

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-681-690

УДК 004:658.011.56

Алгоритм генерации проектных решений для управления данными и проектно-производственными процедурами на этапах жизненного цикла электронного изделия

Юлия Валерьевна Донецкая 

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
donetskaya_julia@mail.ru , <https://orcid.org/0000-0001-5293-5025>

Аннотация

Предмет исследования. Интеграция автоматизированных систем на предприятиях обеспечивает информационную поддержку этапов жизненного цикла изделия и электронное взаимодействие между сотрудниками в процессе выполнения работ. При выполнении проектно-производственных процедур сотрудники предприятий решают различные проектные задачи. Задачи связаны с анализом большого объема информации об изделии, представляемой в виде онтологии. Для решения таких задач требуется разработка алгоритма для извлечения информации из онтологии на основе заданных требований. **Метод.** Разработанный алгоритм состоит из пяти этапов. На первом этапе формируется пространство поиска проектных решений. Далее для каждого варианта проектного решения рассчитаны значения целевой функции и выбрано лучшее проектное решение (выполняется условие минимизации значения целевой функции). Третий этап связан с выбором проектных решений, близких к найденному лучшему решению (определяется по вычисляемому расстоянию Хэмминга). Следующие этапы характеризуются анализом элементов множества вариантов проектных решений и формированием искомого проектного решения. **Основные результаты.** Предложены последовательности действий, выполняемые на этапах алгоритма генерации проектных решений. **Практическая значимость.** Алгоритм может быть реализован на предприятиях для обеспечения процедуры решения проектных задач, что позволит разработать сигнатуры и семантики унифицированных сервисов для применения цифрового паспорта.

Ключевые слова

алгоритм, цифровой паспорт, проектное решение, онтология

Ссылка для цитирования: Донецкая Ю.В. Алгоритм генерации проектных решений для управления данными и проектно-производственными процедурами на этапах жизненного цикла электронного изделия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 4. С. 681–690. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-681-690

An algorithm for generating design solutions for data and design-production procedures management at the stages of the lifecycle of an electronic product

Julia V. Donetskaya 

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
donetskaya_julia@mail.ru , <https://orcid.org/0000-0001-5293-5025>

Abstract

The integration of automated systems at enterprises provides information support for the stages of the product life cycle and electronic interaction between employees in the process of performing work. This means that performing design and production procedures employees of enterprises solve various design problems. The tasks are related to the analysis of a large amount of information about the product presented in the form of ontology. This requires the development of an algorithm to extract information from the ontology based on given requirements. The developed algorithm consists of several stages. At the first stage, a search space for design solutions is formed. At the second stage, for each variant of the design solution the values of the objective function are calculated, and the best design solution is selected. The best solution is the one for which the condition of minimizing the value of the objective function is satisfied. The third stage

© Донецкая Ю.В., 2022

is associated with the choice of design solutions that are close to the found best solution. The best solution is determined by the computed Hamming distance. The fourth and fifth stages are characterized by the analysis of the elements of the set of options for design solutions and the formation of the desired design solution Sequences of actions performed at the stages of the algorithm for generating design solutions are proposed. The proposed algorithm can be implemented at enterprises to provide a procedure for solving design problems. The presented algorithm allows the development of signatures and semantics of unified services for the use of a digital passport.

Keywords

algorithm, digital passport, design solution, ontology

For citation: Donetskaya Ju.V. An algorithm for generating design solutions for data and design-production procedures management at the stages of the lifecycle of an electronic product. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 681–690 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-681-690

Введение

Задача создания и использования цифрового паспорта электронного изделия на предприятиях обусловлена двумя причинами. Первая причина заключается в организации электронного взаимодействия исполнителей договоров с заказчиками вне зависимости от того, в каких организациях они работают и какие системы используют. Вторая связана с автоматизацией генерации проектных решений для управления данными об изделии и проектно-производственными процедурами [1, 2].

Обе причины означают, что цифровые паспорта должны содержать данные и знания об изделиях и формирующих их проектно-производственных процедурах, выполняемых на этапах жизненного цикла. Для этого на предприятиях: внедряют системы, реализующие управление ресурсами предприятия, данными и знаниями об изделии, производством и качеством продукции, или создают специализированные базы данных и знаний; разрабатывают механизмы интеграции и способы автоматизации формирования данных, определяющие содержание технической документации.

Рассмотрим научные работы, в которых нашли подтверждение данные процессы.

В работе [3] рассмотрена процедура автоматизации формирования инструкций по использованию устройств сигнализации, централизации и блокировки. Для процесса автоматизации разработаны одноименный программный модуль и база данных. Программный модуль позволяет обрабатывать перечни шаблонов документа, заполняемых обязательных и не обязательных полей, а также общий перечень разрабатываемых разделов инструкций. База данных содержит планы станций железной дороги, включающие информацию о: светофорах, стрелках, переездах, рельсовых цепях, роде тока и используемой частоте, а также расположении и принципе действия устройств.

Благодаря тому, что шаблоны регламентированы требованиями отраслевого формата технической документации, местоположение полей и разделов однозначно известны. Это позволяет разработчику в интерактивном режиме формировать или выбирать требуемый шаблон, после чего приступить к его заполнению. Причем вариант шаблона соответствует виду эксплуатируемого устройства и содержит только те перечни разделов инструкции, которые должны быть сформированы. Отметим, что заполнение содержа-

ния разделов инструкции частично автоматизировано. Например, информация, хранящаяся в базе данных, вводится в текст инструкции автоматически, а разработчик может выбирать требуемые ему данные из списков. Готовые документы проверяются на корректность заполнения всех полей и сохраняются одновременно в двух форматах — текстовом MS Word и специализированном — на дисках.

Значимость решения задачи автоматизации разработки технической документации доказана в [4]. Показано, что ошибки, допущенные при разработке, оказывают влияние на безопасность управления движением поездов, а именно, на изменение технического состояния систем железнодорожной автоматики и телемеханики, что может создавать условия опасных отказов объектов управления.

В работах [5–7] рассмотрены способы решения задач автоматизации формирования конструкторской документации табличного вида. Формирование выполнено на основе анализа значений столбцов базы данных, содержащей сведения о составе и структуре изделий. Поиск данных, определяющих содержание заданного вида документации, выполняется по запросу обозначения проектируемого изделия и дополнительных параметров согласно виду документа. Результат поиска — информация для разработки конструкторского документа, отсортированная и представленная согласно требованиям ГОСТ. Оформленный и сформированный документ в формате «.doc» или «.pdf» хранится на диске совместно со специализированным форматом, содержащим структуру шаблона.

Постановка задачи генерации проектных решений

В результате анализа научных работ можно сделать вывод, что автоматизация создания технической документации связана с несколькими задачами. Необходима разработка хранилища данных об изделии, получаемых, как на этапах разработки и подготовки производства, так и при производстве, в процессе испытаний изделий [8–10] и исследовании их отказов [11–13]. В качестве хранилища предложено использовать цифровой паспорт изделия, содержащий информацию этапов жизненного цикла изделия. Паспорт формируется на основе онтологического подхода.

