

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-969-976

УДК 004:658.011.56

Метод формирования и использования цифрового паспорта электронного изделия на предприятиях приборостроительной отрасли

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. Такая интеграция выполняется на конкретном предприятии и основана на онтологическом подходе, который порождает большое количество однотипных результатов в виде цифровых паспортов продукции. Работа направлена на реализацию нового единого подхода к интеграции автоматизированных систем. **Метод.** Предлагаемый подход основан на формировании обобщенных проектно-производственных процедур и видов данных об изделии, формируемых средствами систем управления. Последовательность этих процедур определяет деятельность предприятия на этапах жизненного цикла. Результатом процедур служит построение онтологической модели изделия для приборостроительной отрасли в целом. Применение модели на каждом конкретном предприятии возможно при формировании требований к содержанию паспорта и к проектным решениям, заданным вербально. На первом этапе реализации метода выполняется разметка элементов базовой онтологии в соответствии с решаемой задачей. Сформированные элементы онтологии определяют содержание цифрового паспорта или генерируемое проектное решение. Это связано с автоматизацией управления проектно-производственными процедурами и данными об изделии, которые считаются целесообразными на конкретном предприятии. На втором этапе производится извлечение субонтологии из базовой онтологии. На заключительном этапе выполняется извлечение субонтологии для генерации искомого проектного решения. **Основные результаты.** Представлены этапы выполнения метода разметки базовой онтологии, а также извлечения субонтологии с целью формирования содержания цифрового паспорта или генерации проектного решения. **Практическая значимость.** Рассмотренное решение может быть реализовано на предприятиях приборостроительной отрасли, которые используют автоматизированные системы проектирования. Метод позволяет разработать сигнатуры и семантики унифицированных сервисов для применения цифрового паспорта.

Ключевые слова

информационная поддержка, жизненный цикл, цифровой паспорт, проектное решение

Ссылка для цитирования: 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. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-969-976

The method of forming and using a digital passport for an electronic product at enterprises of the instrument-making industry

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 in enterprises provides information support for the stages of the product life cycle and electronic interaction between employees in performing their work. Typically, this integration is carried out on a

specific enterprise and is based on an ontological approach. This generates many similar results in the form of digital product passports. The proposed work is aimed at implementing a new approach to the integration of automated systems. It is based on the formulation of generalized design and production procedures and types of product data generated through control systems. The sequence of these procedures determines the activities of the enterprise at the stages of the life cycle. This results in an ontological model of a product for the instrument-making industry. The application of the model at each specific enterprise is possible if the requirements for the content of the passport and design solutions are provided verbally. The proposed method is implemented in several stages. At the first stage, the elements of the basic ontology are marked up. The content of its elements depends on the problem that is being solved. At the same time, ontology elements are formed that determine the content of a digital passport or a generated design solution. This is due to the automation of the management dealing with design and production procedures, and product data, which are considered appropriate in a particular enterprise. Consequently, design solutions based on a digital passport must be generated considering the requirements of specific enterprises. To form the content of a digital passport of an enterprise, subontology is extracted from the basic ontology at the second stage. At the final stage, subontology is extracted to generate the desired design solution. The study proposes the sequences of actions to mark up the basic ontology, as well as to extract subontology to form the content of a digital passport or generate a design solution. The described solution can be implemented at enterprises of the instrument-making industry, which include automated design systems. The presented method allows the development of signatures and semantics of unified services for the use of a digital passport.

Keywords

information support, life cycle, digital passport, design solution

For citation: 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). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-969-976

Введение

Интеграция автоматизированных систем — одна из задач, решение которой обеспечивает информационную поддержку этапов жизненного цикла электронного изделия на предприятиях и электронное взаимодействие между их сотрудниками при исполнении договоров с заказчиками. Способы обеспечения информационной поддержки к настоящему времени достаточно исследованы.

В работе [1] предложена базовая модель данных об изделии, формируемая в едином информационном пространстве предприятия. Модель позволяет сформировать образ данных об изделии без учета структуры и особенностей производственных процессов конкретного предприятия. Однако представлена лишь небольшая часть проектно-производственных процессов предприятия, а именно — конструкторско-технологическая подготовка производства без учета других выполняемых процессов, которые оказывают влияние на качество выпускаемой предприятием продукции.

В [2] описано применение инструментальных средств информационной поддержки эффективного технического обслуживания и ремонта судового оборудования. В работе предложено формирование электронного журнала в виде интерактивного электронного технического руководства, где фиксируются описания неисправностей, предварительные требования (данные об изделии, рабочие и другие, процедуры поиска неисправностей, диаграммы процедур поиска, требования после завершения работ. Существенное преимущество данного подхода — создание единой базы знаний об отказах и сбоях оборудования с возможностью своевременного доступа к информации любому участнику жизненного цикла изделия. Однако электронный журнал не содержит явных ассоциативных связей с данными конструкторско-технологической подготовки производства и самого производства. Указанная связь является косвенной и выражена текстовыми формулировками

вида «ошибка в конструкторской документации» или «производственная ошибка» и т. п. Это не позволяет с уверенностью утверждать (без дополнительных поисков, требующих временных затрат) то, какие версии документации и данных использовались в процессе производства, какие нарушения и допущения были при этом выявлены, поскольку они не вносятся в паспорт.

