циклов в отношениях).

Одним из недостатков ранжирования как метода субъективного измерения является практическая невозможность упорядочения большого числа объектов или числа признаков. Как показывает опыт, эксперты затрудняются в проведении ранжирования данных при росте признаков более 15—20, так как количество взаимосвязей между элементами растет пропорционально квадрату числа объектов сравнения, что приводит часто к росту ошибочных решений в ходе экспертного оценивания.

Анализ структурных свойств задачи оценки качества

Множество всех объектов ПС, тестируемых в процессе сертификации, рассматривается как пространство $\Pi_{зкп}$ задачи контроля признаков качества (ЗКП), включающее множества объектов исследования, отношений эквивалентности и частичной упорядоченности, объединяемые целевой функциональной направленностью:

$$\Pi_{зкп} = \langle S, \{E\}, \{P\} \rangle. \tag{6}$$

Применимость рассматриваемых отношений представим для случая сравнения объектов программной продукции по двум признакам, тогда выражение для вектора признаков качества будет включать два элемента (две координаты) — $\vec{q}_i = \{q_{i1}, q_{i2}\}$. Отбрасывая номер объекта i , представим признакововое пространство в виде плоскости $q_1 O q_2$ (рис. 2). На рис. 2 выделены четыре подобласти в зависимости от существующих требований к выбранным признакам качества (ПрК), которые задаются соответствующими эталонными значениями $q_1^э$ и $q_2^э$, а максимально возможные их значения (уровни максимумов) отмечены как $\max q_j, j = 1, 2$. Для многих признаков максимальный уровень ПрК равен единице, а метод оценки показателей качества — экспертный.

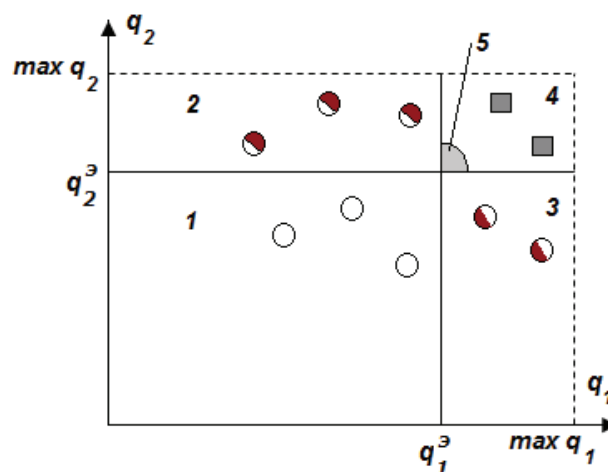


Рис. 2. Подобласти признаковового пространства по результатам тестирования по двум признакам

Объекты тестирования на рис. 2 обозначены либо прозрачным кружком — не удовлетворяющие требованиям к признакам q_1 и q_2 и принадлежащие подобласти 1, либо темно-белым кружком, когда тестируемый объект только по одному из ПрК соответствует требованиям — это подобласти 2 и 3, либо заштрихованным прямоугольником, когда оба ПрК не хуже эталонных значений — подобласть 4. Отдельно выделен сектор 5, в рамках которого определены отношения эквивалентности E рассматриваемых ПрК с соответствующими уровнями требований. Необходимость подобласти 5 объясняется возможной погрешностью оценивания при изменениях отдельных ПрК. В идеальном случае сектор 5 вырождается в точку с координатами $(q_1^э, q_2^э)$.

Отношения частичного порядка P характерны для подобластей 2 и 3, когда необходимо упорядочить объекты по отдельным признакам, например, в ходе категорирования оцениваемых ПС с целью присвоения пониженной категории (по согласованию с