Требуется разработка процедур анализа и синтеза проектных решений и описание предъявляемых требо-

ваний. Требования — четкие значения, такие как обозначение изделия, для которого формируется документ. Тогда поиск информации в хранилище заключается в анализе значений строк в конкретных столбцах таблиц. Результат поиска — совокупность информации, образующая содержание документации, по полному или частичному соответствию значения строки значению требования.

Заметим, что задачи автоматизации не ограничиваются только формированием данных, определяющих содержание некоторых видов конструкторских документов. Работы по цифровизации процессов предприятий определяют необходимость постановки задач автоматизации в более широком смысле — требуется разработка алгоритмов для управления не только данными об изделии, но и для управления проектно-производственными процедурами на предприятиях. Проектные решения образуются совокупностью данных, используемых для разработки и корректировки технической — конструкторской, программной или технологической — документации, для управления проектными и производственными процедурами. Причем требования, предъявляемые к таким проектным решениям, могут быть заданы нечеткими значениями.

Цель работы — разработка алгоритма автоматизации генерации проектных решений для управления данными и проектно-производственными процедурами.

Пусть исходными данными для алгоритма являются:

$\mathbf{RS} = (rs_1, rs_2, \dots, rs_s)$ — множество s требований, предъявляемых к содержанию цифрового паспорта,

$\mathbf{RP} = (rp_1, rp_2, \dots, rp_p)$ — множество p требований, предъявляемых к проектным решениям [14],

а также модель цифрового паспорта электронного изделия, содержащего знания о данных об изделии (в виде информационных объектов систем) и формирующих их проектно-производственных процедурах, выполняемых на этапах жизненного цикла.

В настоящей работе модель цифрового паспорта — метаописание онтологии цифрового паспорта. Поскольку онтология — кортеж, состоящий из множеств классов (\mathbf{T}) и атрибутов (\mathbf{A}), матриц сопоставлений (\mathbf{P}) и смежности (\mathbf{R}) [15], то ее метаописание можно определить в виде [16]:

$\mathbf{D} = (d_1, d_2, \dots, d_k)$, $\mathbf{D} \subseteq \mathbf{T}$ — множество k информационных объектов, формируемых на этапах жизненного цикла средствами систем управления ресурсами предприятия, данными об изделии, производственной деятельностью или качеством продукции;

$\mathbf{Pr} = (pr_1, pr_2, \dots, pr_n)$, $\mathbf{Pr} \subseteq \mathbf{T}$ — множество n проектно-производственных процедур, выполняемых на этапах жизненного цикла;

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \dots & c_{ij} & \dots \\ c_{k1} & \dots & c_{kn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_k \end{bmatrix}, i = \overline{1, k}; j = \overline{1, n} — модель$$

компонентов цифрового паспорта, где $c_{ij} \in C_i$, $c_{ij} = \langle d_i, pr_j \rangle$, если информационный объект $d_i \in \mathbf{D}$ связан отношением «формируется» с проектно-производственной процедурой $pr_j \in \mathbf{Pr}$, $c_{ij} = \langle 0, 0 \rangle$ в ином случае (в отличие от указанного в [16]);

$\mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_p)$, $\mathbf{U} \subseteq \mathbf{A}$ — модель параметров компонентов цифрового паспорта;

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11}(C_1) & \dots & g_{1p}(C_1) \\ \dots & g_{ij}(C_i) & \dots \\ g_{k1}(C_k) & \dots & g_{kp}(C_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1(C_1) \\ G_2(C_2) \\ \dots \\ G_k(C_k) \end{bmatrix}, i = \overline{1, k}; j = \overline{1, p},$$

$\mathbf{G} \subseteq \mathbf{P}$ — модель описаний компонентов цифрового паспорта, где $g_{ij}(C_i) \in G_i(C_i)$, $C_i \in \mathbf{C}$, $g_{ij}(C_i) = \langle C_i, u_j \rangle$, если компонент цифрового паспорта $C_i \in \mathbf{C}$ связан отношением «описывается» с параметром $u_j \in \mathbf{U}$, $g_{ij}(C_i) = \langle 0, 0 \rangle$, в ином случае (в отличие от указанного в [16]);

$\mathbf{Z}(\mathbf{C}) = |Z_{ij}(C_i, C_j)|$ — модель замещения описаний компонентов цифрового паспорта, где $Z_{ij}(C_i, C_j) = \begin{cases} 0, & G_i(C_i) \not\subseteq G_j(C_j) \\ 1, & G_i(C_i) \subseteq G_j(C_j) \end{cases}, i, j = \overline{1, k}$;

$\mathbf{X}(\mathbf{C}) = |X_{ij}(C_i, C_j)|$, $\mathbf{X}(\mathbf{C}) \subseteq \mathbf{R}$, $i, j = \overline{1, k}$ — модель взаимодействия описаний компонентов цифрового паспорта, где $X_{ij}(C_i, C_j) = 1$, если описание компонента цифрового паспорта $G_i(C_i) \in \mathbf{G}$ связано отношениями (согласно [15]) с описанием $G_j(C_j) \in \mathbf{G}$, $X_{ij}(C_i, C_j) = 0$ в ином случае.

Тогда для любого предприятия отрасли приборостроения задача автоматизации генерации проектных решений для управления данными и проектно-производственными процедурами сводится к анализу описаний компонентов цифрового паспорта множества \mathbf{G} согласно требованиям \mathbf{RP} и \mathbf{RS} .

Анализ элементов множества \mathbf{G} на основе требований \mathbf{RS} позволяет определить те из них, что образуют содержание цифрового паспорта на конкретном предприятии. Поскольку требования \mathbf{RS} заданы вербально, то каждому элементу $G_i(C_i) \in \mathbf{G}$, $i = \overline{1, k}$ соответствует значение функции принадлежности нечеткой переменной, которая согласно [17] имеет вид:

$$\langle \overline{C}_i, \overline{\mathbf{U}}, \mu_{C_i}(\overline{\mathbf{U}}) \rangle,$$

где $\overline{C}_i \in \mathbf{C}$ — элементы матрицы \mathbf{C} , удовлетворяющие требованиям \mathbf{RS} , которые определяются на основе экспертных оценок; $\overline{\mathbf{U}} \subseteq \mathbf{U}$ — подмножество множества параметров компонентов цифрового паспорта, удовлетворяющих требованиям \mathbf{RS} ; $\mu_{C_i}(\overline{\mathbf{U}})$ — функция принадлежности, характеризующая вероятность того, что параметры из множества $\overline{\mathbf{U}}$ описывают компонент цифрового паспорта $\overline{C}_i \in \mathbf{C}$.

Вычисление значений функций принадлежности описано в работе [17], результат множества — $(\omega_1^{C_1}, \omega_2^{C_1}, \dots, \omega_p^{C_1}), (\omega_1^{C_2}, \omega_2^{C_2}, \dots, \omega_p^{C_2}), \dots, (\omega_1^{C_k}, \omega_2^{C_k}, \dots, \omega_p^{C_k})$. Для решения задачи поиска проектного решения полученные значения приведены к четким — для каждого элемента $G_i(C_i) \in \mathbf{G}$, $i = \overline{1, k}$ вычислены значения $\mathbf{\Omega} = (\Omega^{C_1}, \Omega^{C_2}, \dots, \Omega^{C_k})$ методом центраида

$$\Omega^{C_i} = \frac{\max(\omega_j^{C_i})}{\sum_{i=1}^k \max(\omega_j^{C_i})}, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, p}, \quad (1)$$

где $\omega_j^{C_i}$ — значение функции принадлежности μ_{C_i} , соответствующее значению $u_j \in \overline{\mathbf{U}}$; $\Omega^{C_i} \in \mathbf{\Omega}$ — значение центраида для элемента $G_i(C_i) \in \mathbf{G}$, содержащее четкое значение нечеткой переменной.

