

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION HISTORY

УДК 004.75

DOI 10.52575/2687-0932-2021-48-3-528-542

Метод анализа динамики изменения требований назначения многофункциональных программно-технических систем

Логинов И.В., Фролов В.А.

Академия ФСО России,
Россия, 302015, г. Орел, ул. Приборостроительная, д. 35
E-mail: loginov_iv@bk.ru

Аннотация. Развитие сложных программно-технических систем привело к существенному увеличению их структурной и функциональной сложности и приданию им свойств многофункциональности. Поддержка принятия решений на управление в процессе развития таких систем требует учета динамики изменения требований назначения, происходящих из-за вариации внешних условий. Это обосновывает актуальность разработки механизмов анализа изменения требований назначения многофункциональных систем. На основе анализа целеориентированных методов построения систем требований построена их модель в виде изменяемой иерархии функциональных требований. Предложенная модель позволяет учитывать как динамику изменения требований, так и взаимосвязи между ними. В результате анализа процесса изменения требований назначения многофункциональных систем выявлены основные факторы и показана необходимость учета динамики изменения требований. Для решения задач системного анализа введен показатель динамики изменения требований назначения, рассчитываемый как отношение суммы относительной величины изменения требований к наблюдаемой продолжительности изменения. Предложен подход к расчету показателя динамики требований на основе квалиметрического подхода, позволяющий учитывать изменения с учетом их важности на основе заранее построенного дерева показателей качества. Областью применения нового показателя является косвенная оценка изменения условий применения многофункциональных реконфигурируемых систем. Использование показателя позволяет решать прямую и обратную задачи оценки пригодности системы в условиях изменения требований. Расчет нового показателя для сложных систем отдельных классов показывает высокое значение (более 0,2 в год) динамики, что обосновывает актуальность мероприятий модернизации для поддержания пригодности многофункциональных систем.

Ключевые слова: многофункциональная система, реконфигурация, изменение требований, анализ систем, функция, программно-техническая система.

Для цитирования: Логинов И.В., Фролов В.А. 2021. Метод анализа динамики изменения требований назначения многофункциональных программно-технических систем. Экономика. Информатика, 48 (3): 528–542. DOI 10.52575/2687-0932-2021-48-3-528-542.

The analyze method of functional requirements change dynamics for multifunctional cyber-physical systems

Loginov I. V., Frolov V. A.

Academy of the FSG of Russia,
35 Priborostroitelnaya St, Orel, 302015, Russia
E-mail: loginov_iv@bk.ru

Abstract. The development of cyber-physical systems led to a significant increase in their structural and functional complexity and make them multifunctional. Decision support for the development management of

such systems requires taking into account the dynamics of requirements change. There is, hence, an urgent need to develop mechanisms in order to analyze the requirements changes of multifunctional systems. The analysis of goal-oriented methods for requirements specification led to describe the model of the requirements system in the form of adaptability requirement hierarchy. This model allow to aggregate requirements dynamics and interlinks. The analysis of requirements change process allowed to determinate the basic factors and suggested to account the value of change in the management. The study introduces new indicator – “dynamics of requirements change” for the system analysis of multifunctional cyber-physical system. It presented as a ratio of the relative value requirements change sum to the period of changes. New estimation method based on qualitymetric approach allow to account the value of dynamics of requirements change indicator with the traceability and importance of individual changes as a form of quality tree. The proposed method of evaluating the indicator requirements changes allows to determine the external dynamics of the managed multifunctional system. The application of new indicator is an indirect assessment of changes in the multifunctional reconfigurable systems environment as a form of system analysis. The illustration indicators values for some complex system have relative large (more then 0,2 by year) dynamics.

Keywords: multifunctional system, reconfiguration, requirements change, system analysis, function, cyber-physical systems.

For citation: Loginov I.V., Frolov V.A. 2021. The analyze method of functional requirements change dynamics for multifunctional cyber-physical systems. Economics. Information technologies, 48 (3): 528–542. (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2021-48-3-528-542.

Введение

Развитие сложных программно-технических систем, таких как системы и сети телекоммуникаций, автоматизированные системы управления, системы защиты информации, компьютерные сети, информационные системы, системы безопасности, информационно-измерительные системы, привело к существенному увеличению их структурной и функциональной сложности. Для систем рассматриваемого класса, получивших в литературе наименование киберфизических (от cyber-physical systems), характерно то, что с течением времени изменяются предъявляемые к ним требования назначения. Таким образом, многофункциональная система, а именно, перечень и содержание выполняемых функций, ее состав и структура перестает соответствовать требованиям назначения, что приводит к снижению пригодности систем к выполнению задач по назначению. Изменение требований назначения, включая условия применения, требует перевода многофункциональной системы в новое состояние и решения задачи выбора наилучшей альтернативы развития [Гришаков, Логинов, 2016]. Высокий уровень влияния изменений требований назначения на пригодность систем обосновывает актуальность анализа изменения их требований назначения.

Проблема анализа изменения требований назначения многофункциональных систем

В качестве объекта исследования рассматриваются реконфигурируемые многофункциональные системы (МФС) класса программно-технических. Объединяющим фактором рассматриваемых систем является возможность выделения в их составе в соответствии с функциональным подходом (методология SOA – Service Oriented Architecture – сервис-ориентированная архитектура) множества функциональных компонентов $S=\{si\}, i=1..n$ [Дементьев и др., 2015].

Функциональный компонент (ФК) – система на инфокоммуникационной основе, выполняющая выделенную функцию сложной системы (например, управление процессом планирования связи или обнаружением и противодействием беспилотным летательным аппаратам). В соответствии с системным подходом каждый ФК включает выделенную функцию, описываемую в терминах инфокоммуникационных услуг (в соответствии с методологией ITSM), техническую систему, предоставляющую услугу и систему управления.

К многофункциональной системе предъявляют систему требований QR , включающих в себя функциональные $QR\phi$ и нефункциональные требования QRc (называемые также системными). В результате изменения внешних условий Z_i под воздействием внешних по отношению к системе факторов Y_i изменяется система требований $QR=QR(t)$. Изменение системы требований QR приводит к несоответствию МФС – задачам по предназначению и следовательно – к снижению уровня пригодности системы K_2 . Процесс изменения требований носит непрерывный характер. Изменения потребностей и формируемой на их основе системы требований определяются характером и интенсивностью.