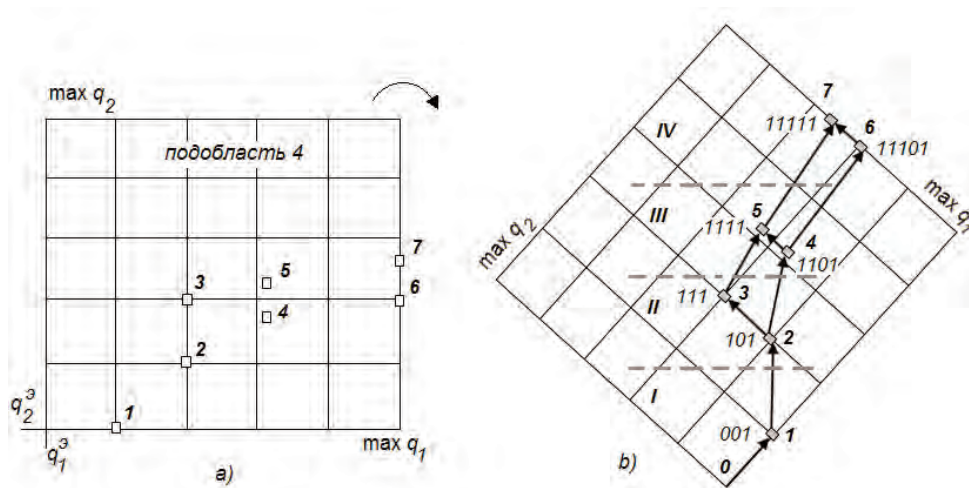


Рис. 3. Примеры объектов тестирования по двум признакам качества (а) и вариант упорядочения выбранных объектов (b)

Заказчиком), когда требованиями к отдельным (не существенным) ПрК можно не учитывать. Конечное упорядоченное множество графически изображают с помощью диаграмм Хассе⁷. При этом каждый элемент множества изображается вершинами графа. Если объект x доминирует над объектом y (еще применяют термин x «покрывает» y), то вершина x располагается выше вершины y , и вершины соединяются между собой прямой линией (ребром). Этому соответствует математическая запись: $y < \bullet x$; если (1) выполняется $y < x$ и (2) не существует (квантор $\neg \exists$) такого z , что $y < z < x$. Формально диаграмму Хассе $H(P)$ можно представить совокупностью отношений следующего вида:

$$H(P) \stackrel{\text{def}}{=} \{(y, x) \in P, \neg \exists z \in X(yPz \wedge zPx)\}$$

Связи в подобных диаграммах могут пересекаться, но не должны проходить через вершины, если они только не являются концами линий, представляющими соответствующие отношения. На примере подобласти 4 (см. рис. 2), для которой характерно, что значения рассматриваемых ПрК не хуже соответствующих эталонных значений, можно показать применимость отношения частичного порядка при сравнении программных средств одного типа. Для этого подобласть 4 представим на рис. 3а, на котором цифрами от 1 до 7 обозначены результаты оценивания объектов (программных средств) по двум признакам. Координаты каждого из объектов $(q_{i1}; q_{i2})$, $i = \overline{1, 7}$ соответствуют значениям признаков качества. В приведенном на рис. 3а примере для наглядности объекты тестирования характеризуются двумя признаками, хотя в общем случае это может быть гиперкуб с размерностью, равной числу оцениваемых признаков качества рассматриваемого типа ПС.

Вариант диаграммы Хассе для подобласти 4 представлен на рис. 3б. Визуальная аналогия получена вра-

щением исходного рис. 3а на 45° относительно центра подобласти 4. За начальное значение (минимальный элемент) для упорядочения данного набора объектов примем точку «0», соответствующую эталонным параметрам (объекта-образца) тестируемого типа ПС. Для данного примера, все рассматриваемые объекты (1...7) по признакам качества q_1 и q_2 превосходят эталонные параметры, но требуют упорядоченности для задачи выбора или ранжирования по измеренным значениям признаков качества.