Анализ элементов множества \mathbf{G} , согласно требованиям \mathbf{RP} , позволяет определить те из них, которые образуют проектное решение на основе содержания цифрового паспорта на конкретном предприятии. Используя алгоритм Такаги–Сугено–Канга, в работе [18] описана процедура синтеза проектных решений, содержащая нечеткие правила логического вывода. Получим, на основании выражения (1), для вычисления значений $\bar{\Omega}^{C_i}$ ($i = 1, k$):

$$\begin{aligned} \bar{\Omega}^{C_1} &= w_1' \cdot \left(b_{10} + \sum_{j=1}^p b_{1j} \cdot r p_j \right), \\ \bar{\Omega}^{C_2} &= w_2' \cdot \left(b_{20} + \sum_{j=1}^p b_{2j} \cdot r p_j \right), \\ &\dots \\ \bar{\Omega}^{C_k} &= w_k' \cdot \left(b_{k0} + \sum_{j=1}^p b_{kj} \cdot r p_j \right), \end{aligned}$$

где $w_i' \in \mathbf{W}$ ($i = \overline{1, k}$) — результат активизации подзаключений нечетких правил согласно работе [19]; b_{i0} , b_{ij} — коэффициенты, определяющие веса, вычисляемые на этапах нечеткого логического вывода.

Совокупность выражений $\bar{\Omega}^{C_1}, \bar{\Omega}^{C_2}, \dots, \bar{\Omega}^{C_k}$ обобщена и записана в матричной форме

$$\bar{\Omega} = \mathbf{M} \cdot \beta + \varepsilon, \quad (2)$$

где ε — ошибка; \mathbf{M} — детерминированная матрица размерности $k \times p$, согласно [19]:

$$\mathbf{M} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{R} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} w_1' \cdot r p_1 & \dots & w_1' \cdot r p_p \\ \dots & w_i' \cdot r p_j & \dots \\ w_k' \cdot r p_1 & \dots & w_k' \cdot r p_p \end{bmatrix},$$

где β — вектор-столбец вида $\beta = (b_{10}, \dots, b_{1p}, b_{20}, \dots, b_{2p}, \dots, b_{k0}, \dots, b_{kp})$; \mathbf{W} — множество результатов активизации подзаключений нечетких правил.

Тогда искомым проектным решением являются элементы матрицы $\mathbf{X}(\mathbf{C})$, которые удовлетворяют критерию подобия вида:

$$\Delta(\beta) = \sum_{i=1}^k (\Omega - \bar{\Omega}) = (\Omega - \mathbf{M} \cdot \beta)^T \cdot (\Omega - \mathbf{M} \cdot \beta) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Преобразуя выражение (3), согласно работам [18, 19], получено выражение для вычисления элементов вектора-столбца β

$$\beta = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \cdot (\mathbf{M}^T \Omega). \quad (4)$$

Рассмотрим варианты генерации проектных решений на основе биоинспирированных алгоритмов.

Варианты алгоритмов генерации проектных решений

Согласно работам [20–28], анализ метаописаний онтологий соответствует процедурам отображения или кластеризации, для автоматизации которых используются биоинспирированные алгоритмы.

Процедура отображения заключается в поиске семантических связей между вершинами графов мета-

онтологий. Основная задача поиска — расчет меры семантической близости. В [20] мера близости — комплексная мера, для вычисления которой предложен алгоритм многокритериальной оптимизации методом «роя частиц». Комплексная мера близости — среднее арифметическое значение пяти видов мер близости с учетом весового коэффициента. Значение вида меры близости вычислено на основе анализа значений вершин графов метаописаний онтологий, заданных вербально, а весового коэффициента — на основе экспертной оценки или автоматически с помощью обучаемой нейронной сети или алгоритма. В [21] мера семантической близости — эквивалентный тип семантической близости, вычисляемый в соответствии с методами из работ [22–26] и предложенным гибридным оптимизационным алгоритмом бактериального и кукушкиного поиска. Критерий — пороговое значение, превышение которого свидетельствует о значимости эквивалентной семантической близости.

В свою очередь процедура кластеризации означает объединение в группы схожих элементов метаописания онтологии. Согласно работам [27, 28], процедура выполнена с использованием алгоритмов на основе поведения пчелиной колонии, различаемых вычислением критериев подобия. В работе [27] критерий учитывает вес вершины и вес ребра графа метаописания онтологии, а в [28] предложено вычислить расстояние Хэмминга между элементами.

При этом алгоритм на основе поведения пчелиной колонии состоит из четырех фаз: инициализации, рабочих пчел, пчел-наблюдателей и пчел-разведчиков, обеспечивая его точность и быстрдействие по сравнению с другими алгоритмами [29–31].

В фазе инициализации задается начальное пространство поиска проектных решений и параметры работы алгоритма. Пространством поиска определено множество проектных альтернатив, элементы которого анализируют при принятии проектного решения. Анализ выполнен на основе критерия подобия, формулируемого согласно требованиям или мере близости элементов друг другу. Параметры работы алгоритма: количество пчел-агентов, используемых для поиска проектного решения в фазах рабочих пчел; количество пчел-наблюдателей; условие завершения процедуры поиска.

Фаза рабочих пчел образована совокупностью нескольких действий. Прежде всего выполнен расчет значений целевых функций для каждой проектной альтернативы и выбор наилучшего проектного решения среди возможных. Любая проектная альтернатива может быть определена двумя способами. Первый способ — представление проектных альтернатив или вершин графа метаописаний онтологии в вербальной форме, а второй — в числовой форме. Причем если вершины заданы вербально, то каждой из них поставлено в соответствие числовое значение, используемое для расчета значения целевой функции.

Далее проведен поиск и расчет значения целевой функции соседнего проектного решения для выбранного наилучшего решения, по результатам которого реализован выбор лучшего проектного решения сравне-

нием значений целевых функций. Для поиска соседнего решения используется любой способ, например, один из предложенных в работах [27, 28, 32–34]. Расчет значения целевой функции и выбор наилучшего проектного решения осуществлен на основе критерия подобия.

Фаза пчел-наблюдателей включает действия, аналогичные действиям в фазе рабочих пчел. Из всех лучших решений, найденных рабочими пчелами, выбирается одно наилучшее с некоторой вероятностью. Для этого может быть использована одна из схем, предложенных, например, в работе [35]. Поиск и расчет значения целевой функции соседнего решения для выбранного решения, по результатам которого реализуется выбор лучшего проектного решения, происходит сравнением значений целевых функций, что соответствует ранее изложенному подходу.

Фаза пчел-разведчиков заключается в формировании нового пространства поиска проектных решений на основе анализа проектных решений, отвергнутых на предыдущих фазах. Если не выполнено условие завершения поиска, то осуществляется возврат к фазе рабочих пчел; иначе полученное проектное решение сохраняется и алгоритм завершается.