В [3] предложена интегрированная модель логистической поддержки, основанная на унифицированном подходе, согласно которому объекты некоторых систем управления представлены в виде различных элементов модели и связей между ними. Однако содержание модели не учитывает атрибуты, характеризующие объекты систем, что не позволяет в полной мере описывать данные об изделии, подлежащие учету в рамках логистической поддержки.

В работах [4, 5] основу решений задач составляет онтологический подход. Его применение аккумулирует знания на этапах жизненного цикла продукции, реализует оперативный доступ к анализируемой и обрабатываемой информации, а также позволяет извлекать и формализовать знания средствами систем поддержки принятия решений.

В то же время для обеспечения электронного взаимодействия требуется согласование структур и форматов передаваемых данных, что подтверждается публикациями в научных и практико-ориентированных журналах.

Работа [6] посвящена описанию этапов создания единого виртуального электронного паспорта сложного наукоемкого изделия на примере космической ракеты-носителя «Союз-2». Концептуально представлены основные принципы его создания и использования на этапах жизненного цикла с применением автоматизированной информационно-аналитической системы собственной разработки предприятия. В дополняющей ее работе [7] показано, что формирование содержания паспорта выполняется на стадиях проектирования, производства, испытаний и эксплуатации, и используется

для организации взаимодействия между исполнителем и заказчиком работ, а также эксплуатирующими организациями.

Таким образом, на основании вышеизложенного, логично заключить, что задача интеграции различных систем зачастую связана с созданием собственной разработки предприятия, основанной на онтологическом подходе, а все существующие решения являются однотипными при отсутствии единого подхода для отрасли в целом. Результатом интеграции является среда, образованная совокупностью систем — ERP (Enterprise Resource Planning), PDM/PLM (Product Data Management/Product Lifecycle Management), MES (Manufacturing Execution System) и/или QMS (Quality Management System) — функциональность которой позволяет формировать содержание цифрового паспорта изделия. Паспорт представляет собой совокупность проектно-производственных процедур и данных об изделии, связанных между собой и создаваемых на этапах жизненного цикла.

Анализ работ из практико-ориентированных журналов позволяет сформулировать перечень обобщенных проектно-производственных процедур, выполняемых на этапах жизненного цикла изделия и характерных для любого предприятия приборостроительной отрасли. Причем в паспорте учитываются только те процедуры, результатами выполнения которых являются данные об изделии в виде информационных объектов систем. Объекты описываются содержательной и реквизитной частями. Содержательной частью является файл, созданный средствами любой системы автоматизированного проектирования или среды разработки, а реквизитной частью — перечень атрибутов в соответствии с видом эксплуатируемой на предприятии системы из числа перечисленных. Это позволяет представить содержание паспорта в виде сервис-ориентированной модели [8], разработанной на основе онтологического подхода, для хранения информации [9, 10], прогнозирования [10, 11], а также оптимизации свойств и поведения [11, 12] изделий, выпускаемых приборостроительной отраслью. Результатом разработки модели является базовая онтология цифрового паспорта, на основе которого любое предприятие отрасли может решать следующие задачи. Первая задача — формирование содержания паспорта для организации электронного взаимодействия между участниками жизненного цикла продукции и создания цифровых двойников изделий. Вторая задача — использование содержания паспорта для принятия проектных решений.

Реализация указанных задач составляет суть этапов метода, разработке которого и посвящена настоящая работа.

Этапы метода формирования и использования цифрового паспорта

Пусть исходными данными для метода 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 [13], а также

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

В настоящей работе онтология \mathbf{O} — это кортеж, состоящий из множества классов (\mathbf{T}), множества атрибутов (\mathbf{A}), матрицы сопоставлений (\mathbf{P}) и матрицы смежности (\mathbf{R}) [14], заданный в виде:

$$\mathbf{O} = \langle \mathbf{T}, \mathbf{A}, \mathbf{P}, \mathbf{R} \rangle, \quad (1)$$

где $\mathbf{T} = (t_1, t_2, \dots, t_k)$ — множество k классов онтологии, определяющих проектно-производственные процедуры и информационные объекты на всех этапах жизненного цикла электронного изделия;

$\mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_p)$ — множество p атрибутов, описывающих классы онтологии в системах управления;

$\mathbf{P} = |p_{ij}|$ — матрица сопоставлений атрибутов классам онтологии,

где $p_{ij} = \begin{cases} \langle t_i, a_j \rangle, & \text{если атрибут } a_j \text{ описывает класс } t_i \\ \langle 0, 0 \rangle, & \text{если атрибут } a_j \text{ не описывает класс } t_i \end{cases}$,
 $i = \overline{1, k}, j = \overline{1, p}$;

$\mathbf{R} = |r_{ij}|$ — матрица смежности, описывающая взаимосвязи между классами,

где $r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если классы } t_i \text{ и } t_j \text{ связаны между собой} \\ 0, & \text{если классы } t_i \text{ и } t_j \text{ не связаны между собой} \end{cases}$,
 $i, j = \overline{1, k}$.

