

# Математическая модель цифрового паспорта электронного изделия

Ю. В. Донецкая<sup>1</sup>, Е. В. Тушканов<sup>2</sup>, О. В. Кузнецова<sup>3</sup>, А. Ю. Кузнецов<sup>4</sup>, Ю. А. Гатчин<sup>5</sup>

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО)

<sup>1</sup>donetskaya\_julia@mail.ru, <sup>2</sup>johntv@yandex.ru, <sup>3</sup>ovkpbks@yandex.ru, <sup>4</sup>kau1989@mail.ru, <sup>5</sup>gatchin@mail.ifmo.ru

**Аннотация.** Показано, что решение вопросов контроля качества электронного изделия выполняется на различных этапах его жизненного цикла. При этом на каждом из этапов изделие характеризуется набором параметров, анализ значений которых крайне затруднен, поскольку обрабатывается большой объем информации. Это ставит задачу автоматизации процесса сбора и анализа данных об изделии на основе разработки цифрового паспорта изделия. В работе показано, что цифровой паспорт является сложной системой и может быть представлен в виде набора математических моделей, позволяющих проводить ее исследование. Предложена совокупность математических моделей, поставлены задачи по ее исследованию.

**Ключевые слова:** цифровой паспорт; электронное изделие; качество электронного изделия

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные электронные изделия являются достаточно сложной наукоемкой продукцией, обеспечение качества и функциональной надежности которой относится к первоочередным задачам любого предприятия. Это предполагает проведение различных видов испытаний, а также контроль качества продукции в процессе ее сборки и изготовления составных частей. Тем самым формируется база данных, информация из которой может быть использована не только при анализе отказа или сбоя в работе одного определенного изделия, но и непосредственно при разработке любого другого изделия, для которого должны быть обеспечены аналогичные качественные характеристики [1–3].

Очевидно, что требуется хранить данные об электронном изделии, формируемые на каждом этапе его жизненного цикла [4–7]. Одним из способов организации такого хранения является формирование цифрового паспорта изделия, существующие реализации которого предполагают хранение и обработку информации с этапа производства. Однако для управления и повышения качества выпускаемой предприятием продукции необходимо выполнять анализ значений и тех параметров, которые относятся к другим этапам жизненного цикла электронного изделия, начиная с этапа заключения договора [8, 9].

Таким образом, обуславливается необходимость дополнительного исследования и обобщения параметров электронного изделия на различных этапах его жизненного цикла; а также выявления перечней тех параметров, анализ значений которых позволит наиболее эффективно оценить

качество изделия без изготовления его физического прототипа. Причем очевидно, что в зависимости от этапа жизненного цикла указанные перечни будут отличаться друг от друга.

Следовательно, обуславливается постановка задачи по описанию цифрового паспорта, как единой сущности, содержащей комплексную информацию об электронном изделии, формируемую на каждом этапе его жизненного цикла. Поскольку цифровой паспорт является сложной системой, его описание можно представить в виде математической модели, результаты разработки которой изложены в настоящей статье

## II. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗДЕЛИЯ НА ЭТАПАХ ЕГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Итак, жизненный цикл электронного изделия можно представить в виде совокупности этапов, взаимосвязанных между собой (рис. 1) и направленных на формирование и управление данными об изделии – объектов информационной среды предприятия, характеризующихся атрибутами, т.е. параметрами на каждом этапе жизненного цикла [8, 10, 11].

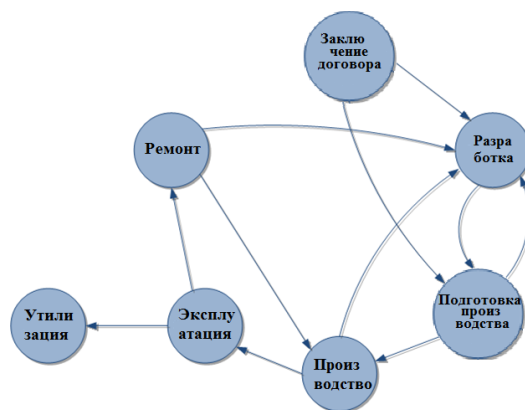


Рис. 1. Взаимосвязь этапов жизненного цикла электронного изделия

Это позволило поставить в соответствие каждому этапу жизненного цикла перечень формируемых данных об изделии, что обеспечивается применением на предприятиях таких систем как PDM (Product Data Management), MES (Manufacturing Execution System), ERP (Enterprise Resource Planning) и EAM (Enterprise Asset Management), образующих информационную среду. Результаты представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1 ЭТАПЫ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА И ФОРМИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ ОБ ИЗДЕЛИИ