Алгоритм генерации проектных решений

В настоящей работе на перечисленных фазах выполнены следующие этапы.

Формирование элементов множества $\mathbf{rsG} \subset \mathbf{G}$ по модели \mathbf{G} , а также вычисление значений функций принадлежности параметров \mathbf{U} и требований \mathbf{RP} выполняется на основе работ [15] и [17] соответственно.

— Этап формирования начального пространства поиска проектных решений означает вычисление значений $\mathbf{\Omega} = (\Omega^{C_1}, \Omega^{C_2}, \dots, \Omega^{C_k})$, $\mathbf{W} = (w_1', w_2', \dots, w_k')$ и вектора-столбца $\mathbf{\beta}$ в соответствии с выражениями (1) и (4). В итоге формируются два множества: $\mathbf{rsGSearch} \subseteq \mathbf{rsG}$, состоящего из незаменимых элементов матрицы $\mathbf{Z}(\mathbf{C})$, и $\mathbf{rsGStorage} \subseteq \mathbf{rsG}$, состоящее из всех остальных элементов.

— Этап выбора и оценки проектных решений заключается в вычислении значений $\mathbf{\Omega}$ и $\Delta(\beta)$ для элементов множества $\mathbf{rsGSearch}$ на основе (2) и (3).

— На этапе поиска новых проектных решений вычислим и проанализируем значения расстояния Хэмминга между элементами анализируемого множества.

— Этап поиска лучших проектных решений содержит действия для фаз рабочих пчел и пчел-наблюдателей. Фазе рабочих пчел соответствует расчет вероятностей выбора каждого лучшего проектного решения. В фазе пчел-наблюдателей формируется множество лучших проектных решений, образующих искомое проектное решение.

— Этап формирования проектных решений соответствует фазе пчел-разведчиков. В отличие от традиционного подхода в настоящей работе не выполнен анализ проектных решений, которые были отброшены на предыдущих фазах. Тогда рассматриваемый этап заключается только в анализе элементов множества $\mathbf{rsGStorage}$.

Опишем вариант реализации каждого из этапов подробнее.

Формирование начального пространства поиска проектных решений. Рассматриваемый этап представлен следующей последовательностью:

- 1) расчет значений элементов множеств $\mathbf{\Omega}$ и \mathbf{W} для каждого $\mathbf{rsG}_i \in \mathbf{rsG}$ ($i = 1, k$) согласно выражению (1);
- 2) расчет значений элементов вектора-столбца $\mathbf{\beta}$ по выражению (4);
- 3) формирование элементов множеств $\mathbf{rsGSearch}$ и $\mathbf{rsGStorage}$ путем разбиения множества \mathbf{rsG} согласно анализу значений элементов модели $\mathbf{Z}(\mathbf{C})$.

Элементы сформированного множества $\mathbf{rsGSearch}$ используются при выполнении последующих этапов выбора и оценки проектных решений, поиска новых и лучших проектных решений, а элементы множества $\mathbf{rsGStorage}$ — только на последнем этапе формирования проектного решения.

Выбор и оценка проектных решений. Рассматриваемый этап состоит из:

- 1) расчета значений целевой функции $\Delta(\beta)$ согласно (3) и значений $\mathbf{\Omega}^{C_i} \in \mathbf{\Omega}$ ($i = 1, k$) согласно (2) для каждого элемента множества $\mathbf{rsGSearch}$;
- 2) выбора проектных решений, удовлетворяющих критерию подобия (3), для чего проведено сравнение элементов множества $\mathbf{rsGSearch}_i \in \mathbf{rsGSearch}$ ($i = 1, k$) между собой.

Сформированное в результате множество проектных решений, удовлетворяющих критерию подобия, используется для поиска новых проектных решений.

Поиск новых проектных решений. Рассматриваемый этап выполняется в двух фазах: рабочих пчел и пчел-наблюдателей. Этап определяет анализируемое множество проектных решений $\mathbf{analyze_set}$ в фазах: рабочих пчел $\mathbf{analyze_set} \subset \mathbf{rsGSearch}$ и пчел-наблюдателей $\mathbf{analyze_set} \subset \mathbf{rsGBest}$.

Для каждого элемента множества $\mathbf{analyze_set}$ и множества проектных решений, полученного на предыдущем этапе, выполняется расчет расстояния Хэмминга. Элементы, значения расстояния Хэмминга которых минимально, включены в состав множества $\mathbf{result_set}$ в фазах: рабочих пчел $\mathbf{result_set} \subset \mathbf{bestGSearch}$ и пчел-наблюдателей $\mathbf{result_set} \subset \mathbf{rsGBest}$.

Сформированное в результате множество используется для поиска лучших проектных решений.

Поиск лучших проектных решений. Рассматриваемый этап в фазе рабочих пчел означает расчет вероятностей выбора лучших решений из множества $\mathbf{bestGSearch}$, выполняемый любым известным способом, например, описанным в работе [35].

Отметим, что в фазе пчел-наблюдателей формируется множество лучших проектных решений, образующих проектное решение, удовлетворяющее требованиям \mathbf{RP} . Для каждого элемента $\mathbf{rsGBest}_i \in \mathbf{rsGBest}$ ($i = 1, k$) выполняется сравнение значений критерия подобия (3). Лучшие проектные решения — с минимальным значением критерия подобия — включаются в состав искомого решения $\mathbf{resX} \subset \mathbf{X}(\mathbf{C})$.

Полученное на этом этапе проектное решение передается на следующий этап для его дополнения.

Формирование проектных решений. Этап означает поиск элементов множества $\mathbf{rsGStorage}$ для формирования искомого проектного решения $\mathbf{resX} \subset \mathbf{X}(\mathbf{C})$. Для каждого элемента $\mathbf{rsGStorage}_j \in \mathbf{rsGStorage}$ ($j = |\mathbf{rsGStorage}|$) сравнивается значение критерия подобия со значением, соответствующим элементу $\mathbf{resX}_i \in \mathbf{resX}$ ($i = \overline{1, k}$).

Поскольку элементами множества $\mathbf{rsGStorage}$ являются элементы, аналогичные элементам множества $\mathbf{rsGSearch}$ в силу модели замещения, то логично утверждать, что значения критериев подобия двух аналогичных элементов будут равны. Тогда элемент $\mathbf{rsGStorage}_j \in \mathbf{rsGStorage}$ включается в искомое проектное решение.

Получаемый тем самым результат — искомое проектное решение, удовлетворяющее предъявленным к нему требованиям.

Пример реализации алгоритма

Для примера работы предложенного алгоритма рассмотрим решение задач поиска данных для управления проектно-производственными процедурами на примере цифрового паспорта электронного изделия из работы [15]. Пусть элементы моделей \mathbf{C} , $\overline{\mathbf{U}}$, \mathbf{rsG} , $\mathbf{X}(\mathbf{C})$ и $\mathbf{Z}(\mathbf{C})$ соответствуют требованиям \mathbf{RS} конкретного предприятия. Для краткости представим часть элементов и их значений, достаточных для демонстрации работы алгоритма.