Тогда для любого предприятия отрасли решение задачи формирования содержания цифрового паспорта заключается в определении таких элементов множеств \mathbf{T} и \mathbf{A} , а также матриц \mathbf{P} и \mathbf{R} , которые удовлетворяют требованиям \mathbf{RS} и образуют субонтологию $\overline{\mathbf{O}} \subseteq \mathbf{O}$, такую что

$$\overline{\mathbf{O}} = \langle \overline{\mathbf{T}}, \overline{\mathbf{A}}, \overline{\mathbf{P}}, \overline{\mathbf{R}} \rangle, \quad (2)$$

где $\overline{\mathbf{T}} \subseteq \mathbf{T}$ — множество классов онтологии, определяющих содержание цифрового паспорта на заданном предприятии; $\overline{\mathbf{A}} \subseteq \mathbf{A}$ — множество атрибутов, описывающих классы онтологии в системах управления, эксплуатируемых на заданном предприятии; $\overline{\mathbf{P}} \subseteq \mathbf{P}$ — матрица сопоставлений атрибутов классам в цифровом паспорте изделия; $\overline{\mathbf{R}} \subseteq \mathbf{R}$ — матрица смежности, описывающая отношения между классами в цифровом паспорте изделия.

В свою очередь, решение задачи использования содержания цифрового паспорта заключается в определении таких элементов множеств $\overline{\mathbf{T}}^*$ и $\overline{\mathbf{A}}^*$, а также матриц $\overline{\mathbf{P}}^*$ и $\overline{\mathbf{R}}^*$, которые удовлетворяют требованиям \mathbf{PR} и образуют субонтологию $\overline{\mathbf{O}}^* \subseteq \mathbf{O}$, такую что

$$\overline{\mathbf{O}}^* = \langle \overline{\mathbf{T}}^*, \overline{\mathbf{A}}^*, \overline{\mathbf{P}}^*, \overline{\mathbf{R}}^* \rangle, \quad (3)$$

где $\overline{\mathbf{T}}^* \subseteq \overline{\mathbf{T}}$ — множество классов онтологии для искомого проектного решения; $\overline{\mathbf{A}}^* \subseteq \overline{\mathbf{A}}$ — множество атрибутов, описывающих классы онтологии для искомого проектного решения; $\overline{\mathbf{P}}^* \subseteq \overline{\mathbf{P}}$ — матрица сопоставлений атрибутов классам в искомом проектном решении; $\overline{\mathbf{R}}^* \subseteq \overline{\mathbf{R}}$ — матрица смежности, описывающая искомое проектное решение.

Следовательно, решение обеих задач сводится к построению субонтологий. Согласно работам [14–18] построение субонтологии соответствует операции извлечения из базовой онтологии и заключается в следующем подходе.

1. Разметка элементов множества классов (**T**), множества атрибутов (**A**), матрицы сопоставлений (**P**) и матрицы смежности (**R**) базовой онтологии. Метками отмечаются элементы множеств и матриц из модели: *selected(S)* и *deselected(D)*, которые соответственно однозначно подлежат и не подлежат извлечению из базовой онтологии; *unselected(U)*, которые подлежат извлечению из базовой онтологии только при необходимости.
2. Формирование подмножества базовой онтологии. Подмножество базовой онтологии — это часть базовой онтологии, элементы множеств **T** и **A**, матриц **P** и **R** которой размечены меткой *S* [14].
3. Формирование полной и достоверной субонтологии. Полная и достоверная субонтология — это онтология, состоящая из взаимосвязанных элементов, которые отражают ее содержание. Для этого онтология представляется графом онтологии, вершины которой — элементы множеств **T** и **A**, а ребра — элементы матриц **P** и **R**, что позволяет использовать для формирования субонтологии методы теории графов [14].

Заметим, что в настоящей работе базовая онтология зависит от решаемой задачи. Если решается задача формирования содержания цифрового паспорта, то базовая онтология представлена моделью (1). Если решается задача использования цифрового паспорта — генерации проектного решения, то базовая онтология представлена моделью (2). С учетом этого разрабатываемый метод состоит из следующих этапов.

1. Разметка элементов базовой онтологии. В отличие от описанного ранее подхода разметке подлежат элементы множеств **T** и **A** ($\overline{\mathbf{T}}$ и $\overline{\mathbf{A}}$), поскольку именно они определяют содержание искомой субонтологии, обеспечивая ее полноту. Если решается задача формирования содержания цифрового паспорта, то разметку элементов множеств **T** и **A** выполняют на основе мнения участников экспертной группы, состоящей из руководителей предприятия и начальников подразделений. Результатом разметки являются множества \mathbf{T}^U и \mathbf{A}^U , содержащие элементы множеств **T** и **A** с меткой *U*, и множества \mathbf{T}^S , содержащего элементы множества **T** с меткой *S*. Если же решается задача генерации проектного решения, то разметку элементов множеств $\overline{\mathbf{T}}$ и $\overline{\mathbf{A}}$ выполняют автоматизированным способом на основе анализа значений элементов матрицы **P**. Ее результат — формирование множеств $\overline{\mathbf{T}}^S$ и $\overline{\mathbf{A}}^S$, состоящих из элементов множеств $\overline{\mathbf{T}}$ и $\overline{\mathbf{A}}$ с меткой *S*.
2. Извлечение субонтологии для формирования содержания цифрового паспорта изделия на предприятии. Этап означает формирование элементов множеств и матриц модели (2), учитывая результаты разметки и представление базовой онтологии в виде графа онтологии.