Основными причинами изменения функциональных требований являются [Дементьев и др., 2015; Jayatilleke, Lai, 2018]:

- внешние условия (требования рынка и регуляторов);
- изменение организации (организационно-штатные, нормативные изменения);
- переосмысление проекта (изменение технологических процессов, границ многофункциональной системы);
- спецификация требований (переосмысление требований и их уточнение, приведение в соответствие с реальным положением дел);
- возможности и ограничения решения (влияние технических и технологических решений).

Результаты анализа показывают, что изменение системы требований [Jayatilleke, Lai, 2018; Dasanayake et al., 2019; Chua, Verner, 2010; McGee, Greer, 2011; Madampe et al., 2020] связано не только с изменением самих требований, что характеризует динамику назначения системы, а также с устранением неточностей описания требований, что относится к области совершенствования процесса управления требованиями. В [Madampe et al., 2020] показано, что наибольший вклад в процесс уточнения требований вносят: сложность, каскадное влияние, размер системы требований, определения, затрачиваемые усилия, приоритеты и взаимоотношение с заказчиком.

Таким образом, проведенный анализ процессов развития МФС показывает необходимость разработки механизма оценивания интенсивности изменения требований назначения.

Анализ известных подходов к управлению изменением требований назначения при развитии многофункциональных программно-технических систем

Управление требованиями является одним из базовых процессов проектирования сложных многофункциональных систем. Изменение требований с течением времени обосновывает выделение подпроцесса управления изменениями требований [Jayatilleke, Lai, 2018]. В литературе [Chua, Verner, 2010; Bokhari, Siddiqui, 2011; Akbar et al., 2020] отмечается необходимость реализации процесса управления требованиями и их изменениями для снижения уровня изменений МФС в процессе ее жизненного цикла. Зрелость процесса управления требованиями может быть повышена с использованием механизмов Capability Maturity Model, Goal Question Metrics, BOOTSTRAP, модель процесса улучшений ИСО 9000 [Bokhari, Siddiqui, 2011]. Предлагаются модели готовности / зрелости процесса управления требованиями [Akbar et al., 2020].

В качестве методов управления требованиями рассматриваются: унифицированный процесс разработки Rational (RUP); метод инструмента управления требованиями DOORS; метод работы с требованиями CORE; метод разработки RAISE и методология нечетких систем (Soft System Methodology) [Кулямин и др., 2015]. В рамках идентификации изменений требований применяют механизмы спецификации (например, с использованием методов Goal Question Metrics (GQM), Resource Description Framework (RDF), GAM (Goal, Argument Metric) and BSc (Balanced Scorecard Framework)) и кластеризации [Jayatilleke et al., 2017; Kassou, Kjiri, 2012]. Ведутся работы по дальнейшему уточнению методов работы с требованиями, в том

числе для специфичных условий применения, например, в [Sanaa et al., 2016] предложено расширение Goal Question Agility Metrics для гибких условий разработки.

Отмечается наличие нескольких источников требований: пользователи, нормативные данные, документация. В зависимости от источника применяют разные способы извлечения требований. Ведутся работы по автоматическому извлечению требований из текстовых документов. Так, к нормативным актам применяют подход на основе Legal Profile for Goal-oriented Requirements Language, что позволяет извлекать требования в формате Хохфедиана [Ghanavati et al., 2014].

В [Jayatilleke et al., 2018] в рамках подпроцесса анализа изменения требований представлено два подхода к анализу влияния изменений. В обоих подходах их недостатком является отсутствие отслеживания конфликтов и взаимозависимостей между изменениями. Для преодоления этих ограничений применяются:

- идентификация зависимостей между изменениями;
- назначения приоритетов через оценку функциональной сложности требований.

Основными метриками системы требований являются: волатильность (изменяемость), отслеживаемость, размер и полнота [Bokhari, Siddiqui, 2011; Costello, Dar-Biau, 1995; Липко, 2014]. Под отслеживаемостью требований понимается возможность установления взаимосвязи между требованиями верхнего и низкого уровней с использованием набора документированных отсылок [Costello, Dar-Biau, 1995; Dowdeswell et al., 2016]. Описание системы требований в соответствии с целеориентированным подходом может быть выполнено с использованием методологий NFR Framework, i*/Tropos, KAOS methodology и Goal-Based Requirements Analysis Method [Feather et al., 1998; Horkoff et al., 2016]. Для моделирования требований назначения могут быть использованы диаграммы системного проектирования (System Design Diagram – SDD) [Jayatilleke et al., 2021]. В [Loucopoulos et al., 2019] рассматривается методология e-CORE к единому моделированию требований и их изменению.

Важным вопросом является дальнейшее использование требований: в процессах разработки и проектирования, тестирования и проверки соответствия, мониторинга текущего состояния. Важно однозначно увязывать требования с функциональными возможностями многофункциональной системы, для чего может использоваться подход TORUS. Он предполагает введение кортежей, называемых сплайсами, которые связывают требования и реализацию в форме функциональных блоков IEC 61499 [Dowdeswell et al., 2016]. В [Кулямин и др., 2015] предлагается механизм FOrmal REquirements Specification and Testing (FOREST) для спецификации требований и построения тестовых наборов на их основе. Рассматриваются вопросы согласования процесса выявления требований и систем мониторинга. Так, в [Feather et al., 1998] интегрируется целеориентированная методология спецификации KAOS и система непрерывного мониторинга событий типа FLEA, чем достигается повышение уровня согласованности системы и требований к ней.

Анализ подходов к организации процесса управления изменением требований показывает с одной стороны важность выявления изменений, а с другой стороны – необходимость решения проблемы анализа изменений. Количественными показателями изменения требований к МФС QR (в соответствии с [Loconsole, Borstler, 2005]) являются:

- N_{RV} – количество тактов изменения требований (number of revision);
- N_U – количество изменений требования (number of requirements change);
- N_{U+} – количество обработанных изменений требований (number of moderated changes).

Показатель волатильности требований (в соответствии с [Ebad, 2017]) показывает отношение количества изменений к размеру системы требований:

$$v = \frac{N_U}{N_{qr}}$$

Показатель доли изменения требований (в соответствии с [Jayatilleke et al., 2021]) показывает долю объектов (требований и связей между ними), которые были изменены.

$$IC = \frac{N_U + N_{UL}}{N_{qr} + N_L}, \text{ где } N_{UL} - \text{ количество изменений взаимосвязей.}$$

Показатель веса изменений требований (в соответствии с [Jayatilleke et al., 2021]) показывает оценочную важность влияния изменения требований (применяется в сравнительном анализе изменений):

$$IW = \sum_{i=1}^3 \alpha_i N_{U,i} \times N_{U'}, \text{ где } N_{U'} - \text{ количество изменений требований через изменение}$$

взаимосвязей, α_i – влияние операции изменения требования.