Поскольку по [15] предприятие специализируется на выпуске блоков и модулей на основе печатных плат, приобретаемых у контрагентов, то элементы модели \mathbf{rsG} имеют вид:

$\mathbf{rsG}_1 = \langle \text{управление актуализацией данных о покупных изделиях, Объект «Изделие» (обозначение; наименование; версия; состояние; признак изготовителя (покупка); вид изделия; ограничительный признак)} \rangle$;

$\mathbf{rsG}_2 = \langle \text{разработка и изменение данных печатной платы, Объект «Изделие» вида «Сборочная единица» (обозначение (АБВГ.ХХХХХХ.001); наименование (Плата управления); представление; вид изделия; версия; состояние; признак изготовителя (собственное производство); признак изделия; габариты изделия; масса изделия)} \rangle$;

$\mathbf{rsG}_3 = \langle \text{разработка и изменение данных печатной платы, Объект «САД-Документ» вида «Модель детали» (обозначение (АБВГ.ХХХХХХ.001); наименование (Плата управления); версия (0); состояние (сдано в архив); первичная применяемость (АБВГ.ХХХХХХ.001); вид модели)} \rangle$;

$\mathbf{rsG}_4 = \langle \text{разработка и изменение данных печатной платы, Объект «САД-Документ» вида «Чертеж детали» (обозначение (АБВГ.ХХХХХХ.001); наименование (Плата управления); вид документа (конструкторский документ); версия (0); состояние (сдано в архив); первичная применяемость (АБВГ.ХХХХХХ.001); формат (А3); количество листов документа (2)} \rangle$;

$\mathbf{rsG}_5 = \langle \text{разработка и изменение данных печатной платы, Объект «Документ» вида «Спецификация» (обозначение (АБВГ.ХХХХХХ.001); наименование (Плата управления); вид документа (конструкторский доку-$

мент); версия (2); состояние (на проверке); первичная применяемость (АБВГ.ХХХХХХ.002); формат (А4); количество листов документа (5)} \rangle;

$\mathbf{rsG}_6 = \langle \text{разработка и изменение конструкции прибора, Объект «Изделие» (обозначение (АБВГ.ХХХХХХ.002); наименование (Прибор управления); представление; вид изделия; версия; состояние; признак изготовителя (собственное производство); признак изделия; габариты изделия; масса изделия)} \rangle$;

$\mathbf{rsG}_7 = \langle \text{разработка и изменение конструкции прибора, Объект «САД-Документ» вида «Модель сборочной единицы» (обозначение (АБВГ.ХХХХХХ.002); наименование (Прибор управления); версия (0); состояние (сдано в архив); первичная применяемость (АБВГ.ХХХХХХ.002); вид модели)} \rangle$;

$\mathbf{rsG}_8 = \langle \text{разработка и изменение конструкции прибора, Объект «САД-Документ» вида «Сборочный чертеж» (обозначение (АБВГ.ХХХХХХ.002СБ); наименование (Прибор управления Сборочный чертеж); вид документа (конструкторский документ); версия (0); состояние (сдано в архив); первичная применяемость (АБВГ.ХХХХХХ.002); формат (А3); количество листов документа (2)} \rangle$;

$\mathbf{rsG}_9 = \langle \text{разработка и изменение конструкции прибора, Объект «Документ» вида «Спецификация» (обозначение (АБВГ.ХХХХХХ.002); наименование (Прибор управления); вид документа (конструкторский документ); версия (0); состояние (Сдано в архив); первичная применяемость; формат (А4); количество листов документа (7)} \rangle$;

$\mathbf{rsG}_{10} = \langle \text{разработка и изменение программного обеспечения прибора, Объект «Изделие» (обозначение; наименование; представление; вид изделия; версия; состояние; признак изготовителя (собственное производство); признак изделия)} \rangle$;

$\mathbf{rsG}_{11} = \langle \text{разработка и изменение программного обеспечения прибора, Объект «Документ» (обозначение; наименование; вид документа; версия; состояние; первичная применяемость)} \rangle$;

$\mathbf{rsG}_{12} = \langle \text{разработка и изменение эксплуатационной документации, Объект «Документ» вида «Руководство по эксплуатации» (обозначение (АБВГ.ХХХХХХ.002РЭ); наименование (Прибор управления Руководство по эксплуатации); вид документа (эксплуатационный документ); версия (0); состояние (На проверке); первичная применяемость (АБВГ.ХХХХХХ.002); формат (А4); количество листов документа(40)} \rangle$.

При этом количество элементов в модели компонентов цифрового паспорта равно 12, а элементов в модели параметров — 16.

Элементами модели $\mathbf{X}(\mathbf{C})$ являются:

$X_{2,1}(C_2, C_1) = 1, X_{2,3}(C_2, C_3) = 1, X_{2,4}(C_2, C_4) = 1, X_{2,5}(C_2, C_5) = 1, X_{6,1}(C_6, C_1) = 1, X_{6,2}(C_6, C_2) = 1, X_{6,7}(C_6, C_7) = 1, X_{6,8}(C_6, C_8) = 1, X_{6,9}(C_6, C_9) = 1, X_{6,10}(C_6, C_{10}) = 1, X_{6,12}(C_6, C_{12}) = 1, X_{10,11}(C_{10}, C_{11}) = 1$.
Остальные элементы равны нулю.

Элементами модели $\mathbf{Z}(\mathbf{C})$ являются:

$Z_{2,6}(C_2, C_6) = 1, Z_{2,10}(C_2, C_{10}) = 1, Z_{3,4}(C_3, C_4) = 1, Z_{3,7}(C_3, C_7) = 1, Z_{3,8}(C_3, C_8) = 1, Z_{4,3}(C_4, C_3) = 1, Z_{4,5}(C_4, C_5) = 1, Z_{4,8}(C_4, C_8) = 1, Z_{4,9}(C_4, C_9) = 1,$

Таблица. Результаты выполнения этапов разработанного алгоритма
 Table. Results of the developed algorithm stages

| Этапы реализации алгоритма | | Задача поиска данных | |
|--|--|--|---|
| | | о поставляемых заказчику изделиях и их составных частях | о составных частях изделий, подлежащих производству |
| Требования RP | вид изделия и его составной части | «сборочная единица» | |
| | признак изготовителя составной части изделия | «собственное производство» | |
| | вид документа | «эксплуатационный документ» | «конструкторский документ» |
| | контролируемое состояние | «сдано в архив» | «запущено в производство» |
| Расчет значений функций принадлежности | | $(\omega_1^{C_1}, \omega_2^{C_1}, \dots, \omega_{16}^{C_1}), (\omega_1^{C_2}, \omega_2^{C_2}, \dots, \omega_{16}^{C_2}), \dots, (\omega_1^{C_{12}}, \omega_2^{C_{12}}, \dots, \omega_{16}^{C_{12}})$, в том числе $(w_1', w_2', \dots, w_{12}')$. | |
| Этап формирования начального пространства поиска проектных решений | | rsGSearch = (rsG_2, rsG_{12}) ; rsGStorage = (rsG_6) . | rsGSearch = (rsG_2, rsG_4) ; rsGStorage = $(rsG_6, rsG_5, rsG_8, rsG_9)$. |
| Последующие этапы | | Выполнение циклов этапов выбора и оценки проектных решений, поиска новых проектных решений, поиска лучших проектных решений, а также формирования проектных решений. | |
| Результат работы | | resX = (rsG_6, rsG_{12}) . Содержит обозначение и наименование объектов «Изделие», обозначение, наименование, версия и состояние эксплуатационного документа (объект «Документ» вида «Руководство по эксплуатации»). | resX = $(rsG_6, rsG_8, rsG_9, rsG_2, rsG_4)$. Содержит обозначение и наименование объектов «Изделие», обозначение, наименование, версия и состояние конструкторских документов (объект «CAD-Документ» вида «Модель ...» и вида «Чертеж ...», а также объект «Документ» вида «Спецификация»). |