3. Извлечение субонтологии для генерации искомого проектного решения. Этап означает формирование элементов множеств и матриц модели (3), учитывая результаты разметки и представление базовой онтологии в виде графа онтологии.

Опишем вариант реализации каждого из них подробнее.

Разметка элементов базовой онтологии

Для решения задачи формирования содержания цифрового паспорта на предприятии этап разметки содержит следующую последовательность действий.

1. Опрос мнений экспертов для определения соответствия элементов множеств **T** и **A** требованиям **RS**. Каждый эксперт *q* строит матрицу вида

$$\mathbf{X}^q = |x_{ij}^q| = \begin{pmatrix} X_1^q \\ \vdots \\ X_k^q \end{pmatrix}; i = \overline{1, k}; j = \overline{1, b},$$

где *j*-му столбцу соответствует пара <этап жизненного цикла — вид используемой системы управления>, а *i*-ой строке — перечень классов онтологии из множества **T**; $x_{ij}^q = 1$, если класс онтологии *i* выполняется или формируется на заданном этапе жизненного цикла *j*; $x_{ij}^q = 0$ в ином случае.

Кроме этого, при выборе экспертами того или иного вида системы управления формируется множество

$$\mathbf{A}^U = |a_n^U|; n = \overline{1, p}; \mathbf{A}^U \subseteq \mathbf{A},$$

где *p* — число атрибутов, описывающих классы онтологии; $a_n^U = a_n$, если атрибут *n* описывает любой класс онтологии в анализируемом виде системы управления; $a_n^U = 0$ в ином случае.

Простановка метки *U* на элементах множества **A** объясняется тем, что в базовой онтологии элементами матрицы **P** четко заданы соответствия между классами и описываемыми их атрибутами. На этапе разметки можно определить только проектно-производственные процедуры и информационные объекты, описанные атрибутами, соответствующими этой системе. Это связано с эксплуатируемой на предприятии системой управления. Уточнение используемых атрибутов происходит при построении субонтологии на следующем этапе.

2. Объединение мнений экспертов. Создается таблица распределений, каждый элемент которой соответствует оценке эксперта, выставленной на шаге ранее.

По данным из таблицы вычисляется коэффициент конкордации для оценки согласованности мнений экспертов [19]:

$$W = \frac{12S(\Delta^2)}{q^2(k^3 - k) - q \sum_{j=1}^q \sum_{l=1}^{L_j} (z_l^3 - z_l)}; W \in [0, 1],$$

$$S(\Delta^2) = \sum_{i=1}^k \Delta_i^2,$$

Таблица. Таблица распределений
Table. Distribution table

Класс онтологии	Оценки экспертов				Сумма $S(X_i)$
	1	2	...	q	
t_1	X_1^1	X_1^2	...	X_1^q	$S(X_1)$
t_2	X_2^1	X_2^2	...	X_2^q	$S(X_2)$
...	X_i^j
t_k	X_k^1	X_k^2	...	X_k^q	$S(X_k)$

$$\Delta^2 = S(X_i) - \frac{1}{2}q(k+1), i = \overline{1, k},$$

$$S(X_i) = \sum_{j=1}^q X_i^j, i = \overline{1, k},$$

где Δ^2 — отклонение суммы i -го класса от среднего арифметического сумм всех классов; L_j — количество групп связанных значений, полученных экспертом j ; z_l — количество одинаковых значений в группе l .

Известно, что чем больше значение коэффициента W , тем выше согласованность экспертов. Если мнения согласованы, то выставленные ими оценки необходимо обобщить с использованием правила большинства — мажоритарной выборки. Если же мнения экспертов не согласованы, проводится повторная оценка.

3. Формирование элементов множеств $T^S \subseteq T$ и $T^U \subseteq T$ на основе обобщения мнений экспертов.

В настоящей работе элементы множества $T^S \subseteq T$ — элементы множества T , которые выбраны наибольшим числом экспертов. Значение «наибольшего» числа определяется на предприятиях самостоятельно любым из известных способов, например, одним из описанных в работах [20–24].

Элементы множества $T^U \subseteq T$ — элементы множества T , которые выбраны меньшим числом экспертов.

Элементы, которые не были выбраны ни одним экспертом, из дальнейшего рассмотрения исключаются.

Для решения задачи генерации проектного решения этап разметки предложено реализовать формированием базы правил для проверки соответствия элементов онтологии (2) требованиям RP .