При отсутствии формализации системы требований QR в форме (3), (4) используются косвенные показатели изменения требований. Например, в соответствии с [Loconsole, 2008] изменение требований можно оценивать по количеству слов:

$$\gamma_w = \frac{N_{cw}}{N_w},$$

где N_{cw} – количество изменений слов в документе с требованиями; N_w – общее количество слов с требованиями. При этом вместо числа слов могут использоваться показатели: количества строк документа, абзацев, правил и т. д.

Для повышения точности косвенных оценок изменения требований применяются регрессионные модели [Loconsole, 2008]:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \alpha_i \gamma_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{N_{ci}}{N_i}, \text{ где } n - \text{ количество независимых переменных, } \alpha_i - \text{ значимость}$$

i -го показателя волатильности.

Множественные изменения системы требования оцениваются суммарным коэффициентом изменений [Loconsole, 2008]:

$$v = \sum_{i=1}^n v_i,$$

где n – количество тактов изменений требований, v_i – коэффициент изменения требований на i -м такте изменения.

Коэффициент уровня влияния волатильности требований на j -ю функцию системы (в соответствии с [Anang et al., 2016]) показывает степень влияния изменения требований на компоненты МФС:

$$\kappa_j = \sum_{i=1}^n v_i k_{ij},$$

где v_i – коэффициент волатильности требования, k_{ij} – отношения взаимодействия между требованиями и функцией (может быть задана весовой функцией).

Показатели изменения системы требований к МФС позволяют получить при ее анализе только частные точечные оценки, однако оценка динамики изменений со временем в известной литературе не рассмотрена.

Модель изменения требований назначения многофункциональной системы сервис-ориентированного класса

Система требований QR к МФС, в соответствии с целеориентированным подходом [Feather et al., 1998; Horkoff et al., 2016], в заданный момент времени может быть представлена иерархией над частными требованиями (рис. 1):

$$QR = \langle CR \cup \{qr\}, E \rangle, \quad (1)$$

где CR – набор комплексных требований назначения; $\{qr\}$ – множество частных функциональных требований назначения; E – отношения между требованиями. При этом: $E = (CR \cup \{qr\}) \times \{qr\} = \{e\}$, e – отношения между двумя требованиями, множество листьев совпадает с $\{qr\}$; $N_{qr} = |\{qr\}|$ – количество требований назначения.

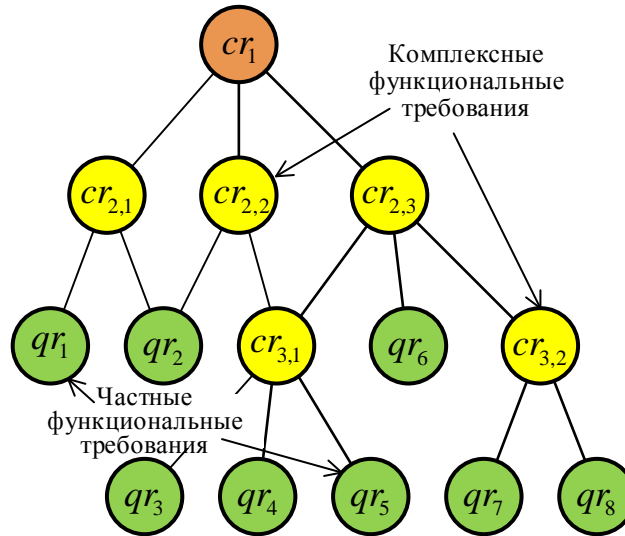


Рис. 1. Иерархия требований (пример структуры)
 Fig. 1. Requirements Hierarchy (An example of Structure)

В соответствии с [Ghanavati et al., 2014; Сулейманова, Яковлев, 2010] требование назначения qr задается кортежем:

$$qr = \langle Cnd, Sbj, Act, Obj \rangle, \quad (2)$$

где Cnd – условия реализации требования; Sbj – субъект; Act – действие с объектом; Obj – объект, над которым выполняется действие.

Пример:

```
qr = < Cnd = <при нажатии кнопки «печатать»>;
      Sbj = <оператор>;
      Act = <печатает>;
      Obj = <документ> >.
```

Оценка выполнения МФС системы требований QR может быть непосредственно определена из выражения (1). Однако с практической точки зрения – для обеспечения полного покрытия тестами (методиками проверки) всех требований целесообразно явно устанавливать проверяемый критерий Φ . В общем случае критерий оценки выполнения требований Φ устанавливает оцениваемый показатель ind , шкалу $scale$ и правило оценивания $rule$:

$$\Phi = \langle ind, scale, rule \rangle. \quad (3)$$

Следовательно, требование назначения может быть задано в следующем виде:

$$qr = \langle \langle Cnd, Sbj, Act, Obj \rangle, \Phi \rangle. \quad (4)$$

В соответствии с функциональным подходом [Jayatilleke, Lai, 2018] система требований может быть задана на основе функциональной модели системы. В соответствии с ней функциональное требование может быть связано по входу и выходу с другими функциональными требованиями:

$$QR_F = \langle \{qr\}, L \rangle, \quad (5)$$

где L – матрица смежности функциональных требований $\{qr\}$, $L = \{link\} = (\{qs\} \times \{qs\})$, $link$ – связь по входам / выходам требований.

В соответствии с [Jayatilleke et al., 2018; Loucoroulos et al., 2019] изменение требований QR к МФС реализуется путем следующих базовых операций:

$$U_{QR} = \langle Create, Delete, Modify \rangle, \quad (6)$$

– операция «создать требование» – $Create(qr_{N_{qr}+1})$ – добавляет новое требование к системе требований назначения;

– операция «удалить требование» – $Delete(qr_i), i \leq N_{qr}$ – удаляет существующее требование из системы требований;

– операция «изменить требование» – $Modify(qr_i), i \leq N_{qr}$ – изменяет существующее требование назначения МФС.