$Z_{4,11}(C_4, C_{11}) = 1, Z_{4,12}(C_4, C_{12}) = 1, Z_{5,4}(C_5, C_4) = 1,$
 $Z_{5,8}(C_5, C_8) = 1, Z_{5,9}(C_5, C_9) = 1, Z_{5,11}(C_5, C_{11}) = 1,$
 $Z_{5,12}(C_5, C_{12}) = 1, Z_{6,2}(C_6, C_2) = 1, Z_{6,10}(C_6, C_{10}) = 1,$
 $Z_{7,3}(C_7, C_3) = 1, Z_{8,3}(C_8, C_3) = 1, Z_{8,4}(C_8, C_4) = 1,$
 $Z_{8,5}(C_8, C_5) = 1, Z_{8,9}(C_8, C_9) = 1, Z_{8,11}(C_8, C_{11}) = 1,$
 $Z_{8,12}(C_8, C_{12}) = 1, Z_{9,4}(C_9, C_4) = 1, Z_{9,5}(C_9, C_5) = 1,$
 $Z_{9,8}(C_9, C_8) = 1, Z_{9,11}(C_9, C_{11}) = 1, Z_{9,12}(C_9, C_{12}) = 1,$
 $Z_{10,2}(C_{10}, C_2) = 1, Z_{10,6}(C_{10}, C_6) = 1, Z_{11,4}(C_{11}, C_4) = 1,$
 $Z_{11,5}(C_{11}, C_5) = 1, Z_{11,8}(C_{11}, C_8) = 1, Z_{11,9}(C_{11}, C_9) = 1,$
 $Z_{11,12}(C_{11}, C_{12}) = 1, Z_{12,4}(C_{12}, C_4) = 1, Z_{12,5}(C_{12}, C_5) = 1,$
 $Z_{12,8}(C_{12}, C_8) = 1, Z_{12,9}(C_{12}, C_9) = 1, Z_{12,11}(C_{12}, C_{11}) = 1.$
 Остальные элементы равны нулю.

Пусть на предприятии сформулированы задачи поиска данных об изделиях и их составных частях, решаемые при управлении проектно-производственными процедурами. Управление проектными процедурами связано с задачей поиска данных о поставляемых заказчику изделиях и их составных частях. Управление производственной деятельностью — с поиском данных об изделиях, подлежащих производству. Пример основных требований **RP**, сформулированных для каждого из них, а также результаты этапов разработанного алгоритма приведены в таблице.

На первом этапе полученные результаты могут использоваться для принятия решений при управлении проектными и производственными процедурами, на втором — для обеспечения функционирования цифровых двойников приборов, выпускаемых предприятием.

Результат применения алгоритма — получение элементов онтологии с атрибутами: обозначение и наименование продукции контрагентов; наименование предприятия-изготовителя.

Заключение

В работе представлен алгоритм генерации проектных решений для управления данными об изделии и проектно-производственными процедурами, основанный на поведении пчелиной колонии. Предложены реализации нескольких этапов алгоритма, выполняемых в фазах инициализации, рабочих пчел, пчел-наблюдателей и пчел-разведчиков.

Этап формирования начального пространства поиска проектных решений означает формирование элементов двух множеств: **rsGSearch**, содержащего анализируемые описания компонентов цифрового паспорта, и **rsGStorage**, состоящего из всех остальных компонентов. Причем в состав множеств включаются только те компоненты цифрового паспорта, которые удовлетворяют требованиям **RS** конкретного предприятия.

Этап выбора и оценки проектных решений заключается в вычислении значений критерия подобия для элементов множества **rsGSearch**. На этапе поиска новых проектных решений вычисляют и сравнивают значения расстояния Хэмминга между вариантами проектных решений. Тем самым формируется множество вариантов

лучших проектных решений, удовлетворяющих требованиям **RP**.

Этап поиска лучших проектных решений в фазе рабочих пчел соответствует расчету вероятностей выбора каждого лучшего проектного решения, а в фазе пчел-наблюдателей — формированию множества лучших проектных решений, образующих искомое проектное решение.

Этап формирования проектных решений соответствует анализу элементов множества **rsGStorage**, что дополняет искомое проектное решение описаниями компонентов цифрового паспорта.

На основе полученных результатов предполагается разработать сигнатуры и семантики унифицированных сервисов для применения цифрового паспорта на предприятиях приборостроительной отрасли.

Литература

- Петров Р.Г. Технология разработки интегрированных систем управления техническими средствами на базе типовых приборов, типовой документации и программного обеспечения с использованием средств автоматизированного проектирования // Системы управления и обработки информации. 2016. № 1(32). С. 80–87.
- Донецкая Ю.В. Цели и задачи разработки интегрированных систем управления данными // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2-х частях. Ч. 2. 2012. С. 8–11.
- Седых Д.В., Белоусов С.В., Василенко М.Н. Автоматизация составления инструкций по пользованию устройствами сигнализации, централизации и блокировки // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. Т. 14. № 2. С. 320–332.
- Василенко М.Н., Бубнов В.П., Булавский П.Е., Василенко П.А. Ошибки в технической документации железнодорожной автоматики и телемеханики и их влияние на безопасность движения поездов // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5. № 1. С. 94–112. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2019-1-94-112>
- Гурьянов А.В., Шукалов А.В., Жаринов И.О., Костишин М.О., Леоновец С.А. Программные шаблоны для автоматизированного оформления текстовых конструкторских документов на изделия авиационной промышленности // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. № 2. С. 15–22. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2017-2-77-2>
- Гурьянов А.В., Коновалов П.В., Шукалов А.В., Жаринов И.О., Леоновец С.А. Автоматизация процесса формирования учетной документации с использованием базы данных радиоэлектронных компонентов // Программные продукты и системы. 2017. № 3(30). С. 517–523. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.030.3.517-523>
- Гурьянов А.В., Шукалов А.В., Жаринов И.О., Костишин М.О., Леоновец С.А. Автоматизация процессов подготовки программной документации на изделия радиоэлектронной промышленности // Программные продукты и системы. 2017. № 3(30). С. 504–509. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.030.3.504-509>
- Охтилев М.Ю., Гамов В.Ю., Черников А.Д. Создание единого виртуального электронного паспорта космической ракеты-носителя «Союз-2»: этапы, концепция и принципы построения, модель электронной структуры изделия // I-methods. 2018. Т. 10. № 4. С. 11–23.
- Эртман Л.В., Рудаков В.Б., Бурцев А.С., Бакланов В.И., Филоненко П.А. Технология статистического контроля свойств наноматериалов и покрытий в условиях воздействия ионизирующих излучений и оценки надежности изделий космической техники, созданных на их основе // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. № 9. С. 8. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-9-2018>
- Гурьянов А.В., Шукалов А.В., Заколдаев Д.А., Жаринов И.О., Нечаев В.А. Организация электронного документооборота между проектным, производственным и эксплуатирующим предприятиями в условиях цифровой экономики Индустрии 4.0 // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 106–112. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-1-106-112>
- Автамонов П.Н., Бахмут А.Д., Крылов А.В., Охтилев М.Ю., Охтилев П.А., Соколов Б.В. Применение технологии поддержки принятия решений на различных этапах жизненного цикла космических средств в составе системы информации о техническом состоянии и надёжности // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 3. С. 173–184. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-3-173-184>

