

Алиев Омар Гамзатович, бакалавр

Нижегородский государственный технический университет

им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.

Говяжова Софья Александровна, бакалавр

Нижегородский государственный технический университет

им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.

Поманисточка Тихон Александрович, бакалавр

Нижегородский государственный технический университет

им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.

**ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЯ НА
ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПАСПОРТА: МЕТОДОЛОГИЯ
КОНСОЛИДАЦИИ ДАННЫХ НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
ПРОИЗВОДСТВА И ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

***Аннотация.** Предметом исследования является информационная модель жизненного цикла изделия на основе электронного паспорта, объектом — совокупность разнородных данных, порождаемых на стадиях проектирования, производства, эксплуатации и вывода изделия из эксплуатации. Применялись теоретико-множественная формализация, событийное моделирование и апробация на программно-аппаратном комплексе управления двигателем постоянного тока для мобильных робототехнических платформ. Обосновано представление паспорта неизменяемым журналом записей с проекцией на текущее состояние экземпляра изделия; предложены правила консолидации данных, процедура разрешения конфликтов и критерий готовности стадии. Показано, что модель обеспечивает прослеживаемость параметров от расчётной модели изделия до ведомости материалов и выявляет пробелы в данных до перехода к следующей стадии.*

Ключевые слова: электронный паспорт изделия, жизненный цикл изделия, информационная модель, консолидация данных, прослеживаемость, электронная структура изделия, двигатель постоянного тока, мобильная робототехническая платформа.

INFORMATION MODEL OF THE PRODUCT LIFE CYCLE BASED ON AN ELECTRONIC PASSPORT: A METHODOLOGY FOR DATA CONSOLIDATION AT THE DESIGN, MANUFACTURING AND DECOMMISSIONING STAGES

Abstract. *The subject of the study is an information model of the product life cycle based on an electronic passport; the object is the set of heterogeneous data generated at the design, manufacturing, operation and decommissioning stages. Set-theoretic formalization, event-based modelling and validation on a hardware and software complex for DC motor control used in mobile robotic platforms were applied. The passport is represented as an append-only log of records with a projection onto the current state of a product instance; rules for data consolidation, a conflict resolution procedure and a criterion of stage readiness are proposed.*

Key words: *electronic product passport, product life cycle, information model, data consolidation, traceability, product breakdown structure, DC motor, mobile robotic platform.*

Актуальность исследования

Современное изделие машиностроения сопровождается массивом данных, объём и разнородность которых растут быстрее, чем сложность конструкции. Конструкторская модель, технологические маршруты, протоколы испытаний и журналы наработки формируются разными подразделениями и в разное время [5, с. 84], поэтому каждая стадия жизненного цикла (ЖЦ) хранит данные в удобном именно для неё формате, а связи между стадиями теряются.

Нормативная база задаёт форму представления таких данных: ГОСТ 2.051-2013 устанавливает требования к электронному документу [1], ГОСТ 2.053-2013 — к электронной структуре изделия (ЭСИ) [2], ГОСТ Р 57700.37-2021 вводит

понятие цифрового двойника [3]. Стандарты описывают отдельные объекты, оставляя открытым вопрос о передаче данных между стадиями. Регламент ЕС 2024/1781 закрепляет обязательность цифрового паспорта продукта со сведениями о материалах и порядке утилизации [8], поэтому стадия вывода из эксплуатации становится потребителем данных всего предшествующего периода ЖЦ.

Обзор научной литературы по теме статьи

Методическую основу цифрового описания изделия формируют работы по цифровым двойникам: в [6, с. 71] цифровой двойник рассматривается совместно с системами дискретно-событийного моделирования, что даёт способ описания объекта через последовательность событий. Методология описания полного ЖЦ рассмотрена в [4, с. 42], адаптация моделей ЖЦ к условиям предприятия — в [5, с. 88], оценка состояния оборудования — в [7, с. 46].

Общим для этих работ является внимание к поведенческой стороне модели, тогда как правила накопления и согласования фактических данных о конкретном экземпляре изделия освещены слабее: стандарты [1–3] задают форму отдельных документов, не описывая процедуру их связывания в единую запись.

Постановка проблемы исследования

Объектом исследования выступает информационное обеспечение жизненного цикла изделия машиностроения, предметом — методы консолидации данных стадий ЖЦ в структуре электронного паспорта экземпляра изделия. Данные распределены между независимыми системами: системы управления данными об изделии хранят конструкторско-технологическую часть, стенды — производственную, средства телеметрии — эксплуатационную, а сведения для утилизации нередко отсутствуют вовсе.