В соответствии с [Jayatilleke et al., 2018] наличие взаимосвязей по входам и выходам между требованиями приводит к необходимости добавления, удаления и модификации связей между требованиями. В общем случае это приводит к 8 типам операций изменения требований. За один цикл изменения реализуется несколько управляющих воздействий преобразования системы требований $U = \{u\}$, переводящих систему требований в новое состояние (рис. 2):

$$QR_i \xrightarrow{U_i} QR_{i+1}. \quad (7)$$

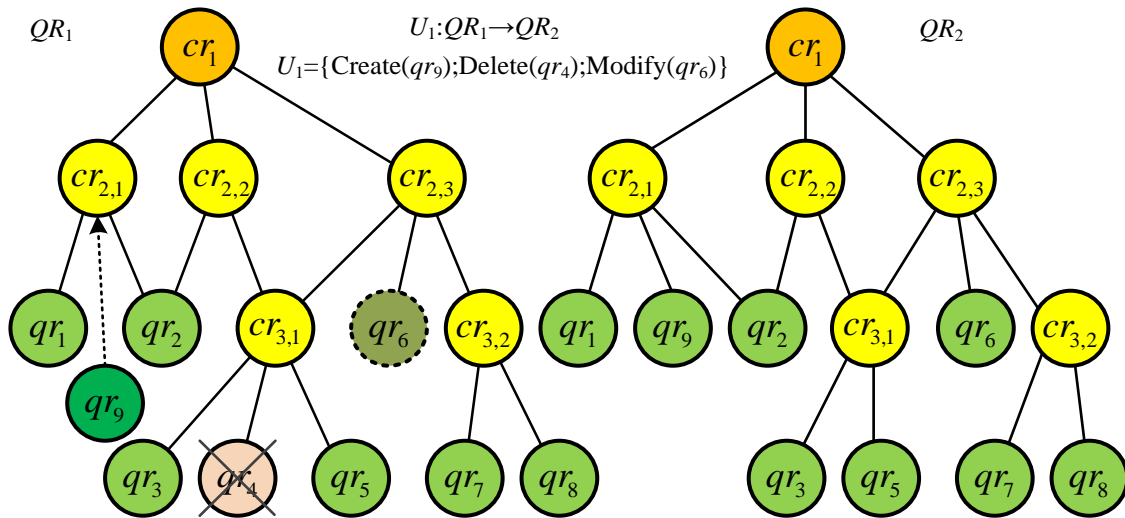


Рис. 2. Преобразование системы требований
 Fig. 2. An Example of Requirements Change by Transformation U_1

Обоснование применения показателя динамики изменения требований назначения при анализе многофункциональных систем

Изменение требований назначения МФС с течением времени $S=S(t)$ требует наличия инструментов системного анализа динамики такого изменения. В качестве таковых могут рассматриваться:

– показатель интенсивности изменения функциональности системы – величина изменения возможностей МФС в единицу времени;

– показатель интенсивности изменения требований назначения – величина изменения назначения МФС в единицу времени.

Для анализа изменений условий применения системы и оценки объемов ресурсов на ее модернизацию и сопровождение в работе рассматривается показатель «динамики изменения требований назначения»:

$$v = \frac{\Delta QR}{\Delta T}, \quad (8)$$

где ΔQR – совокупные изменения системы требований за промежуток времени ΔT . Совокупные изменения системы требований за промежуток времени ΔT могут быть определены как сумма относительного изменения требований по всем тактам изменения:

$$\Delta QR = v = \sum_{i=1}^n v_i. \quad (9)$$

В качестве промежутка времени ΔT анализа изменения МФС может рассматриваться плановый период управления реконфигурацией. На практике в качестве такого может использоваться год, квартал, месяц.

Вопрос изменения требований назначения требует некоторого уточнения в связи с неравноценным влиянием требований, особенно находящихся на различных уровнях иерархии, на выполнение задач системы. Второй момент связан с неравноценным влиянием разных операций изменения требований. Его решение предполагает использование весовых коэффициентов [Jayatilleke et al., 2021; Anang et al., 2016].

Пример расчета показателя интенсивности изменения требований назначения для планового периода в 1 мес. представлен в таблице 1 (пример приведен для сервиса предоставления мультисервисных услуг связи – за три месяца выполнено 4 такта изменения системы требований).

Таблица 1
Table 1

Пример изменения требований назначения мультисервисной сети связи
 An Example of MultiService Network Requirements Change

показатель	U_1	U_2	U_3	U_4
N_U	5	4	3	6
N_{qr}	24	26	26	27
$v = N_U / N_{qr}$	$v_1 = 5/24 = 0,208$	$v_2 = 4/26 = 0,154$	$v_3 = 3/26 = 0,115$	$v_4 = 6/27 = 0,222$
Расчет:	$v = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 = 0,699$		$v = \frac{\Delta QR}{\Delta T} = \frac{0,699}{3} = 0,233$	

В работе для учета неравномерного влияния различных требований назначения qr_i предлагается выполнять оценку динамики требований назначения с использованием квалиметрического подхода. В рамках подхода предполагается, что для МФС задано дерево показателей качества многофункциональной системы [Азгальдов, Райхман, 1972]. Оно позволяет рассчитывать оценки пригодности МФС по назначению или ее качества. Дерево показателей качества Q представляет собой граф, для узлов которого заданы весовые коэффициенты важности:

$$Q = \langle \{q\}, I \rangle, \quad (10)$$

где $\{q\}$ – множество показателей качества функциональных свойств объекта оценивания, I – отношения включения между показателями.

Каждый показатель качества задается кортежем вида:

$$q = \langle q^{бр}, q^{эп} \rangle, \quad (11)$$

где $q^{бр}$ – браковочное значение; $q^{эт}$ – эталонное (наилучшее) значение показателя функционального свойства объекта оценивания. Значение показателя качества переводится в относительное путем расчета на основе значения абсолютного показателя качества q_i :

$$k_i = \frac{q_i - q^{бр}}{q^{эт} - q^{бр}}. \quad (12)$$

Для всех узлов дерева задается абсолютный вес показателя качества, на основе которого рассчитывается нормированный вес α_i . Сумма нормированных весов показателей на каждом уровне дерева равна единице (рис. 3).

Показатель качества (пригодности системы по назначению) рассчитывается с использованием взвешенной аддитивной свертки по всем листьям дерева качества:

$$K = \sum_{i, q_i \in Q_L} \alpha_i k_i, \quad (13)$$

где Q_L – множество показателей качества, являющихся листьями дерева Q .