Для построения связей между координатами вершин 1...7 для двух однородных признаков качества q_1 и q_2 воспользуемся метрикой, равной квадрату расстояния от минимального элемента «0» до соответствующего объекта — d_i^2 , т. е. $d_i^2 = q_{i1}^2 + q_{i2}^2$, $i = \overline{1, 7}$. Полученные расстояния представим в двоичном коде и поместим в табл. 2. Для упорядочения вершин и построения связей составим матрицу d_H расстояний Хемминга между всеми вершинами как число разрядов, на которое отличаются два двоичных кода. Еще расстояние Хемминга называют мерой близости булевых векторов в ходе анализа данных. Так, для размера булевого вектора, равного p , имеем:

$$d_H(\bar{q}_i; \bar{q}_j) = \sum_{v=1}^p |q_i^{(v)} - q_j^{(v)}|, \quad i, j = \overline{1, 7}, \quad v = \overline{1, p} \dots (7)$$

Результаты вычислений по (7) поместим в табл. 2. Анализ матрицы расстояний Хемминга показывает, что из начального элемента «0» минимальному расстоянию d_H соответствует объект с номером 1. Переход из точки 1, а преимущество в организации связи между вершинами отдается минимальным расстояниям по коду Хемминга, т. е. единичным, возможен в вершину 2.

Из вершины 2 условию единичного расстояния удовлетворяют два перехода: в вершину 3 и в вершину 4 (см. рис. 3б). Продолжив построение ребер диаграммы Хассе, получим наибольший элемент для данного примера (вершина 7). Уровни диаграммы Хассе будем обозначать римскими цифрами от I до IV (по числу значимых разрядов двоичного числа).

⁷ Там же.

Номер объекта, i	d_i^2	d_i^2 в двоичном коде	Расстояния Хемминга между вершинами						
			1	2	3	4	5	6	7
1	1	00001	0	1	2	2	3	3	4
2	5	00101	1	0	1	1	2	2	3
3	7	00111	2	1	0	2	1	3	2
4	13	01101	2	1	2	0	1	1	2
5	15	01111	3	2	1	1	0	2	1
6	29	11101	3	2	3	1	2	0	1
7	31	11111	4	3	2	2	1	1	0

Для любой эквивалентности $E \in \mathbf{E}$ справедливо утверждение о возможности декомпозиции области отношений эквивалентности \mathbf{E} целевого функционального пространства относительно любого типа программных средств по выбранному классу признаков качества. Причем эквивалентные отношения возможно рассматривать, как относительно отдельных свойств (признаков), например, устойчивость функционирования, работоспособность, так и относительно комплексных показателей качества, например, показателей надежности ПС, показателей сопровождения, показателей эффективности и др.

Важным выводом для отношения эквивалентности является то, что для ряда операций над отношениями справедливо следующее: пересечение отношений эквивалентности также образует отношение эквивалентности, что позволяет проводить агрегирование отношений $E \in \mathbf{E}$ при контроле многопризнаковых объектов.

Известно, что любая эквивалентность $E \in \mathbf{E}$ в принципе позволяет образовать декомпозицию общей задачи контроля признаков качества на смежные классы из Q/E , или осуществлять их объединение:

$$\bigcup_{q \in Q} \{q\}_{E_l} = Q,$$

где $\{q\}_{E_l}$ — набор признаков качества (смежный класс) признаков $q \in Q$; $Q/E_l = \{\{q\}_{E_l}\}$ — фактор-множество (множество всех классов эквивалентности); $E_l \in \mathbf{E}$, индекс l определяет класс эквивалентности, например, в соответствии с выбранными факторами качества программного средства заданного типа.

Величина индекса l сверху ограничена мощностью множества Q , т. е. $l \leq |Q|$, когда каждый признак образует свой класс эквивалентности, однако нас интересуют классы эквивалентности, соответствующие заданным наборам признаков, типам ПС, комплексным свойствам программных продуктов и др.

Меры сходства и различия при контроле признаков

Выбор решения на множестве альтернатив всегда был и остается искусством формализации задачи выбора с множеством условий и интуитивных заключений. Эксперт или лицо, принимающее решение (ЛПР), в ходе решения задачи контроля качества на основании полученных фактов (измерений), представленных в количественной или качественной форме, выносит суждение о сходстве исследуемого объекта с некоторым образцом (эталоном). Для контроля признаков качества и отнесения программного изделия к определенному классу путем оценки близости на основе мер сходства и расстояния.

Существование мер близости позволяет в ходе исследования решать такие задачи, как поиск отношений с определенным (заданным) набором свойств; классифицировать экспертов по формируемым ими решениям и оценивать непротиворечивость последних; строить итоговые выводы на основании мнений экспертов.