Проверке подвергается каждый элемент множества \overline{T} и описывающие его элементы множества \overline{A} согласно содержанию матрицы \overline{P} .

$$R_i: IF(rp_1 \equiv \overline{p}_{i1}) THEN ((\overline{t}_i^S = \overline{t}_i) AND (\overline{a}_1^S = \overline{a}_1)) OR$$

$$IF(rp_2 \equiv \overline{p}_{i2}) THEN ((\overline{t}_i^S = \overline{t}_i) AND (\overline{a}_2^S = \overline{a}_2)) OR \dots OR$$

$$IF(rp_p \equiv \overline{p}_{ip}) THEN ((\overline{t}_i^S = \overline{t}_i) AND (\overline{a}_p^S = \overline{a}_p)); i = \overline{1, k},$$

где $\overline{p}_{ij} \in \overline{P} (i = \overline{1, k}; j = \overline{1, p})$ — элементы матрицы распределения, созданные при построении субонтологии в виде содержания цифрового паспорта; $\overline{t}_i \in \overline{T}, \overline{a}_j \in \overline{A}$ — элементы множеств \overline{T} и \overline{A} из модели (2), анализируемые для генерации проектного реше-

ния; $\overline{t}_i^S \in \overline{T}^S (\overline{T}^S \subseteq \overline{T}), \overline{a}_j^S \in \overline{A}^S (\overline{A}^S \subseteq \overline{A})$ — элементы множеств \overline{T} и \overline{A} из модели (2) с меткой S .

Элементы, которые не были выбраны при проверке, из дальнейшего рассмотрения исключаются.

Извлечение субонтологии для формирования содержания цифрового паспорта электронного изделия на предприятии

Полученные результаты разметки элементов множеств $T^S \subseteq T, T^U \subseteq T$ и $A^U \subseteq A$ предложено использовать для выполнения следующих действий.

1. Формирование элементов матрицы $\overline{P} \subseteq P$ (с учетом работ [15, 25, 26]):

$$\overline{P} = [\overline{p}_{ij}]; i = \overline{1, k}, j = \overline{1, p},$$

где

$$\overline{p}_{ij} = \begin{cases} \langle t_i, a_j \rangle, ((t_i^S \in T^S) \parallel (t_i^U \in T^U)) \& (a_j^U \in A^U) \& (p_{ij} = \langle t_i, a_j \rangle) \\ \langle 0, 0 \rangle, ((t_i^S \notin T^S) \& (t_i^U \notin T^U)) \parallel (a_j^U \in A^U) \parallel (p_{ij} = \langle 0, 0 \rangle) \end{cases}$$

2. Формирование элементов множества \overline{T} на основе результатов формирования элементов матрицы \overline{P} :

$$\overline{t}_i \in \overline{T}, i = \overline{1, k},$$

$$\text{где } \overline{t}_i = \begin{cases} t_i^S, & (t_i^S \in T^S) \& (p_{ij} = \langle t_i, a_j \rangle) \\ t_i^U, & (t_i^U \in T^U) \& (p_{ij} = \langle t_i, a_j \rangle) \\ 0, & ((t_i^S \in T^S) \parallel (t_i^U \in T^U)) \parallel (p_{ij} = \langle 0, 0 \rangle) \end{cases}$$

3. Формирование элементов множества \overline{A} на основе результатов формирования элементов матрицы \overline{P} :

$$\overline{a}_j \in \overline{A}, j = \overline{1, p},$$

$$\text{где } \overline{a}_j = \begin{cases} a_j^U, & (a_j^U \in A^U) AND (p_{ij} = \langle t_i, a_j \rangle) \\ 0, & (a_j^U \in A^U) OR (p_{ij} = \langle 0, 0 \rangle) \end{cases}$$

4. Формирование элементов матрицы $\overline{R} \subseteq R$ (с учетом работ [15, 25, 26]):

$$\overline{R} = [\overline{r}_{ij}]; i, j = \overline{1, k},$$

$$\text{где } \overline{r}_{ij} = \begin{cases} 1, & ((\overline{t}_i \in \overline{T}) \& (\overline{t}_j \in \overline{T})) \& (r_{ij} = 1) \\ 0, & ((\overline{t}_i \notin \overline{T}) \parallel (\overline{t}_j \notin \overline{T})) \parallel (r_{ij} = 0) \end{cases}$$

Полученный результат — искомая онтология цифрового паспорта электронного изделия на предприятии, которую можно использовать для формирования проектных решений в соответствии с требованиями RP .

Извлечение субонтологии для генерации проектных решений

Полученные результаты разметки элементов множеств $\bar{T}^S \subseteq \bar{T}$, $\bar{T}^U \subseteq \bar{T}$ и $\bar{A}^U \subseteq \bar{A}$ предложено использовать для выполнения действий, аналогичных действиям по извлечению субонтологии для формирования содержания паспорта изделия.

1. Формирование элементов множеств $\bar{T}^* \subseteq \bar{T}$, $\bar{A}^* \subseteq \bar{A}$ и матрицы $\bar{P}^* \subseteq \bar{P}$ на основе проверки правил разметки базовой онтологии, заданной моделью (2).

$IF(R_i = true) THEN (\bar{p}_{ij}^* = \bar{p}_{ij}) AND (\bar{t}_i^* = \bar{t}_i) AND (\bar{a}_j^* = \bar{a}_j)$,

где $\bar{p}_{ij}^* \in \bar{P}^*$; $\bar{t}_i^* \in \bar{T}^*$ и $\bar{a}_j^* \in \bar{A}^*$ для $i = \overline{1, k}$ и $j = \overline{1, p}$.