Основная идея предлагаемого подхода к оценке динамики изменений требований назначения v заключается в рассмотрении новой иерархии требований QR_{i+1} как эталонного объекта $Q^{эт}$. Исходная система требований назначения QR_i оценивается по сравнению с эталонным объектом (13) и вычисляются отличия в требованиях:

$$v = 1 - K(Q_{i+1}, QR_{i+1}). \quad (14)$$

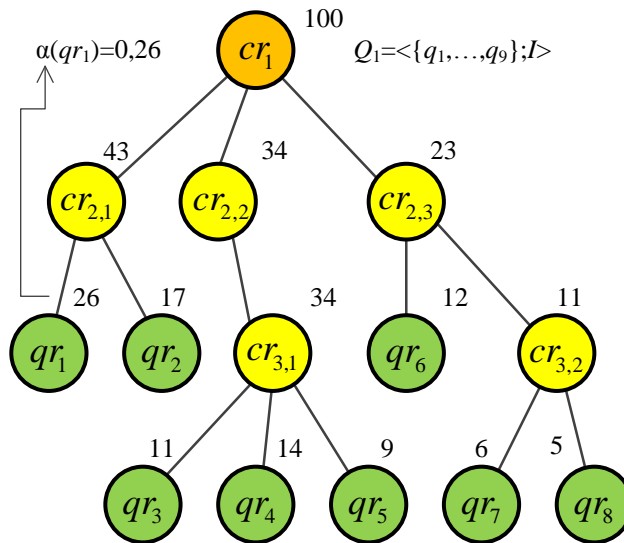


Рис. 3. Пример дерева показателей качества МФС
 Fig. 3. An Example of Quality Tree for Multifunctional System

Однако изменение системы требований приводит к необходимости уточнения дерева свойств: $Q_{i+1} = A(Q_i, QR_{i+1})$, где A – механизм преобразования дерева показателей качества МФС. Изменение дерева Q привязано к элементарным операциям изменения требований:

- при создании требования – добавляется новый узел в дерево Q ; относительная важность нового узла определяется на основе метода вставки в существующее ранжирование узлов;

- при удалении требования – удаляется существующий узел и выполняется перерасчет весов оставшихся узлов;

- при изменении требования – изменяется эталонное значение показателя функционального свойства $q^{эт}$ и при необходимости перерасчет весов узлов.

Расчет значения показателя динамики требований назначения выполняется по всем изменившимся узлам (пример расчета – на рисунке 4):

$$QR_i, Q_i: QR_i \xrightarrow{U_i} QR_{i+1}; QR_{i+1} \Rightarrow Q_{i+1}: Q_{i+1} = A(Q_i, QR_{i+1});$$

$$v = 1 - K(Q_{i+1}, QR_{i+1}); v = \frac{\sum v}{T} = \frac{\sum (1 - K)}{T}. \quad (15)$$

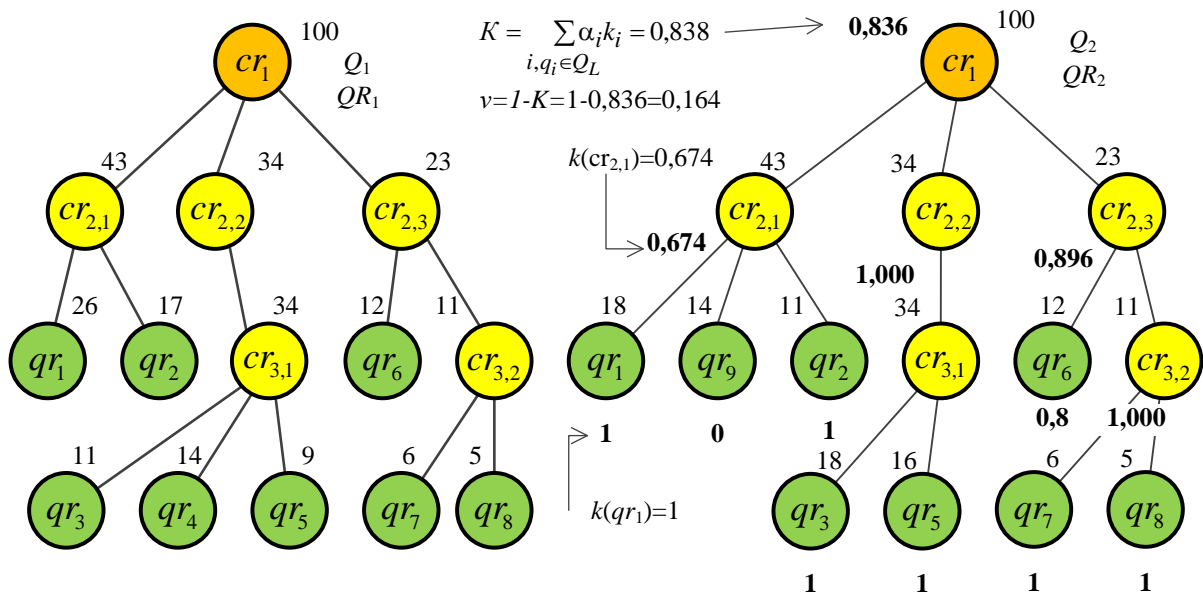


Рис. 4. Пример расчета показателя динамики изменения требований
 Fig. 4. An Example of Estimate the Dynamics of Requirements Change

Экспериментальная оценка показателя динамики изменения требований при анализе многофункциональных систем и обсуждение результатов

Представителями класса многофункциональных программно-аппаратных систем с изменяемыми требованиями могут выступать:

- автоматизированные системы управления предприятием;
- многофункциональные системы связи;
- инфокоммуникационные инфраструктуры организаций;
- интегрированные системы безопасности и т. д.

Для систем рассматриваемого класса характерно то, что с течением времени перечень и содержание выполняемых функций, ее состав и структура перестает соответствовать требованиям назначения из-за их изменения [Логинов, 2017].

В рамках цикла управления развитием сложных систем возникает необходимость оценивания потребных ресурсов всех типов. Непосредственное решение задачи требует разработки проекта модернизации либо технико-экономического обоснования по всем изменяемым функциям. Трудоемкость выполнения таких работ традиционными методами в соответствии с нормативной базой требует значительных ресурсов и предполагает цикличность (1 раз в квартал или чаще всего 1 раз в год).

Использование показателя интенсивности относительного изменения требований позволяет на основе имеющихся данных о ресурсоемкости создания системы в целом и отдельных циклов реконфигурации получить приближенные оценки ресурсоемкости реконфигурации, которые можно закладывать в процесс планирования. Эффект обеспечивается тем, что позволяет получать сравнительную оценку динамики требований назначения различных систем и соответственно определять интервалы оценки объема

необходимых ресурсов. Общая схема использования показателя представлена на рисунке 5 и предполагает решение прямой (оценку потребности в ресурсах) и обратной (оценку показателей пригодности при лимите ресурсов) задачи.