Набор признаков, характеризующих конкретный образец программного средства, может быть достаточно большим. В этой связи активно развиваются методы сжатия данных [3, 16] и количественной оценки интегрированных свойств (признаков) измерительной информации. В ходе решения задач распознавания образов, классификации объектов ключевая роль принадлежит мерам сходства.

Будем считать, что два элемента $x, y \in X$ называются сравнимыми элементами множества X , если либо xPy , либо yPx .

В работе [5] и прилагаемой к ней библиографии отмечается, что функцией, определяющей меру близости двух векторов, является расстояние, которое называют метрикой пространства. Существующие меры сходства можно разделить в зависимости от способа оценивания близости между объектами, поэтому это показатели:

- расстояния в метрическом пространстве;
- корреляционные коэффициенты (косинусные меры и др.);

– коэффициенты ассоциации, отражающие число совпадающих признаков к их общему количеству (коэффициенты связи, отношений, парного сравнения). Корреляционные признаки используют тогда, когда получен вектор оценок по всем признакам и известны влияния признаков друг на друга, сравнение объектов происходит на основании анализа обобщенной связи (корреляции) между векторами признаков. Для задач тестирования признаков качества программного обеспечения необходимо знание каждого признака, чтобы понять, соответствует ли он заданным требованиям, что не всегда возможно, отталкиваясь от комплексных оценок, к которым можно отнести коэффициенты корреляции.

Неотрицательная вещественная функция $C(O_j, O_k) = \{c_{jk}\}$ называется *мерой сходства* между

объектами O_j и O_k , если выполняются следующие условия [1, 6] (неотрицательности, тождественности и симметричности):

- a) $0 \leq C(O_i, O_k) < 1, k \neq j$;
- b) $C(O_j, O_j) = 1$;
- c) $C(O_j, O_k) = C(O_k, O_j)$.

Матрица мер сходства, в отличие от матрицы расстояний (по диагональным элементам), имеет вид:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & 1 & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Мера сходства принимает минимальное значение, равное 0, если отсутствуют общие признаки у сравнива-

Таблица 3

Варианты распределения бинарных признаков для двух объектов

Признак 1	Признак 2		Сумма по строке
	Есть	Нет	
Есть	<i>a</i>	<i>b</i>	$p_1 = a + b$
Нет	<i>c</i>	<i>d</i>	$q_1 = c + d$
Всего	$p_2 = a + c$	$q_2 = b + d$	$a + b + c + d$

емых объектов, и равна 1 при полном совпадении объектов. Величину C_{jk} называют *коэффициентом сходства* [6]. Для двух бинарных признаков 1 и 2 в качестве примера представим (табл. 3) ситуации, когда для каждого объекта тестирования признаки присущи либо нет.

Для всех четырех ситуаций, представленных в табл. 3, *a* — число совпадений по единичным признакам; *b* — число «1» по признаку 1 и «0» по признаку 2 и т.д. Суммарное выражение для общего числа комбинаций: $a + b + c + d = n$.

$$\begin{matrix} \mathbf{x}: 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ \mathbf{y}: 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} a = 4 & b = 2 \\ c = 1 & d = 3 \end{matrix}$$

Рис. 4. Пример расчета частотных параметров a, b, c, d

Для примера рассмотрим сравнение двух векторов **X** и **Y** (рис. 4), соответствующих двум объектам, с числом признаков $n = 10$. Воспользовавшись логикой формирования табл. 3, определим значения *a, b, c, d*.

Существующее многообразие мер сходства иногда объединяют в параметрические семейства [15], обобщая их формализованное представление, основываясь на связях (линейных или нелинейных) между элементами (частотами появления признаков и других характеристик). В табл. 4 представлены основные и наиболее популярные меры сходства⁸.