2. Формирование элементов матрицы $\bar{R}^* \subseteq \bar{R}$ (с учетом работ [15, 25, 26]):

$$\bar{R}^* = \{\bar{r}_{ij}^* | i, j = \overline{1, k}\}$$

$$\text{где } \bar{r}_{ij}^* = \begin{cases} 1, & ((\bar{t}_i^* \in \bar{T}^*) \& (\bar{t}_j^* \in \bar{T}^*)) \& (\bar{r}_{ij} = 1) \\ 0, & ((\bar{t}_i^* \notin \bar{T}^*) \vee (\bar{t}_j^* \notin \bar{T}^*)) \vee (\bar{r}_{ij} = 0) \end{cases}$$

Полученные элементы модели (3) содержат искомое проектное решение, удовлетворяющее предъявляемым к нему требованиям.

Пример реализации метода

Для примера работы предложенного метода рассмотрим предприятие, деятельность которого связана с разработкой и выпуском блоков и модулей на основе печатных плат. Причем разработкой и выпуском печатных плат занимаются контрагенты.

Пусть на рассматриваемом предприятии принято решение об эксплуатации двух систем — PLM Windchill и «Галактика».

В результате разметки базовой онтологии участниками экспертной группы определены элементы множеств. Для краткости представим часть элементов, достаточных для построения фрагмента паспорта.

Элементы множества классов, однозначно извлекаемые в субонтологию (множество $T^S \subseteq T$, $t_i^S \in T^S$, где t_i^S , $i = \overline{1, k1}$), принимают следующие значения: подготовка, регистрация и подписание договора с заказчиком (объект «Документ» вида «Договор с заказчиком»); регистрация и подписание договоров с соисполнителями (объект «Документ» вида «Договор с соисполнителем»); управление актуализацией данных о комплектующих изделиях (объекты видов «Изделие» — «Деталь», «CAD-Документ» — «Модель детали»); разработка и изменение конструкции изделия (объекты видов «Изделие» — «Деталь», «CAD-Документ» — «Модель детали», «Изделие» — «Сборочная единица», «CAD-Документ» — «Модель сборочной единицы», «Документ» — «Паспорт», «Документ» — «Таблица проверок», «Документ» — «Спецификация», «Документ» — «Инструкция...»); разработка и изменение программного обеспечения для изделия (объекты видов «Изделие» — «Компонент», «Документ» — «Текст программы»). Для простоты предположим, что дополнительные элементы множества классов не были определены.

Элементы множества атрибутов классов, извлекаемые в субонтологию при необходимости (множество $A^U \subseteq A$, $a_j^U \in A^U$, где a_j^U , $j = \overline{1, p1}$), принимают следующие значения: номер договора; наименование заказчика; реквизиты заказчика; наименование соисполнителя; реквизиты соисполнителя; обозначение; наименование; вид изделия; версия; состояние; ограничительный признак; количество листов; первичная применимость; габариты изделия; масса изделия; качественные характеристики изделия.

Результатом выполнения действий формирования содержания цифрового паспорта будет следующая последовательность:

1. Формирование элементов $\bar{p}_{ij} \in \bar{P}$; $i = \overline{1, k1}$, $j = \overline{1, p1}$ (перечислены некоторые элементы, значения которых отличны от нуля):

$\bar{p}_{21} = \langle \text{объект «Документ» вида «Договор с заказчиком», номер договора} \rangle$;

$\bar{p}_{22} = \langle \text{объект «Документ» вида «Договор с заказчиком», наименование заказчика} \rangle$;

...

$\bar{p}_{k1,6} = \langle \text{объект «Документ» вида «Текст программы», обозначение} \rangle$;

$\bar{p}_{k1,7} = \langle \text{объект «Документ» вида «Текст программы», наименование} \rangle$;

$\bar{p}_{k1,9} = \langle \text{объект «Документ» вида «Текст программы», версия} \rangle$ и др.

2. Формирование элементов множеств \bar{T} и \bar{A} . Так как при формировании элементов матрицы \bar{P} были использованы все элементы множеств T^S и A^U , то $t_i = t_i^S$, $i = \overline{1, k1}$ и $a_j = a_j^U$, $j = \overline{1, p1}$.

3. Формирование элементов $\bar{r}_{ij} \in \bar{R}$; $i, j = \overline{1, k1}$:

$\bar{r}_{11} = 0$ (класс «подготовка, регистрация и подписание договора с заказчиком» не связан сам с собой);

$\bar{r}_{12} = 1$ (класс «подготовка, регистрация и подписание договора с заказчиком» связан с классом «объект «Документ» вида «Договор с заказчиком»);

$\bar{r}_{21} = 1$ (дублирует значение \bar{r}_{12});

$\bar{r}_{34} = 1$ (класс «регистрация и подписание договоров с соисполнителями» связан с классом «объект «Документ» вида «Договор с соисполнителем») и др.

Результатом выполнения указанной последовательности является цифровой паспорт (для рассматриваемого примера — фрагмент паспорта) электронного изделия, содержание которого соответствует требованиям предприятия и базовой онтологии. На первом этапе его можно использовать для генерации различных проектных решений, а в дальнейшем — для обмена электронными данными с контрагентами и создания цифровых двойников блоков и модулей.