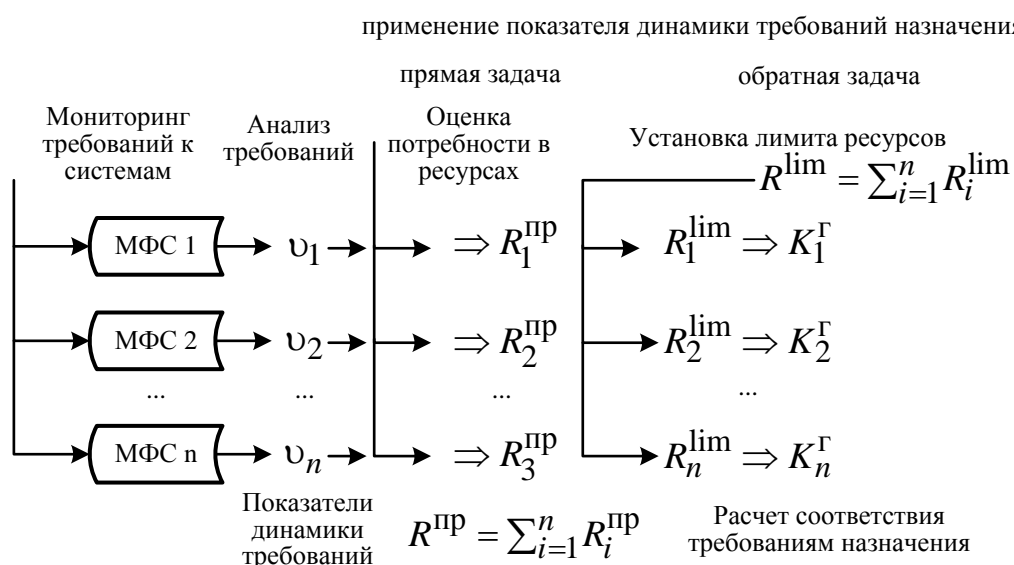


Рис. 5. Применение показателя динамики требований для решения задачи анализа многофункциональных систем

Fig. 5. The Using of the Metric of the Dynamics of Requirements Change for multifunctional systems

Анализ отдельных классов многофункциональных систем показал, что более высокий уровень программной составляющей приводит к более высоким уровням изменения систем требований. Для инфокоммуникационной инфраструктуры крупной организации коэффициент динамики требования составляет $\nu = 0,08 - 0,17$. Для интегрированных интеллектуальных систем безопасности – $\nu = 0,02 - 0,12$. Для сложных программных систем (например, порталов организаций) имеет наиболее высокое значение: $\nu = 0,10 - 0,35$. Наибольший коэффициент динамики имеет значение для временных объединений (в рамках цепочек поставок или расширенных предприятий). Для них значение показателя имеет смысл рассматривать применительно к кварталу.

Вторым направлением применения предлагаемого подхода является анализ изменений нормативных актов. Каждый технический нормативный документ согласно подходу преобразуется в систему требований. Эти новые требования рассматриваются с точки зрения влияния функционирования системы. Это позволяет сделать оценку необходимых ресурсов на соответствие нормативному документу. Примером такого случая является ввод действия нового нормативного документа, например, устанавливающего дополнительные требования с точки зрения физической безопасности.

Заключение

В работе приведена модель системы требований назначения в виде изменяемой иерархии функциональных компонентов, что позволяет учитывать как динамику их изменения, так и взаимосвязи между требованиями. Введен показатель динамики изменения требований назначения многофункциональных систем как отношение суммы относительной величины изменения иерархии требований к периоду изменения требований. Предложен подход к расчету показателя динамики изменения требований на основе квалиметрического подхода, позволяющего учитывать изменения отдельных требований с учетом их важности на основе модели оценки качества системы. Направлением применения данного показателя является косвенная оценка показателей изменения условий применения многофункциональных

реконфигурируемых систем, включая возможности планирования ресурсов на развитие сложных систем, выполняемая при их системном анализе.

Список литературы

1. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. 1972. О Квалиметрии. Издательство стандартов. 172 с.
2. Гришаков В.Г., Логинов И.В. 2016. Управление динамической реконфигурацией ИТ-инфраструктуры в меняющихся условиях. Информационные системы и технологии, 3(95): 13–22.
3. Дементьев Д.Н., Гришаков В.Г., Логинов И.В., Христенко Д.В. 2015. Сервис-ориентированная модель телекоммуникационной системы. Инфокоммуникационные технологии, 13(1): 51–58.
4. Кулямин В.В., Пакулин Н.В., Петренко О.Л., Сортов А.А., Хорошилов А.В. 2013. Формализация требований на практике. ИСП РАН, препринт 13. 70 с.
5. Липко Ю.Ю. 2014. Алгоритм формализации требований при разработке информационных систем. Известия ЮФУ. Технические науки. 6(155): 153–158.
6. Логинов И.В. 2017. Оптимизация портфеля ИТ-услуг путем многопараметрической оценки пригодности на основе адаптивных технологических моделей. Системы управления и информационные технологии. 2 (68): 43–48.
7. Сулейманова А.М., Яковлев Н.Н. 2010. Семантическое и многоаспектное моделирование в управлении требованиями к математическому и программному обеспечению. Вестник Башкирского университета. 15(3): 553–556.
8. Akbar M. A., Mahmood S., Huang Zh., Khan A.A., Shameem M. 2020. Readiness model for requirements change management in global software development. Journal of Software: Evolution and Process. 32:e2264. <https://doi.org/10.1002/smr.2264>.
9. Anang Yu, Takahashi M., Watanabe Y. 2016. A Method for Software Requirement Volatility Analysis Using QFD. Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly CSIMQ, Issue8, September/October2016, Pages 1–14. Published online by RTU Press, <https://csimq-journals.rtu.lvhttps://doi.org/10.7250/csimq.2016-8.01ISSN: 2255-9922> online.
10. Bokhari M.U., Siddiqui S.T. 2011. Metrics for requirements engineering and automated requirements tools. In Proceedings of the 5th National Conference on Computing for Nation Development (INDIACOM). New Delhi: Bharati Vidyapeeth's Institute of Computer Applications and Management. March 10–11. 13 p.
11. Chua. B., Verner J. 2010. Examining Requirements Change Rework Effort: A Study. International Journal of Software Engineering & Applications. 1(3). p. 48. doi:10.5121/ijsea.2010.1304.
12. Costello R.J., Dar-Biau L. 1995. Metrics for requirements engineering. Journal of Systems and Software, Vol 29, Issue 1, pp. 39-63. [https://doi.org/10.1016/0164-1212\(94\)00127-9](https://doi.org/10.1016/0164-1212(94)00127-9).
13. Dasanayake S., Aaramaa S., Markkula J., Oivo M. 2019. Impact of requirements volatility on software architecture: How do software teams keep up with ever-changing requirements? Journal of Software: Evolution and Process. 31:e2160. <https://doi.org/10.1002/smr.2160>.
14. Dowdeswell B., Sinha R., Haemmerle E. 2016. TORUS: Tracing Complex Requirements for Large Cyber-Physical Systems. 2016 21st International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS), Dubai, United Arab Emirates, pp. 23-32, doi: 10.1109/ICECCS.2016.013.
15. Ebad Sh.A. 2017. Towards Measuring Software Requirements Volatility: A Retrospective Analysis. Malaysian Journal of Computer Science. 30(2): 99-116. June 2017. ISSN 0127-9084. Available at: <<https://ejournal.um.edu.my/index.php/MJCS/article/view/7033>>. Date accessed: 04 May 2021. doi: <https://doi.org/10.22452/mjcs.vol30no2.3>.
16. Feather M.S., Fickas S., Lamsweerde A.V., Ponsard C. 1998. Reconciling system requirements and runtime behavior. Proceedings Ninth International Workshop on Software Specification and Design, pp. 50-59. doi: 10.1109/IWSSD.1998.667919.
17. Ghanavati S., Amyot D., Rifaut A. 2014. Legal goal-oriented requirement language (legal GRL) for modeling regulations. In Proceedings of the 6th International Workshop on Modeling in Software Engineering (MiSE 2014). Association for Computing Machinery. New York, NY, USA, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1145/2593770.2593780>.
18. Horkoff J., Aydemir F.B., Cardoso E., Li T., Maté A., Paja E., Salnitri M., Mylopoulos J., Giorgini P. 2016. Goal-Oriented Requirements Engineering: A Systematic Literature Map. 2016 IEEE 24th International Requirements Engineering Conference (RE), pp. 106–115, doi: 10.1109/RE.2016.41.