References

- Petrov R.G. Technology of development of integrated control systems of technical facilities based on standard devices, standard documentation and software with use of computer assisted design facilities. *Control and Data Processing Systems*, 2016, no. 1(32), pp. 80–87. (in Russian)
- Donetskaia Iu.V. Goals and objectives of the development of integrated data management systems. *Information technologies in professional activity and scientific work: collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. In 2 parts. Part 2, 2012, pp. 8–11. (in Russian)
- Sedykh D.V., Belousov S.V., Vasilenko M.N. Automation of instruction sheets on attention devices and signaling circuits compilation. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2017, vol. 14, no. 2, pp. 320–332. (in Russian)
- Vasilenko M.N., Bubnov V.P., Bulavsky P.E. Errors in the technical documentation of railway automation and remote control and their impact on the safety of train traffic. *Transport automation research*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 94–112. (in Russian). <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2019-1-94-112>
- Guryanov A.V., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Kostishin M.O., Leonovets S.A. Program templates for automated designs of text design documents on products of the aviation industry. *Cherepovets State University Bulletin*, 2017, no. 2, pp. 15–22. (in Russian). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2017-2-77-2>
- Guryanov A.V., Konovalov P.V., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Leonovets S.A. Automated generation of accounting documents using radioelectronic components database. *Software & Systems*, 2017, no. 3(30), pp. 517–523. (in Russian). <https://doi.org/10.15827/0236-235X.030.3.517-523>
- Guryanov A.V., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Kostishin M.O., Leonovets S.A. Automatization of software documentation preparation processes for radio-electronics industry devices. *Software & Systems*, 2017, no. 3(30), pp. 504–509. (in Russian). <https://doi.org/10.15827/0236-235X.030.3.504-509>
- Okhtilev M.Yu., Gamov V.Yu., Chernikov A.D. Establishing a single virtual electronic passport of a space-socket-mounter “Soyuz-2”: stages, concept and principles of construction, model of the electronic structure of the product. *I-methods*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 11–23. (in Russian)
- Ertman L.V., Rudakov V.B., Burtsev A.S., Baklanov V.I., Filonenko P.A. Technology of statistical control of the properties of nanomaterials and coatings exposed to ionizing radiation and assessment of the reliability of nanomaterial space products. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, no. 9, pp. 8. (in Russian). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-9-2018>
- Gurjanov A.V., Shukalov A.V., Zakoldaev D.A., Zharinov I.O., Nechaev V.A. Electronic document flow between project, production and operating enterprises in the context of industry 4.0 digital economy. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 106–112. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-1-106-112>
- Avtamonov P.N., Bakhmut A.D., Krylov A.V., Okhtilev M.Yu., Okhtilev P.A., Sokolov B.V. Application of decision support technology at various stages of the life cycle of space facilities in assembly with the information system of technical condition and reliability. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 173–184. (in Russian). <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-3-173-184>
- Okhtilev M.YU., Klyucharyov A.A., Okhtilev P.A., Zyanchurin A.E. Technology of automated information and analytical support of the product life cycle on the example of unified virtual electronic passport of space facilities. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63,

12. Охтилев М.Ю., Ключарев А.А., Охтилев П.А., Зянчурич А.Э. Технология автоматизированной информационно-аналитической поддержки жизненного цикла изделий на примере единого виртуального электронного паспорта космических средств // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 11. С. 1012–1019. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-11-1012-1019>
13. Афанасьев В.Б. Онтологическое проектирование автоматизированной информационной системы поддержки качества продукции предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 10. С. 12–22.
14. Donetskaya Ju.V., Gatchin Yu.A. Development of requirements for the content of a digital passport and design solutions // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1828. N 1. P. 012102. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1828/1/012102>
15. Донецкая Ю.В. Метод формирования и использования цифрового паспорта электронного изделия на предприятиях приборостроительной отрасли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 6. С. 969–976. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-969-976>
16. Donetskaya Ju.V. Creation of a digital passport for an electronic product and generation of design solutions based on it // Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. 2021. V. 340. P. 379–385. <https://doi.org/10.3233/FAIA210210>
17. Donetskaya Ju.V. Design procedures for the analysis of the components and parameters of a digital passport // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1828. N 1. P. 012103. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1828/1/012103>
18. Donetskaya Ju.V., Gatchin Yu.A. Development of design procedures for the synthesis of design solutions for data management, design and production procedures at the stages of the life cycle of an electronic product // Proc. of the 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2020. P. 9131470. <https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131470>
19. Хижняков Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени: учебное пособие. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. 160 с.
20. Семенова А.В., Курейчик В.М. Оптимизация отображения онтологий методом роя частиц // Онтология проектирования. 2018. Т. 8. № 2(28). С. 285–295. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2018-8-2-285-295>
21. Кравченко Д.Ю., Кравченко А.Ю., Марков В.В. Гибридный биоинспирированный алгоритм отображения онтологий в задачах извлечения и управления данными // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 2(212). С. 16–28. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-16-28>
22. Andreasen T., Knappe R., Bulskov H. Domain specific similarity and retrieval // Proc. of the 11th International Fuzzy Systems Association World Congress. V. 1. 2005. P. 496–502.
23. Castano S., Ferrara A., Montanelli S., Racca G. Semantic information interoperability in open networked systems // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2004. V. 3226. P. 215–230. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30145-5_13
24. Кравченко Ю.А., Курситыс И.О. Биоинспирированный алгоритм приобретения новых знаний на основе классификации информационных ресурсов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 2. С. 15–26. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-2-15-26>
25. Haase P., Siebes R., Van Harmelen F. Peer selection in peer-to-peer networks with semantic topologies // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2004. V. 3226. P. 108–125. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30145-5_7
26. Maedche A., Zacharias V. Clustering ontology-based metadata in the Semantic Web // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2002. V. 2431. P. 348–360. https://doi.org/10.1007/3-540-45681-3_29
27. Бова В.В., Лещанов Д.В. Семантический поиск знаний в среде функционирования междисциплинарных информационных систем на основе онтологического подхода // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 7(192). С. 79–90. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2017-7-79-90>
28. Марков В.В., Кравченко Ю.А., Кузьмина М.А. Развитие методов семантической фильтрации на основе решения задачи кластеризации биоинспирированными алгоритмами // Известия ЮФУ. no. 11, pp. 1012–1019. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-11-1012-1019>
13. Afanasiev V.B. Ontological design of an automated information system for supporting the quality of products of the enterprise. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2020, no. 10, pp. 12–21. (in Russian)
14. Donetskaya Ju.V., Gatchin Yu.A. Development of requirements for the content of a digital passport and design solutions. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1828, no. 1, pp. 012102. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1828/1/012102>
15. Donetskaya Ju. V. The method of forming and using a digital passport for an electronic product at enterprises of the instrument-making industry. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 969–976. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-969-976>
16. Donetskaya Ju.V. Creation of a digital passport for an electronic product and generation of design solutions based on it. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 2021, vol. 340, pp. 379–385. <https://doi.org/10.3233/FAIA210210>
17. Donetskaya Ju.V. Design procedures for the analysis of the components and parameters of a digital passport. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1828, no. 1, pp. 012103. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1828/1/012103>
18. Donetskaya Ju.V., Gatchin Yu.A. Development of design procedures for the synthesis of design solutions for data management, design and production procedures at the stages of the life cycle of an electronic product. *Proc. of the 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 9131470. <https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131470>
19. Khizhnyakov Yu.N. Fuzzy, Neural and Neuro-Fuzzy Control Algorithms in Real-Time Systems. Tutorial. Perm, Publishing House of PNIU, 2013, 160 p. (in Russian)
20. Semenova A.V., Kureichik V.M. Ontology mapping using the method of particle swarm optimization. *Ontology of Designing*, 2018, vol. 8, no. 2(28), pp. 285–295. (in Russian). <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2018-8-2-285-295>
21. Kravchenko D.Yu., Kravchenko A.Yu., Markov V.V. Hybrid bioinspired algorithm for ontologies mapping in the tasks of extraction and knowledge management. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2020, no. 2(212), pp. 16–28. (in Russian). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-16-28>
22. Andreasen T., Knappe R., Bulskov H. Domain specific similarity and retrieval. *Proc. of the 11th International Fuzzy Systems Association World Congress. V. 1*, 2005, pp. 496–502.
23. Castano S., Ferrara A., Montanelli S., Racca G. Semantic information interoperability in open networked systems. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2004, vol. 3226, pp. 215–230. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30145-5_13
24. Kravchenko Yu.A., Kursityis I.O. Bioinspired algorithm for acquiring new knowledge on the basis of the information resources classification. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2019, no. 2, pp. 15–26. (in Russian). <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-2-15-26>
25. Haase P., Siebes R., Van Harmelen F. Peer selection in peer-to-peer networks with semantic topologies. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2004, vol. 3226, pp. 108–125. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30145-5_7
26. Maedche A., Zacharias V. Clustering ontology-based metadata in the Semantic Web. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2002, vol. 2431, pp. 348–360. https://doi.org/10.1007/3-540-45681-3_29
27. Bova V.V., Leshchanov D.V. The semantic search of knowledge in the environment of operation of interdisciplinary information systems based on ontological approach. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2017, no. 7(192), pp. 79–90. (in Russian). <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2017-7-79-90>
28. Markov V.V., Kravchenko Yu.A., Kuzmina M.A. Development of semantic filtering methods based on solving the task of clustering by bioinspired algorithms. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2018, no. 4(198), pp. 175–185. (in Russian). <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-4-175-185>