Так, меры 1—4 (см. табл. 4) можно обобщить с помощью выражения:

$$T_\theta = \frac{a}{a + \theta(b + c)}, \quad (10)$$

где θ — некоторое положительное число, а меры 5—7 можно систематизировать с помощью выражения:

$$C_\theta = \frac{a + d}{a + d + \theta(b + c)} \quad (11)$$

Обобщая выражения (10) и (11), параметрические семейства представляют в виде [15]:

$$C_{(a)} = \frac{a}{a + \theta(b + c)} \text{ и } C_{(a+d)} = \frac{a + d}{a + d + \theta(b + c)}. \quad (12)$$

Изменяя параметр θ в выражении (12) для $C_{(a)}$, получаем еще одну форму представления мер сходства⁹ из табл. 4:

⁸ Choi S-S., Cha S-H., Tappert C.C. A survey of binary similarity and distance measures, Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics, 2010. № 8(1), pp. 43-48.

⁹ Todeschini R., Consonni V., Xiang H., Holliday J., Buscema M., Willett P. Similarity coefficients for binary chemoinformatics data:

Таблица 4

Определения мер сходства для бинарных признаков

№ п/п	Название меры сходства	Формула для вычисления	Семейства мер	
			a	$a+d$
1	Мера сходства Jaccard — Tanimoto	$C_{JT} = \frac{a}{a+b+c}$	$\theta = 1$	
2	Gleason — Dice — Sorenson	$C_{Gle} = \frac{2a}{2a+b+c}$	$\theta = \frac{1}{2}$	
3	Sokal—Sneath (1)	$C_{SS1} = \frac{a}{a+2b+2c}$	$\theta = 2$	
4	Jaccard	$C_J = \frac{3a}{3a+b+c}$	$\theta = \frac{1}{3}$	
5	Sokal—Michener	$C_{SM} = \frac{a+d}{a+b+c+d}$		$\theta = 1$
6	Rogers—Tanimoto	$C_{RT} = \frac{a+d}{a+2b+2c+d}$		$\theta = 2$
7	Sokal—Sneath (2)	$C_{SS2} = \frac{2a+2d}{2a+b+c+2d}$		$\theta = \frac{1}{2}$

$$C_{(a)}(\theta = 1) = C_{JT} = \frac{a}{p_1 + p_2 - a}; C_{(a)}\left(\theta = \frac{1}{2}\right) = C_{Gle} = \frac{2a}{p_1 + p_2}. \quad (13)$$

Из выражения (13) следует важное обобщение¹⁰, что для параметров $0 < \theta_1 < \theta_2$ выполняется нестрогое неравенство $C_{(a)}(\theta_2) \leq C_{(a)}(\theta_1)$ при ограничении вида $0 \leq C_{(a)}(\theta) \leq 1$. В выражениях (10)—(13) смысл параметров $a, a+d$ определен согласно табл. 3.

Для ряда случаев обработки качественных признаков сравниваемых объектов O_j и O_k применяют теоретико-множественное представление признаков [1]. Если считать, что объекты O_j и O_k принадлежат, соответственно, множествам X и Y , то табл. 3 можно переписать в виде табл. 5 путем замены $a = |X \cap Y|$, $b = |X \cap \bar{Y}|$, $c = |\bar{X} \cap Y|$, $d = |\bar{X} \cap \bar{Y}|$, где \bar{X} и \bar{Y} — дополнения указанных множеств, а $|X|$, $|Y|$ — мощности множеств.

Для примера рассчитаем меру сходства двух сравниваемых объектов, один из которых может считаться эталонным, по группе признаков качества. Для этого воспользуемся бинарной матрицей $M_B = \|x_{ij}\|$, $x_{ij} = \{0,1\}$ у которой столбцы соответствуют типу объекта (программного изделия), а строки — признакам качества (свойства).

Таблица 5

Теоретико-множественное представление мер сходства

	Y	\bar{Y}
X	$ X \cap Y $	$ X \cap \bar{Y} $
\bar{X}	$ \bar{X} \cap Y $	$ \bar{X} \cap \bar{Y} $

С учетом теоретико-множественного представления пространства событий на примере коэффициента Жаккарда-Танимото запишем выражение для меры сходства:

$$C_{JT} = \frac{a}{a+b+c} = \frac{|X \cap Y|}{|X \cap Y| + |X \cap \bar{Y}| + |\bar{X} \cap Y|}$$

Последнее выражение перепишем, исходя из двух признакового сравнения объектов, используя представления бинарной матрицы M_B [1]:

$$C(O_1, O_2) = \frac{\sum_{i=1}^p x_{i1}x_{i2}}{\sum_{i=1}^p x_{i1} + \sum_{i=1}^p x_{i2} - \sum_{i=1}^p x_{i1}x_{i2}}, \quad (14)$$

где p — заданное число признаков сравнения.

overview and extended comparison using simulated and real data sets, J. Chem. Inf. Model., 2012, Vol. 52(11), pp. 2884-2901.