19. Jayatilleke S., Lai R. 2021. A method of assessing rework for implementing software requirements changes. *Computer Science and Information Systems*, 18(1): 129–154. <https://doi.org/10.2298/CSIS200221032J>.
20. Jayatilleke Sh., Lai R. 2018. A Systematic Review of Requirements Change Management. *Information and Software Technology*. 93: 163–185. ISSN 0950-5849. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.09.004>.
21. Jayatilleke Sh., Lai R., Reed K. 2017. Managing software requirements changes through change specification and classification. *Computer Science and Information Systems*, 15(2): 321–346. <https://doi.org/10.2298/CSIS161130041J>.
22. Jayatilleke S., Lai R., Reed K. 2018. A method of requirements change analysis. *Requirements Eng.* Vol 23, pp. 493–508. <https://doi.org/10.1007/s00766-017-0277-7>.
23. Kassou M., Kjiri L. 2012. A Goal Question Metric Approach for Evaluating Security in a Service Oriented Architecture Context. *International Journal of Computer Science Issues*, Vol 9, Issue 4, No 1, pp. 238-249. ISSN (Online): 1694-0814. <https://www.ijcsi.org/papers/IJCSI-9-4-1-238-249.pdf>.
24. Loconsole A. 2008. A Correlational Study on Four Size Measures as Predictors of Requirements Volatility. 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE). 26–27 June 2008. Pp. 1-5. DOI: 10.14236/ewic/EASE2008.18.
25. Loconsole A., Borstler J. An industrial case study on requirements volatility measures. 2005. 12th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC'05), Taipei, Taiwan, pp. 8. doi: 10.1109/APSEC.2005.38.
26. Loucopoulos P., Kavakli E., Chechina N. 2019. Requirements Engineering for Cyber Physical Production Systems. *International Conference on Advanced Information Systems Engineering*. CAiSE 2019. pp. 276-291, Lecture Notes in Computer Science, vol 11483. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21290-2_18.
27. Madampe K., Hoda R., Grundy J. 2020. A Multi-dimensional Study of Requirements Changes in Agile Software Development Projects. arXiv preprint arXiv:2012, 2020-12-07, doi: arxiv-2012.03423.
28. McGee S., Greer D. Software requirements change taxonomy: Evaluation by case study. 2011. 2011 IEEE 19th International Requirements Engineering Conference, Trento, Italy, pp. 25–34, doi:10.1109/RE.2011.6051641.
29. Sanaa H., Afifi W. A., Ramadan D. N. 2016. The Goal Questions Metrics for Agile Business Intelligence. *Egyptian Computer Science Journal*, Vol. 40, no 2, May 2016, pp. 24-42. ISSN-1110-2586. <http://ecsjournal.org/Archive/Volume40/Issue2/3.pdf>.

References

1. Azgal'dov G.G., Rajhman E.P. 1972. O Kvalimetrii [About Qualimetry]. Izdatel'stvo standartov. 172 p. (In Russian).
2. Grishakov V.G., Loginov I.V. 2016. The management of IT-infrastructure dynamic reconfiguration in the changed conditions. *Information Systems and Technologies*, 3(95): 13–22 (In Russian).
3. Dementiev D.N., Grishakov V.G., Loginov I.V., Hristenko D.V. 2015. Service oriented model of telecommunication system. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 13(1): 51–58 (In Russian).
4. Kuliamin V.V., Pakulin N.V., Petrenko O.L., Sortov A.A., Horoshilov A.V. 2013. Formalizaciya trebovanij na praktike [Requirements formalization on the practice]. ISP RAS, 2013, preprint, 13. 70 p. (In Russian).
5. Lipko Yu.Yu. 2014. The algorithm of formalization of requirements when developing information systems. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 6(155): 153–158 (In Russian).
6. Loginov I.V. 2017. Optimization of it-service portfolio based on multiparametric estimation of applicability with adaptive technological model. *Management systems and information technologies*. 2(68): 43–48.
7. Sulejmanova A.M., YAKovlev N.N. 2010. Semanticheskoe i mnogoaspektnoe modelirovanie v upravlenii trebovaniyami k matematicheskomu i programmnomu obespecheniyu [Semantic and multidimensional modeling in the management of mathematical and software requirements.]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 15(3): 553–556 (In Russian).
8. Akbar M. A., Mahmood S., Huang Zh., Khan A.A., Shameem M. 2020. Readiness model for requirements change management in global software development. *Journal of Software: Evolution and Process*. 32:e2264. <https://doi.org/10.1002/smr.2264>.