Этапы жизненного цикла	Формируемые данные об изделии
Заключение договора	Договор с заказчиком. Сведения о заказчике. Дополнение к договору.
Разработка	Номер заказа, соответствующий договору. Оперативный график работ. Информация о продукции поставщиков Электронная структура изделия в конструктивном представлении. Отработанное замечание. Подписи электронного документооборота.
Подготовка производства	Номер заказа, соответствующий договору. Заявка на запуск производства. Электронная структура изделия в технологическом представлении. Ведомость технологической подготовки производства. Отработанное замечание. Подписи электронного документооборота. Замечание. Решение по замечанию. Отклоненное замечание. Договор с поставщиком. Данные о поставщике. Данные о продукции поставщиков.
Производство	Структура экземпляра изделия. Перечни качественных параметров продукции. Структура экземпляра изделия со значениями качественных параметров. Замечание. Решение по замечанию. Отклоненное замечание.
Эксплуатация и ремонт	Данные об отгрузке продукции. Рекламационный акт. Результат исследования отказа. Заявка на обслуживание. Структура экземпляра изделия в соответствии с заявкой на обслуживание.

Полученные результаты позволили сформировать перечень обобщенных параметров, определяющих данные об электронном изделии в цифровом паспорте на том или ином этапе жизненного цикла этого изделия. Результаты представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2 ОБОБЩЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ДАННЫЕ ОБ ИЗДЕЛИИ

Обобщенный параметр	Виды данных об электронном изделии
Параметры взаимодействия с заказчиком	Договоры с заказчиками и дополнения к ним. Заявки на выполнение работ. Данные о заказчиках.
Параметры разработки и проектирования	Оперативные графики работ. База данных продукции поставщиков. Управление проектированием и модификацией изделий. Электронные подписи согласующих и утверждающих лиц.
Параметры закупок	Договоры с поставщиками. Данные о поставщиках. Замечания на документацию в процессе закупок. Ведение склада продукции поставщиков.
Параметры подготовки	Заявки на запуск производства. Технологические данные.

Обобщенный параметр	Виды данных об электронном изделии
производства	Замечания на документацию в процессе подготовки производства.
Параметры производства	Результаты движения деталей и сборочных единиц по цехам производства. Замечания на документацию в процессе производства. Результаты предъявления продукции в отдел технического контроля. Учет готовой продукции на складе. Фиксация факта отправки продукции заказчику.
Параметры контроля качества продукции	Результаты контроля качества продукции поставщиков. Результаты контроля качества продукции в процессе производства. Результаты испытаний продукции.
Параметры управления несоответствующей продукцией	Рекламационные акты от заказчика. Рекламационные акты на продукцию поставщиков. Акты об отказах продукции. Результаты исследования отказов. Учет замен отказавшей продукции. Учет бракованной продукции на складе.

Из вышеописанного следует, что в цифровом паспорте выполняется обработка достаточно большого объема данных из различных систем – PDM, MES, ERP и EAM, что позволяет сформировать своеобразную базу знаний, в которой содержался бы общий перечень хранимой и обрабатываемой информации об изделии. Причем, эта информация является взаимосвязанной и распределенной между различными системами [12].

Это позволяет сделать вывод о том, что цифровой паспорт обладает свойствами сложной системы, что затрудняет анализ и исследование особенностей представления его содержания на различных предприятиях. Тогда, согласно теоретическим идеям Г. Крона паспорт, как объект исследования, следует представить в виде комплекса математических моделей, совокупность которых позволит упростить процедуру разработки цифрового паспорта электронного изделия на предприятии.