¹⁰Warrens M.J. Similarity coefficients for binary data: properties of coefficients, coefficient matrices, multi-way metrics and multivariate coefficients, 2008, Ph.D. thesis, Leiden University, Netherlands.

Эксперимент

Представим бинарную матрицу M_R для попарного сравнения восьми объектов по p признакам ($p = 10$) в виде табл. 6, где «1» соответствует наличию признака для объекта в выбранном столбце.

Таблица 6
Исходные данные о наличии признаков у тестируемых объектов

	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8
q_1	1	0	1	1	1	0	1	1
q_2	0	1	0	0	1	0	1	1
q_3	1	0	0	1	1	1	0	1
q_4	1	1	1	1	0	1	1	1
q_5	0	1	1	1	1	0	1	1
q_6	1	0	1	0	0	1	0	0
q_7	1	0	1	1	1	1	0	0
q_8	1	1	1	0	1	0	1	1
q_9	1	1	1	1	1	1	1	1
q_{10}	0	1	1	1	0	1	1	0
$\sum_{i=1}^p x_{ij}$	7	6	8	7	7	6	7	7

С учетом выражения (14) и данных табл. 6 для всех пар сочетаний объектов определяются меры сходства и формируется матрица мер сходства в виде табл. 7. Для примера для пары объектов O_2 и O_7 получаем:

$$C(O_2, O_7) = \frac{6}{6+7-6} = 0,86.$$

Таблица 7
Результаты расчета мер сходства

	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8
O_1	1	0,30	0,67	0,56	0,56	0,63	0,40	0,56
O_2	0,30	1	0,56	0,44	0,44	0,33	0,86	0,63
O_3	0,67	0,56	1	0,67	0,50	0,56	0,67	0,50
O_4	0,56	0,44	0,67	1	0,56	0,63	0,56	0,56
O_5	0,56	0,44	0,50	0,56	1	0,30	0,56	0,75
O_6	0,63	0,33	0,56	0,63	0,30	1	0,30	0,30
O_7	0,40	0,86	0,67	0,56	0,56	0,30	1	0,75
O_8	0,56	0,63	0,50	0,56	0,75	0,30	0,75	1

Матрица мер сходства симметрична относительно главной диагонали.

Отношение сходства можно определить с помощью порога δ и меры сходства $C(X, Y)$ [7]. Deskриптивные множества X и Y сходны, если мера

сходства $C(X, Y)$ не меньше некоторого порога, т.е. $C(X, Y) \geq \delta$, причем δ — некоторое произвольное число ($0 \leq \delta \leq 1$).

По данным табл. 7 для заданного уровня δ строится матрица сходства C_δ . Пусть $\delta = 0,6$, тогда для матрицы сходства $C_{0,6}$ элементы формируются из условия:

$$x_{ij}^\delta = \begin{cases} 1, & \text{если } x_{ij} \geq 0,6; \\ 0, & \text{если } x_{ij} < 0,6. \end{cases} \quad (15)$$

На основе матрицы мер сходства, представленных в табл. 7, и условия (15) для элементов матрицы сходства $C_{0,6}$ получим табл. 8.

Анализ различных уровней отношений сходства показывает, что чем ниже порог сходства, тем более слабые связи между признаками приходится учитывать при исследовании признаков качества объектов. Следует также помнить, что на структуру связей влияет выбранный вид модели меры сходства в соответствии с табл. 4.