Задачи исследования: сформировать теоретико-множественное описание модели паспорта; определить состав его разделов по стадиям ЖЦ; разработать правила консолидации записей; ввести критерий полноты стадии; выполнить

апробацию на программно-аппаратном комплексе (ПАК) управления двигателем постоянного тока (ДПТ) мобильной робототехнической платформы.

Описание и обоснование методологии исследования

Методология опирается на теоретико-множественную формализацию предметной области, событийное представление данных и проверку на опытном образце. Паспорт экземпляра изделия описывается кортежем

$$EP = \langle u, S, A, E, \Pi \rangle, \quad (1)$$

где u — идентификатор экземпляра; $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ — упорядоченное множество стадий ЖЦ (проектирование, производство, эксплуатация, вывод из эксплуатации); A — множество атрибутов; E — множество записей; Π — множество проекций, то есть представлений паспорта для конкретного потребителя. Отдельная запись журнала задаётся кортежем

$$e = \langle t, s, src, a, v, \sigma \rangle, \quad (2)$$

где t — отметка времени; $s \in S$ — стадия; src — источник данных; $a \in A$ — атрибут; v — значение; σ — контрольная сумма. Множество E упорядочено по t и пополняется только добавлением: корректировка выполняется новой записью с тем же атрибутом, поэтому исходное значение сохраняется в истории. Текущее состояние паспорта получается проекцией на момент времени τ :

$$\pi(a, \tau) = v(e^*), \quad e^* = \arg \max \{t(e) \mid e \in E, a(e) = a, t(e) \leq \tau, \rho(src(e)) = \rho_{\max}\}, \quad (3)$$

где ρ — приоритет источника. Действующим считается значение из наиболее поздней записи среди источников с наивысшим приоритетом, что разрешает конфликт, когда один атрибут фиксируется расчётом при проектировании и измерением на приёмо-сдаточных испытаниях (ПСИ). Приоритет назначается по принципу «измерение важнее расчёта»: расчёт — 1, диагностика — 2, стендовое измерение — 3, поверенный прибор — 4.

Связь атрибутов со стадиями задаётся отображением $L: A \rightarrow 2^S$, определяющим обязательный состав стадии $A_s = \{a \in A \mid s \in L(a)\}$. Готовность стадии s к передаче данных оценивается коэффициентом полноты

$$K_s = |\{a \in A_s \mid \pi(a, \tau_s) \neq \emptyset\}| / |A_s|. \quad (4)$$

Значение $K_s = 1$ означает, что все обязательные атрибуты стадии заполнены; в эксперименте принято условие $K_s \geq 0,95$ для перехода к следующей стадии. Структура модели разделена на три уровня (рис. 1): первый связывает тип изделия, экземпляр и компоненты по ЭСИ [2], второй хранит журнал записей вида (2), третий формирует проекции.

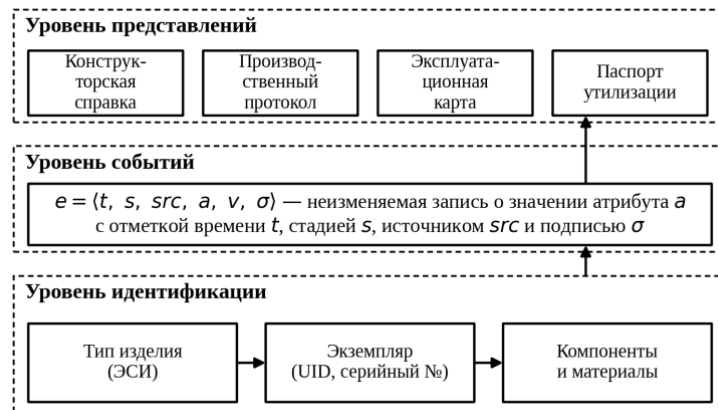


Рис. 1. Трёхуровневая структура информационной модели электронного паспорта изделия

Схема консолидации показана на рис. 2, состав разделов паспорта для ПАК управления ДПТ — в таблице 1.



Рис. 2. Схема консолидации данных стадий жизненного цикла в электронном паспорте

Таблица 1. Состав разделов электронного паспорта по стадиям жизненного цикла

Раздел паспорта	Стадия формирования	Число атрибутов
Идентификация	Проектирование	6
Конструктивные параметры	Проектирование	11
Параметры модели и регуляторов	Проектирование	9
Программное обеспечение	Проектирование, эксплуатация	5
Производственные данные	Производство	8
Результаты приёмо-сдаточных испытаний	Производство	10

Раздел паспорта	Стадия формирования	Число атрибутов
Эксплуатационные данные	Эксплуатация	9
Сервисные воздействия	Эксплуатация	6
Данные для вывода из эксплуатации	Вывод из эксплуатации	7

Результаты исследования

На основе описанной модели сформирован электронный паспорт опытного образца ПАК управления ДПТ мобильной платформы с дифференциальным приводом. На стадии проектирования внесены расчётные параметры машины и коэффициенты настройки контуров тока и скорости ($\rho = 1$), а также версия встроенного ПО и её контрольная сумма.