Заключение

В работе приведен метод формирования и использования цифрового паспорта на предприятиях приборостроительной отрасли, основанный на онтологическом подходе. Онтология представлена кортежем, элементами которого являются множества классов и атрибутов классов онтологии, а также матрицы распределения и смежности. Это позволило определить две задачи, ре-

шаемые методом — задачу формирования содержания цифрового паспорта на предприятии и задачу генерации проектного решения на основе предъявляемых требований. Обе задачи сводятся к выполнению операции извлечения субонтологии из базовой онтологии, что означает выполнение нескольких этапов.

На первом этапе производится разметка элементов базовой онтологии на основе анализа соответствия элементов множеств классов и атрибутов классов онтологии предъявляемым требованиям. Результатом являются: элементы множеств, однозначно извлекаемые в субонтологию, и дополнительные элементы множеств,

извлекаемые при необходимости. Второй этап заключается в извлечении субонтологии для формирования содержания цифрового паспорта, проиллюстрированный на примере предприятия. Третий этап аналогичен второму и содержит действия по извлечению субонтологии для генерации проектного решения.

Полученные результаты планируется реализовать в виде алгоритма, что позволит разработать сигнатуры и семантики унифицированных сервисов для применения цифрового паспорта на предприятиях приборостроительной отрасли.

Литература

1. Чурилин С.В., Хаймович И.Н. Базовая концептуальная модель данных конструкторско-технологической подготовки производства в едином информационном пространстве предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 4. С. 57–63. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-4-57-63>
2. Янченко А.Ю. Информационная поддержка эффективного технического обслуживания и ремонта судового оборудования // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2020. Т. 9. № 3(32). С. 413–416. <https://doi.org/10.26140/anie-2020-0903-0099>
3. Короленко В.В., Грибанов В.В., Дорошенко А.Б. Информационное обеспечение анализа логистической поддержки изделий авиационной техники // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 6. С. 83–93.
4. Охтилев П.А. Интеллектуальный комплекс автоматизированного проектирования систем информационно-аналитической поддержки жизненного цикла сложных объектов // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 11. С. 963–971. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-11-963-971>
5. Афанасьев В.Б. Онтологическое проектирование автоматизированной информационной системы поддержки качества продукции предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 10. С. 12–22.
6. 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.
7. Охтилев М.Ю., Ключарев А.А., Охтилев П.А., Зянчурин 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>
8. Podovano A., Longo F., Nicoletti L., Mirabelli G. A digital twin based service oriented application for a 4.0 knowledge navigation in the smart factory // IFAC-PapersOnLine. 2018. V. 51. N 11. P. 631–636. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.389>
9. Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. V. 94. N 9-12. P. 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
10. Uhlemann T.H.-J., Lehmann Ch., Steinhilper R. The digital twin: realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0 // Procedia CIRP. 2017. V. 61. P. 335–340. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>
11. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters. 2015. V. 3. P. 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
12. Stark R., Kind S., Neumeyer S. Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2017. V. 66. N 1. P. 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>

References

1. Churilin S.V., Khaimovich I.N. Basic conceptual model of data of design and technological preparation of production in the unified information space of the enterprise. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 57–63. (in Russian). <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-4-57-63>
2. Yanchenko A.Yu. Information support for effective maintenance and repair of ship equipment. *Azimuth of scientific research: economics and administration*, 2020, vol. 9, no. 3(32), pp. 413–416. (in Russian). <https://doi.org/10.26140/anie-2020-0903-0099>
3. Korolenko V.V., Griбанov V.V., Doroshenko A.B. Informational basis for logistic support analysis for aircraft. *Aerospace forces. Theory and Practice*, 2018, no. 6, pp. 83–93. (in Russian)
4. Okhtilev P.A. Intellectual complex for automated design of information and analytical systems support of complex objects life cycle. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol. 61, no. 11, pp. 963–971. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-11-963-971>
5. Afanasiev V. B. Ontological design of an automated information system for supporting the quality of products of the enterprise. *Izvestiya Tula State University*, 2020, no. 10, pp. 12–22. (in Russian)
6. 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)
7. Okhtilev M.Yu., Klyucharev 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, no. 11, pp. 1012–1019. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-11-1012-1019>
8. Podovano A., Longo F., Nicoletti L., Mirabelli G. A digital twin based service oriented application for a 4.0 knowledge navigation in the smart factory. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 631–636. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.389>
9. Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, no. 9-12, pp. 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
10. Uhlemann T.H.-J., Lehmann Ch., Steinhilper R. The digital twin: realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 61, pp. 335–340. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>
11. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2015, vol. 3, pp. 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
12. Stark R., Kind S., Neumeyer S. Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2017, vol. 66, no. 1, pp. 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>
13. 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>