9. Anang Yu, Takahashi M., Watanabe Y. 2016. A Method for Software Requirement Volatility Analysis Using QFD. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly CSIMQ*, Issue8, September/October2016, Pages 1–14. Published online by RTU Press, <https://csimq-journals.rtu.lvhttps://doi.org/10.7250/csimq.2016-8.01ISSN: 2255-9922> online.
10. Bokhari M.U., Siddiqui S.T. 2011. Metrics for requirements engineering and automated requirements tools. In *Proceedings of the 5th National Conference on Computing for Nation Development (INDIACOM)*. New Delhi: Bharati Vidyapeeth's Institute of Computer Applications and Management. March 10–11. 13 p.
11. Chua. B., Verner J. 2010. Examining Requirements Change Rework Effort: A Study. *International Journal of Software Engineering & Applications*. 1(3), p. 48. doi:10.5121/ijsea.2010.1304.
12. Costello R.J., Dar-Biau L. 1995. Metrics for requirements engineering. *Journal of Systems and Software*, Vol 29, Issue 1, pp. 39-63. [https://doi.org/10.1016/0164-1212\(94\)00127-9](https://doi.org/10.1016/0164-1212(94)00127-9).
13. Dasanayake S., Aaramaa S., Markkula J., Oivo M. 2019. Impact of requirements volatility on software architecture: How do software teams keep up with ever-changing requirements? *Journal of Software: Evolution and Process*. 31:e2160. <https://doi.org/10.1002/smr.2160>.
14. Dowdeswell B., Sinha R., Haemmerle E. 2016. TORUS: Tracing Complex Requirements for Large Cyber-Physical Systems. 2016 21st International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS), Dubai, United Arab Emirates, pp. 23-32, doi: 10.1109/ICECCS.2016.013.
15. Ebad Sh.A. 2017. Towards Measuring Software Requirements Volatility: A Retrospective Analysis. *Malaysian Journal of Computer Science*. 30(2): 99-116. June 2017. ISSN 0127-9084. Available at: <<https://ejournal.um.edu.my/index.php/MJCS/article/view/7033>>. Date accessed: 04 May 2021. doi: <https://doi.org/10.22452/mjcs.vol30no2.3>.
16. Feather M.S., Fickas S., Lamsweerde A.V., Ponsard C. 1998. Reconciling system requirements and runtime behavior. *Proceedings Ninth International Workshop on Software Specification and Design*, pp. 50-59. doi: 10.1109/IWSSD.1998.667919.
17. Ghanavati S., Amyot D., Rifaut A. 2014. Legal goal-oriented requirement language (legal GRL) for modeling regulations. In *Proceedings of the 6th International Workshop on Modeling in Software Engineering (MiSE 2014)*. Association for Computing Machinery. New York, NY, USA, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1145/2593770.2593780>.
18. Horkoff J., Aydemir F.B., Cardoso E., Li T., Maté A., Paja E., Salnitri M., Mylopoulos J., Giorgini P. 2016. Goal-Oriented Requirements Engineering: A Systematic Literature Map. 2016 IEEE 24th International Requirements Engineering Conference (RE), pp. 106-115, doi: 10.1109/RE.2016.41.
19. Jayatilleke S., Lai R. 2021. A method of assessing rework for implementing software requirements changes. *Computer Science and Information Systems*, 18(1): 129–154. <https://doi.org/10.2298/CSIS200221032J>.
20. Jayatilleke Sh., Lai R. 2018. A Systematic Review of Requirements Change Management. *Information and Software Technology*. Vol 93. Pp. 163–185. ISSN 0950-5849. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.09.004>.
21. Jayatilleke Sh., Lai R., Reed K. 2017. Managing software requirements changes through change specification and classification. *Computer Science and Information Systems*, 15(2): 321–346. <https://doi.org/10.2298/CSIS161130041J>.
22. Jayatilleke S., Lai R., Reed K. 2018. A method of requirements change analysis. *Requirements Eng.* Vol 23, pp. 493–508. <https://doi.org/10.1007/s00766-017-0277-7>.
23. Kassou M., Kjiri L. 2012. A Goal Question Metric Approach for Evaluating Security in a Service Oriented Architecture Context. *International Journal of Computer Science Issues*, Vol 9, Issue 4, No 1, pp. 238-249. ISSN (Online): 1694-0814. <https://www.ijcsi.org/papers/IJCSI-9-4-1-238-249.pdf>.
24. Loconsole A. 2008. A Correlational Study on Four Size Measures as Predictors of Requirements Volatility. 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE). 26–27 June 2008. Pp. 1-5. DOI: 10.14236/ewic/EASE2008.18.
25. Loconsole A., Borstler J. An industrial case study on requirements volatility measures. 2005. 12th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC'05), Taipei, Taiwan, p. 8. doi: 10.1109/APSEC.2005.38.
26. Loucopoulos P., Kavakli E., Chechina N. 2019. Requirements Engineering for Cyber Physical Production Systems. *International Conference on Advanced Information Systems Engineering*. CAiSE 2019. pp. 276-291, *Lecture Notes in Computer Science*, vol 11483. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21290-2_18.



27. Madampe K., Hoda R., Grundy J. 2020. A Multi-dimensional Study of Requirements Changes in Agile Software Development Projects. arXiv preprint arXiv:2012, 2020-12-07, doi: arxiv-2012.03423.

28. McGee S., Greer D. Software requirements change taxonomy: Evaluation by case study. 2011. 2011 IEEE 19th International Requirements Engineering Conference, Trento, Italy, pp. 25–34, doi:10.1109/RE.2011.6051641.

29. Sanaa H., Afifi W. A., Ramadan D. N. 2016. The Goal Questions Metrics for Agile Business Intelligence. Egyptian Computer Science Journal, Vol. 40, no 2, May 2016, pp. 24–42. ISSN-1110-2586. <http://ecsjournal.org/Archive/Volume40/Issue2/3.pdf>.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Логинов Илья Валентинович, кандидат технических наук, научный сотрудник, Академия ФСО России, г. Орел, Россия

Фролов Владимир Анатольевич, кандидат социологических наук, научный сотрудник, Академия ФСО России, г. Орел, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Илья V. Loginov, Candidate of Technical Sciences, researcher, The Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel, Russia

Vladimir A. Frolov, Candidate of Sociological Sciences, researcher, The Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel, Russia