Таблица 8.
Матрица сходства $C_{0,6}$

	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8
O_1	1	0	1	0	0	1	0	0
O_2	0	1	0	0	0	0	1	1
O_3	1	0	1	1	0	0	1	0
O_4	0	0	1	0	0	1	0	0
O_5	0	0	0	0	1	0	0	1
O_6	1	0	0	1	0	1	0	0
O_7	0	1	1	0	0	0	1	1
O_8	0	1	0	0	1	0	1	1

Заключение

Таким образом, развивая кластерный подход к задачам контроля признаков качества программного обеспечения [5] в ходе его тестирования, показано, что при сравнении качественных признаков программ в процессе экспертного оценивания необходимо использовать меры сходства, адаптируя их под инструментарий параметрического представления единичных признаков. Получаемый уровень сходства тестируемых признаков определяется внутренними связями между признаками и выбранными метриками сходства, которые, в свою очередь зависят от типа тестируемых программных продуктов. Получаемые по результатам испытаний сертификаты обеспечивают корректность правового регулирования информационных отношений в инфосфере.

Рецензент: **Сухов Андрей Владимирович**, профессор кафедры «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» Московского авиационного института (национальный исследовательский университет) доктор технических наук, профессор, Российская Федерация, г. Москва.

E-mail: avs57@mail.ru

Литература

1. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. М. : Финансы и статистика, 2002. 368 с.
2. Барабанов А.В., Марков А.С., Цирлов В.Л. 28 магических мер разработки безопасного программного обеспечения // Вопросы кибербезопасности. 2015. № 5(13). С. 2—10.
3. Бурый А.С. Декомпозиция распределенных отказоустойчивых информационно-измерительных систем // НТИ. Сер. № 2. 1998. № 1. С. 3—14.
4. Бурый А.С. Отказоустойчивые распределенные системы переработки информации. М. : Горячая линия — Телеком, 2016. 128 с.
5. Бурый А.С. Тестирование качества в ходе сертификации программного обеспечения // Правовая информатика. 2019. № 1. С. 46—55.
6. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. М. : Статистика, 1977. 128 с.
7. Загоруйко Н.Г., Борисова И.А и др. Количественная мера компактности и сходства в конкурентном пространстве // Сибирский журнал индустриальной математики. 2010. Т. XIII. № 1. С. 59—71.
8. Ловцов Д.А. Обеспечение информационной безопасности в российских телематических сетях // Информационное право. 2012. № 4. С. 3—7.
9. Ловцов Д.А. Проблема гарантированного обеспечения информационной безопасности крупномасштабных автоматизированных систем // Правовая информатика. 2017. № 3. С. 66—74.
10. Ловцов Д.А. Лингвистическое обеспечение правового регулирования информационных отношений в инфосфере. II. Качество информации // Правовая информатика. 2015. № 2. С. 52—60.
11. Микони С.В. Аксиоматика методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 1(44). С. 198—214.
12. Солодовников В.В., Тумаркин В.И. Теория сложности и проектирование систем управления. М. : Наука, 1990. 168 с.
13. Телеметрическая система со сжатием информации: пат. 1425754 СССР: МКИ4 G08C 19/28 / А.С. Бурый, Д.А. Ловцов. 4195545/24-24; заявл. 11.02.87; опубл. 23.09.88. Бюл. № 35. С. 243.
14. Фишберн П. Теория полезности для принятия решения. М. : Наука, 1978. 352 с.
15. Baturshin I.Z., Kubysheva N., Villa-Vargas L.A., Solovyev V. Visualization of similarity measures for binary data and 2 x 2 tables, *Computación y Sistemas*, 2016, Т. 20(3), pp. 345-353.
16. Buryi, A.S., Loban, A.V., Lovtsov, D.A. Compression models for arrays of measurement data in an automatic control systems, *Automation and Remote Control*, 1998, Vol. 59(5), Pt. 1, pp. 613-631.

INFORMATION AND MATHEMATICAL SUPPORT FOR COMPUTER SOFTWARE QUALITY CONTROL

Aleksei Buryi, Doctor of Science (Technology), expert at the Russian Academy of Sciences, Director of a department of the Russian Scientific and Technical Centre of Information on Standardisation, Metrology and Conformity Assessment, Moscow, Russian Federation.

E-mail: a.s.burij@gostinfo.ru

Keywords: software products, binary relations, quality attributes, attribute space, software certification, box plot, Hasse diagram, similarity measure.