13. 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>
14. Flahive A., Taniar D., Rahayu W., Apduhan B.O. Ontology tailoring in the Semantic Grid // *Computer Standards & Interfaces*. 2009. V. 31. N 5. P. 870–885. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2008.03.016>
15. Flahive A., Taniar D., Rahayu W. Ontology as a Service (OaaS): extracting and replacing sub-ontologies on the cloud // *Cluster Computing*. 2013. V. 16. N 4. P. 947–960. <https://doi.org/10.1007/s10586-012-0231-x>
16. Flahive A., Taniar D., Rahayu W., Apduhan B.O. A methodology for ontology update in the semantic grid environment // *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2015. V. 27. N 4. P. 782–808. <https://doi.org/10.1002/cpe.2841>
17. Flahive A., Taniar D., Rahayu W., Apduhan B.O. Ontology expansion: appending with extracted sub-ontology // *Logic Journal of the IGPL*. 2011. V. 19. N 5. P. 618–647. <https://doi.org/10.1093/jigpal/jzq016>
18. Flahive A., Taniar D., Rahayu W. Ontology as a Service (OaaS): a case for sub-ontology merging on the cloud // *Journal of Supercomputing*. 2013. V. 65. N 1. P. 185–216. <https://doi.org/10.1007/s11227-011-0711-4>
19. Анохин А.Н. Методы экспертных оценок: учебное пособие. Обнинск: ИАТЭ, 1996. 148 с.
20. Сапегина Н.В. Иерархическая структура и весовые коэффициенты в рейтинговой оценке успеваемости // *Мир науки, культуры, образования*. 2011. № 2(27). С. 257–262.
21. Ляковский В.Л., Саркисян Д.А. Метод формирования экспертных групп для оценки предложений по проведению ФППИ // *Компетентность / Competency (Russia)*. 2020. № 3. С. 4–9.
22. Петриченко Г.С., Петриченко В.Г. Методика оценки компетентности экспертов // *Научный журнал КубГАУ*. 2015. № 109(05). С. 80–91.
23. Постников В.М., Спиридонов С.Б. Подход к расчету весовых коэффициентов ранговых оценок экспертов при выборе варианта развития информационной системы // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2013. № 8. С. 395–412. <https://doi.org/10.7463/0813.0580272>
24. Путивцева Н.П., Зайцева Т.В., Пусная О.П., Игрунова С.В., Нестерова Е.В., Калюжная Е.В., Зайцева Е.А. Разработка программной поддержки иерархической многокритериальной процедуры оценки качества экспертов // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. 2016. № 16(237). С. 172–179.
25. 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>
26. 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 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020)*. 2020. P. 9131470. <https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131470>
14. Flahive A., Taniar D., Rahayu W., Apduhan B.O. Ontology tailoring in the Semantic Grid. *Computer Standards & Interfaces*, 2009, vol. 31, no. 5, pp. 870–885. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2008.03.016>
15. Flahive A., Taniar D., Rahayu W. Ontology as a Service (OaaS): extracting and replacing sub-ontologies on the cloud. *Cluster Computing*, 2013, vol. 16, no. 4, pp. 947–960. <https://doi.org/10.1007/s10586-012-0231-x>
16. Flahive A., Taniar D., Rahayu W., Apduhan B.O. A methodology for ontology update in the semantic grid environment. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2015, vol. 27, no. 4, pp. 782–808. <https://doi.org/10.1002/cpe.2841>
17. Flahive A., Taniar D., Rahayu W., Apduhan B.O. Ontology expansion: appending with extracted sub-ontology. *Logic Journal of the IGPL*, 2011, vol. 19, no. 5, pp. 618–647. <https://doi.org/10.1093/jigpal/jzq016>
18. Flahive A., Taniar D., Rahayu W. Ontology as a Service (OaaS): a case for sub-ontology merging on the cloud. *Journal of Supercomputing*, 2013, vol. 65, no. 1, pp. 185–216. <https://doi.org/10.1007/s11227-011-0711-4>
19. Anokhin A.N. *Expert Assessment Methods*. Tutorial. Obninsk, IATE, 1996, 148 p. (in Russian)
20. Sapagina N.V. Hierarchical structure and weighting coefficient in rating of progress. *The world of science, culture and education*, 2011, no. 2(27), pp. 257–262. (in Russian)
21. Lyaskovsky VL, Sarkisyan DA. Expert groups formation method to evaluate proposals for FPPI. *Kompetentnost' (The Competence)*, 2020, no. 3, pp. 4–9. (in Russian)
22. Petrichenko G.S, Petrichenko V.G. Methods of assessing the competence of experts. *Scientific journal of KubSAU*, 2015, no. 109(05), pp. 80–91. (in Russian)
23. Postnikov V.M, Spiridonov S.B. Approach to calculation of weighting coefficients of experts' rank assessments when selecting a development option for an information system. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2013, no. 8, pp. 395–412. (in Russian). <https://doi.org/10.7463/0813.0580272>
24. Putivtceva N.P., Zajceva T.V., Pusnaja O.P., Igrunova S.V., Nesterova E.V., Kaljuzhnaja E.V., Zajceva E.A. Implementation of the program support of the hierarchical multicriteria procedure of the evaluation of experts' quality. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information Technologies*, 2016, no. 16(237), pp. 172–179. (in Russian)
25. 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>
26. 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 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020)*, 2020, pp. 9131470. <https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131470>

Автор

Донецкая Юлия Валерьевна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, 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, orcid.org/0000-0001-5293-5025, donetskaya_julia@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.07.2021
Одобрена после рецензирования 25.09.2021
Принята к печати 30.10.2021

Received 23.07.2021
Approved after reviewing 25.09.2021
Accepted 30.10.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»