На стадии производства те же атрибуты получили фактические значения по результатам ПСИ: согласно правилу (3) действующими стали стендовые измерения ($\rho = 3$), расчётные записи при этом сохранились в журнале. Сопоставление пар «расчёт — измерение» дало отклонение сопротивления якорной цепи 7,4 %, индуктивности — 11,2 %; отклонения переданы разработчику модели как обратная связь.

На стадии эксплуатации паспорт пополнялся агрегированными данными телеметрии: за 128 часов наработки и 3240 циклов пуска зарегистрировано четыре превышения уставки по току и одно сервисное воздействие. Раздел данных для вывода из эксплуатации заполняется автоматически: состав материалов наследуется от ЭСИ, остаточный ресурс — по наработке. Оценка полноты приведена в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициент полноты разделов паспорта по стадиям жизненного цикла

Стадия ЖЦ	Атрибутов $ A_s $	Заполнено	K_s	Готовность к передаче
Проектирование	31	31	1,00	да
Производство	18	18	1,00	да
Эксплуатация	15	14	0,93	нет
Вывод из эксплуатации	7	7	1,00	да

Незаполненным на стадии эксплуатации остался атрибут «температура окружающей среды», источник для которого в составе платформы отсутствует: коэффициент $K_3 = 0,93$ ниже порога 0,95, и стадия отмечена как не готовая к передаче данных. Попытка изменить внесённый результат ПСИ приводит к расхождению суммы σ и отклоняется.

Обсуждение результатов исследования и выводы

Представление электронного паспорта журналом неизменяемых записей с последующей проекцией решает две задачи одновременно: хранение всех значений атрибута сохраняет историю изменений, а правило (3) даёт потребителю однозначное текущее значение. Подход согласуется с событийным описанием технических объектов [6, с. 72] и дополняет его учётной составляющей. Отклонение свыше 10 % по индуктивности указывает на необходимость уточнения методики идентификации параметров ДПТ [7, с. 48].

Ограничением модели является зависимость качества паспорта от дисциплины источников: атрибут, для которого не назначен источник, останется незаполненным независимо от совершенства структуры; апробация выполнена на единичном образце. Таким образом, разработана информационная модель ЖЦ изделия на основе электронного паспорта, включающая описание (1)–(2), правило проекции (3), критерий полноты стадии (4) и трёхуровневую архитектуру. Апробация подтвердила сквозную прослеживаемость параметров от расчётной модели до ведомости материалов и способность выявлять пробелы в данных до того, как они станут препятствием для перехода к следующей стадии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2.051-2013. ЕСКД. Электронные документы. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
2. ГОСТ 2.053-2013. ЕСКД. Электронная структура изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.

3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.

4. Жабицкий М. Г., Андриенко Ю. А., Конев Ю. Н., Свердлик Г. В., Малышев В. Н. Концепция инструментов цифрового моделирования комплексных технологий на полном жизненном цикле инновационных производств // International Journal of Open Information Technologies. 2025. Т. 13. № 8. С. 41–50. URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/2251> (дата обращения: 18.08.2026).

5. Крупенин Д. Адаптация модели жизненного цикла цифровых продуктов для промышленных предприятий: матрица принятия решений для управления B2B и внутренними инициативами // International Journal of Open Information Technologies. 2025. Т. 13. № 11. С. 83–104. URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/2233> (дата обращения: 18.08.2026).

6. Намиот Д. Е., Покусаев О. Н., Куприяновский В. П., Жабицкий М. Г. Цифровые двойники и системы дискретно-событийного моделирования // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9. № 2. С. 70–75. URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1071> (дата обращения: 18.08.2026).

7. Щербатов И. А., Долгушев А. Н., Белов М. К., Агибалов В. А., Салов И. В. Оценка технического состояния оборудования тепловой станции на примере конденсатора // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11. № 3. С. 45–51. URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1488> (дата обращения: 18.08.2026).

8. Regulation (EU) 2024/1781 on codesign requirements for sustainable products (ESPR) // Official Journal of the European Union. 2024. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj> (дата обращения: 18.08.2026).

© Алиев О.Г., Говяжова С.А., Поманисточка Т.А., 2026.