### III. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ПАСПОРТА

Таким образом, в соответствии с материалом, обобщенным в табл. 1 и 2, представим следующий комплекс математических моделей, описывающих цифровой паспорт:

- модель данных:

$$D(C) = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1m_1} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2m_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{k1} & C_{k2} & \dots & C_{km_k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_k \end{pmatrix},$$

где  $C_{ij} \in C_i$  – данные об электронном изделии на различных этапах его жизненного цикла, образующие цифровой паспорт, такие что  $i = 1 \dots k$  – общее число этапов жизненного цикла электронного изделия, на которых выполняется ввод данных в цифровой паспорт;  $j = 1 \dots m_k$  – число данных об электронном изделии,

вводимых в цифровой паспорт на том или ином этапе жизненного цикла этого изделия,  $m = \max(m_1, m_2, \dots, m_k), C_{1m_1}, C_{2m_2}, \dots, C_{km_k} = \emptyset$ , при  $m_i < m$ ;

- модель вариантов описаний

$$G(C) = \begin{pmatrix} G_{11}(C_1) & G_{12}(C_1) & \dots & G_{1d_1}(C_1) \\ G_{21}(C_2) & G_{22}(C_2) & \dots & G_{2d_2}(C_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{k1}(C_k) & G_{k2}(C_k) & \dots & G_{kd_k}(C_k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{1d_1}(C_1) \\ G_{2d_2}(C_2) \\ \dots \\ G_{kd_k}(C_k) \end{pmatrix},$$

где,  $G_1(C_1), G_2(C_2), \dots, G_k(C_k)$  – проектные альтернативы вариантов описания электронного изделия на этапах его жизненного цикла;

- модель соответствия

$$S(C) = \begin{pmatrix} 0 & S_{12}(C_1, C_2) & \dots & S_{1k}(C_1, C_k) \\ S_{21}(C_2, C_1) & 0 & \dots & S_{2k}(C_2, C_k) \\ \dots & \dots & S_{ij}(C_i, C_j) & \dots \\ S_{k1}(C_k, C_1) & S_{k2}(C_k, C_2) & \dots & 0 \end{pmatrix},$$

где  $S_{ij}(C_i, C_j) = \begin{cases} 0, G_i(C_i) \not\subset G_j(C_j) \\ 1, G_i(C_i) \subset G_j(C_j) \end{cases}$ ;

- модель взаимосвязей

$$X(C) = \begin{pmatrix} 0 & X_{12}(C_1, C_2) & \dots & X_{1k}(C_1, C_k) \\ X_{21}(C_2, C_1) & 0 & \dots & X_{2k}(C_2, C_k) \\ \dots & \dots & X_{ij}(C_i, C_j) & \dots \\ X_{k1}(C_k, C_1) & X_{k2}(C_k, C_2) & \dots & 0 \end{pmatrix},$$

где  $X_{ij}(C_i, C_j) = \begin{cases} 0, out(C_i) \neq in(C_j) \\ 1, out(C_i) = in(C_j) \end{cases}, i, j = \overline{1, k}, \quad (1).$

Таким образом, задача разработки цифрового паспорта сводится к формированию элементов матрицы  $X(C)$ , удовлетворяющих условию (1), где элементы  $C_i, C_j \in X(C)$  являются подмножествами соответствующих множеств  $G_i(C_i), G_j(C_j) \in G(C); i, j = \overline{1, k}$ .

#### IV. ВАРИАНТ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЦИФРОВОГО ПАСПОРТА ЭЛЕКТРОННОГО ИЗДЕЛИЯ

Следовательно, это возможна следующая постановка задачи: для каждого элемента цифрового паспорта  $C_i, C_j \in X(C)$  необходимо определить  $G_i(C_i), G_j(C_j)$ , после чего –  $C_i \subset G_i(C_i)$  и  $C_j \subset G_j(C_j)$  согласно требованиям  $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_R)$ , предъявляемым к цифровому паспорту на предприятии. Элементы  $C_i, C_j \in X(C), i, j = \overline{1, k}$  являются подмножествами множества  $D(C)$  которые, с одной стороны, позволяют определить границы эффективности элементов цифрового паспорта для представления данных об электронном изделии на каждом этапе его жизненного цикла, а с другой – определить элементы цифрового паспорта для оценки качества электронного изделия без необходимости изготовления его реального экземпляра.