- Технические науки. 2018. № 4(198). С. 175–185. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-4-175-185>
29. Karaboga D., Gorkemli B., Ozturk C., Karaboga N. A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications // *Artificial Intelligence Review*. 2014. V. 42. N 1. P. 21–57. <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9328-0>
 30. Karaboga D., Akay B. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence // *Artificial Intelligence Review*. 2009. V. 31. N 1-4. P. 61–85. <https://doi.org/10.1007/s10462-009-9127-4>
 31. Bose A., Mali K. Fuzzy-based artificial bee colony optimization for gray image segmentation // *Signal, Image and Video Processing*. 2016. V. 10. N 6. P. 1089–1096. <https://doi.org/10.1007/s11760-016-0863-z>
 32. Wang P., Shi H., Yang X., Mi J. Three-way k -means: integrating k -means and three-way decision // *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. 2019. V. 10. N 10. P. 2767–2777. <https://doi.org/10.1007/s13042-018-0901-y>
 33. Kumar Yu., Shaoo G. A two-step artificial bee colony algorithm for clustering // *Neural Computing and Applications*. 2017. V. 28. N 3. P. 537–551. <https://doi.org/10.1007/s00521-015-2095-5>
 34. Su Z., Zhou H., Hao Y. Evidential evolving C-means clustering method based on artificial bee colony algorithm with variable strings and interactive evaluation mode // *Fuzzy Optimization and Decision Making*. 2021. V. 20. N 3. P. 293–313. <https://doi.org/10.1007/s10700-020-09344-7>
 35. Awadallah M.A., Al-Betar M.A., Bolaji A.L., Alsukni E.M., Al-Zoubi H. Natural selection methods for artificial bee colony with new versions of onlooker bee // *Soft Computing*. 2019. V. 23. N 15. P. 6455–6494. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3299-2>
 29. Karaboga D., Gorkemli B., Ozturk C., Karaboga N. A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications. *Artificial Intelligence Review*, 2014, vol. 42, no. 1, pp. 21–57. <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9328-0>
 30. Karaboga D., Akay B. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence. *Artificial Intelligence Review*, 2009, vol. 31, no. 1-4, pp. 61–85. <https://doi.org/10.1007/s10462-009-9127-4>
 31. Bose A., Mali K. Fuzzy-based artificial bee colony optimization for gray image segmentation. *Signal, Image and Video Processing*, 2016, vol. 10, no. 6, pp. 1089–1096. <https://doi.org/10.1007/s11760-016-0863-z>
 32. Wang P., Shi H., Yang X., Mi J. Three-way k -means: integrating k -means and three-way decision. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2019, vol. 10, no. 10, pp. 2767–2777. <https://doi.org/10.1007/s13042-018-0901-y>
 33. Kumar Yu., Shaoo G. A two-step artificial bee colony algorithm for clustering. *Neural Computing and Applications*, 2017, vol. 28, no. 3, pp. 537–551. <https://doi.org/10.1007/s00521-015-2095-5>
 34. Su Z., Zhou H., Hao Y. Evidential evolving C-means clustering method based on artificial bee colony algorithm with variable strings and interactive evaluation mode. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2021, vol. 20, no. 3, pp. 293–313. <https://doi.org/10.1007/s10700-020-09344-7>
 35. Awadallah M.A., Al-Betar M.A., Bolaji A.L., Alsukni E.M., Al-Zoubi H. Natural selection methods for artificial bee colony with new versions of onlooker bee. *Soft Computing*, 2019, vol. 23, no. 15, pp. 6455–6494. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3299-2>

Автор

Донецкая Юлия Валерьевна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57200259228](https://orcid.org/0000-0001-5293-5025), <https://orcid.org/0000-0001-5293-5025>, donetskaya_julia@mail.ru

Author

Julia V. Donetskaya — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57200259228](https://orcid.org/0000-0001-5293-5025), <https://orcid.org/0000-0001-5293-5025>, donetskaya_julia@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2022
Одобрена после рецензирования 17.06.2022
Принята к печати 29.07.2022

Received 15.02.2022
Approved after reviewing 17.06.2022
Accepted 29.07.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»