Abstract.

Purpose of the work: improving the scientific and methodological base of software products certification as an element of legal regulation in the standardisation field.

Methods used: information analysis, modelling, discrete analysis, statistical analysis, expert evaluation, functional and logical classification.

Results obtained: based on existing trends in the field of development of intellectual data analysis methods, the topicality of developing methods for information support of decision making in the course of testing software during its certification is shown and a conceptual apparatus is proposed for scientific and methodological representation and theoretical justification of software products testing methods under development which is based on the apparatus of binary relations and modifications of similarity measures and uses their generalisations regarding the parameters selected. The reliability of the conclusions made is confirmed by the results of modelling the process of comparing the controlled objects in respect of binary attributes for the selected model and similarity measure level.

References

1. Andreichikov A.V., Andreichikova O.N. Analiz, sintez, planirovanie reshenii v ekonomike, M. : Finansy i statistika, 2002, 368 pp.
2. Barabanov A.V., Markov A.S., Tsirlov V.L. 28 magicheskikh mer razrabotki bezopasnogo programmnoho obespecheniia, Voprosy kiberbezopasnosti, 2015, No. 5(13), pp. 2-10.
3. Buryi A.S. Dekompozitsiia raspredelennykh otkazoustoichivyykh informatsionno-izmeritel'nykh sistem, NTI, ser. No.2, 1998, No. 1, pp. 3-14.
4. Buryi A.S. Otkazoustoichivye raspredelennye sistemy pererabotki informatsii, M. : Goriachaia liniia -- Telekom, 2016, 128 pp.
5. Buryi A.S. Testirovanie kachestva v khode sertifikatsii programmnoho obespecheniia, Pravovaia informatika, 2019, No. 1, pp. 46-55.
6. Diuran B., Odell P. Klasternyi analiz, M. : Statistika, 1977, 128 pp.
7. Zagoruiko N.G., Borisova I.A i dr. Kolichestvennaia mera kompaktnosti i skhodstva v konkurentnom prostranstve, Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki, 2010, T. XIII, No. 1, pp. 59-71.
8. Lovtsov D.A. Obespechenie informatsionnoi bezopasnosti v rossiiskikh telematicheskikh setiakh, Informatsionnoe pravo, 2012, No. 4, pp. 3-7.
9. Lovtsov D.A. Problema garantirovannogo obespecheniia informatsionnoi bezopasnosti krupnomasshtabnykh avtomatizirovannykh sistem, Pravovaia informatika, 2017, No. 3, pp. 66-74.
10. Lovtsov D.A. Lingvisticheskoe obespechenie pravovogo regulirovaniia informatsionnykh otnoshenii v infosfere. II. Kachestvo informatsii, Pravovaia informatika, 2015, No. 2, pp. 52-60.
11. Mikoni S.V. Aksiomatika metodov mnogokriterial'noi optimizatsii na konechnom mnozhestve al'ternativ, Trudy SPIIRAN, 2016, vyp. 1(44), pp. 198-214.
12. Solodovnikov V.V., Tumarkin V.I. Teoriia slozhnosti i proektirovanie sistem upravleniia, M. : Nauka, 1990, 168 pp.
13. Telemetricheskaia sistema so szhatiem informatsii: pat. 1425754 SSSR: MKI4 G08C 19/28, A.S. Buryi, D.A. Lovtsov, 4195545/24-24; zaiavl. 11.02.87; opubl. 23.09.88, biul., No. 35, p. 243.
14. Fishbern P. Teoriia poleznosti dlia priniatii resheniia, M. : Nauka, 1978, 352 pp.
15. Batyrshin I.Z., Kubysheva N., Villa-Vargas L.A., Solovyev V. Visualization of similarity measures for binary data and 2 x 2 tables, Computación y Sistemas, 2016, T. 20(3), pp. 345-353.
16. Buryi, A.S., Loban, A.V., Lovtsov, D.A. Compression models for arrays of measurement data in an automatic control systems, Automation and Remote Control, 1998, Vol. 59(5), Pt. 1, pp. 613-631.