Другими словами, для каждого элемента цифрового паспорта  $C^\omega \in X(C)$ , будет определен вариант описания данных об электронном изделии, путем «фильтрации» множества  $G(C^\omega)$  вначале с учетом ограничений

$\max(\omega_1), \max(\omega_2), \dots, \max(\omega_{R-1}), \max(\omega_R)$ , накладываемых требованиями  $\Omega$ ; а затем – с учетом какого-либо критерия предпочтения, являющегося решающим правилом.

Следовательно, из всего множества вариантов описаний,  $G^\zeta(C^\zeta), \zeta = \overline{1, k}$  цифрового паспорта электронного изделия, зависимых от  $\Omega$  параметров, требуется определить такое подмножество наилучших вариантов проектирования, что бы для него выполнялись заданные ограничения, и варианты выбранного подмножества были бы эффективнее, чем варианты, не вошедшие в это подмножество.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе результатов исследований параметров электронного изделия на этапах его жизненного цикла разработана математическая модель цифрового паспорта. Модель представлена совокупностью множеств, что позволило отразить определенные аспекты разрабатываемого паспорта; а также сформулировать задачу формирования его элементов.

Полученная модель будет использована для решения следующих задач:

- определения границ эффективности элементов цифрового паспорта для представления данных об электронном изделии на каждом этапе его жизненного цикла;
- определения элементов цифрового паспорта для оценки качества электронного изделия без необходимости изготовления его реального экземпляра.

Решение перечисленных задач позволит применять цифровой паспорт для анализа качества электронных изделий из изготовления их реальных экземпляров. В дальнейшем содержание паспорта может быть использовано для реализации технологий виртуальной и дополненной реальности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Буцык А.Я., Донецкая Ю.В., Шарыгин Б.Л. Электронный технологический паспорт изделия. // Известия ВУЗов. Приборостроение, №3, Т.60, 2017. С. 280-286.
- [2] Шаховцев Е.В., Баландин А.И. Система информационной поддержки разработки, производства и испытаний гироскопических приборов //Гироскопия и навигация, 2014. №2 (85).
- [3] Бочанинов Д.Г., Ермаков Р.В. Комплексный подход к организации хранения данных в программном обеспечении контрольно-измерительной аппаратуры. //Гироскопия и навигация, 2014. – №2 (85).
- [4] Осеян А.К. Состояние и перспективы развития систем управления инженерными данными в филиале ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова». //Материалы докладов XVII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» Науч. редактор д.т.н. О.А. Степанов. Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. С.168-174.
- [5] Шаховцев Е.В. Системы автоматизированного проектирования в рамках единого информационного пространства оборонного предприятия. //Навигация и управление движением: Материалы

- докладов XVII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»/ Науч. редактор д.т.н. О.А. Степанов. Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2015. С. 161-167
- [6] Баженов А.Г., Безмен В.С., Гутнер И.Е., Шарыгин Б.Л. Развитие САПР в ЦНИИ «Электроприбор» в российский период. //Материалы 9-й конференции «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016)». СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 507-514.
- [7] Бочанинов Д.Г., Ермаков Р.В. Комплексный подход к организации хранения данных в программном обеспечении контрольно-измерительной аппаратуры. //Гироскопия и навигация, 2014. №2 (85).
- [8] Донецкая Ю.В. Этапы формирования полного электронного определения изделия и их реализация // Навигация и управление движением: Материалы докладов XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 176-181.
- [9] Донецкая Ю.В. Цели и задачи разработки интегрированной системы управления данными. //Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 ч. Ч. 2. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2012. С. 8-11.
- [10] Донецкая Ю.В., Гатчин Ю.А. Организация системы хранения данных об экземпляре изделия // Автоматизация в промышленности. №12, 2015. С. 45-49.
- [11] Донецкая Ю.В. Интеграция систем управления. Возможности и перспективы. //XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014.: Труды. [Электронный ресурс] М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2014.
- [12] Donetskaya Y.V., Tushkanov E.V., Kuznetsova O.V., Kuznetsov A.U. Formation and analysis of engineering alternatives for an integrated electronic product description system. //Control in Technical Systems (CTS), 2017 IEEE II International Conference on - 2017, pp. 397-400.