

УДК 621.316.5

ББК 31.264

И.П. ИВАНОВ, А.В. МИХАЙЛОВ, С.А. МОИСЕЕВ

ОСОБЕННОСТИ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ И ДВОЙНИКОВ КОММУТАЦИОННОГО АППАРАТА

Ключевые слова: цифровая модель, цифровой двойник, компьютерная модель, математическая модель, электронный конструкторский документ, коммутационный аппарат.

Общие положения и требования по разработке и применению цифрового двойника изделия машиностроения установлены в национальном стандарте, а требования, определяющие особенности подходов к созданию цифрового двойника изделия определенного вида, рекомендуется устанавливать в стандарте предприятия и (или) в техническом задании на разработку, что требует проведения предварительной проработки. Исследования по цифровым двойникам коммутационных аппаратов находятся на ранней стадии.

Цель исследования – выявление особенностей и систематизация основных подходов к разработке цифровых моделей и двойников сильноточного коммутационного аппарата, востребованных на разных стадиях его жизненного цикла.

Материалы и методы. Подходы к разработке цифрового двойника выбраны на основе анализа и обобщения положений современных стандартов ЕСКД и стандартов компьютерного моделирования. Их особенности проработаны для этапа проектирования самого изделия, выполняемого по технологиям реверс-инжиниринга. В качестве объекта исследования принят коммутационный аппарат с интеллектуальными функциями.

Результаты. Разработана структура цифровых двойников коммутационного аппарата, отражающая отличия состава по виду основных элементов (физического объекта, электронного конструкторского документа, компьютерных моделей и информационные связи) для разных стадий (этапов) жизненного цикла. Выявлены взаимосвязи современных стандартов. Рассмотрены исходные математические модели для решения основных задач проектирования. При этом расчеты износостойкости коммутационного аппарата предлагается выполнять по эмпирическим зависимостям, хорошо зарекомендовавшим себя на практике.

Модельные эксперименты по оптимизации конструкции коммутационного аппарата с использованием математических и компьютерных моделей представляют, по сути, виртуальные испытания цифровых моделей. Проведение виртуальных испытаний опытных образцов и образцов установочной серии нецелесообразно, поскольку для коммутационного аппарата, как и для остальных изделий традиционного назначения, стандартами установлены все виды и методы испытаний, которые являются обязательными и вполне достаточными при разработке и применении их по назначению.

На стадиях производства и эксплуатации рекомендуется использовать результаты имитационного моделирования и информацию от датчиков, установленных в аппарате.

Выводы. При создании цифровых моделей следует исходить из положений стандартов. Моделирование физических процессов достаточно выполнить на основе известных математических моделей. Модельные эксперименты на основе этих моделей, представляющие, по сути, разновидность виртуальных испытаний, целесообразно применять при оптимизации конструкции. Рекомендуется использовать результаты исследования при создании и применении цифровых моделей сильноточных коммутационных аппаратов.

Введение. Одной из ключевых технологий цифровой трансформации промышленности является технология цифрового двойника¹ [7-11]. Цифровой двойник (ЦД) изделия машиностроения, согласно ГОСТ Р 57700.37², представляет собою систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием, реализуемую на программно-технологической платформе. Общая (концептуальная) структура ЦД, выполненная в форме, удобной для оценки подходов к его созданию, приведена на рис. 1.

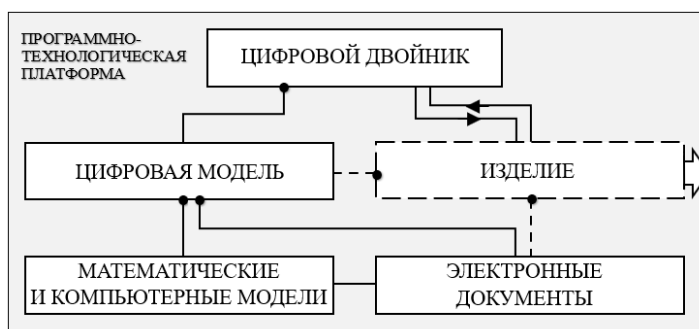


Рис. 1. Общая (концептуальная) структура ЦД изделия (согласно определению термина по ГОСТ Р 57700.37–2021): линия с точками отражает принадлежность к элементу, линия со стрелкой – информационную связь

Основу ЦД составляет цифровая модель (ЦМ) – это совокупность компьютерных и математических моделей, описывающих в основном физические процессы в изделии, а также электронных конструкторских документов, являющихся базовыми при цифровом моделировании изделий.

Однако, согласно новому ГОСТ Р 2.051³, в состав проектного электронного документа (ДЭ) могут входить и компьютерные модели (КМ) (математические, расчетные и др.), что может привести к неоднозначности толкования и применения понятия ЦМ по ГОСТ Р 57700.37, в котором некоторые стандарты, на которые делаются ссылки, заменены на новые или аннулированы. Поэтому при построении ЦД на основе приведенной на рис. 1 структуры первоочередными задачами являются определение взаимосвязи положений и терминов, установленных основными современными стандартами ЕСКД и стандартами по КМ и моделированию, и выбор типов КМ (электронных), характерных для конкретного вида изделия. Кроме того, ГОСТ Р 57700.37 устанавливает только общие положения построения ЦД, а конкретные требования, определяющие особенности подходов к созданию ЦМ изделия определенного вида, такие как требования

¹ Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящихся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации: утверждено распоряжением Правительства Российской Федерации от 07.11.2023 № 3113-р [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/-OmFdc3nMwk3BqAUbjqdJImPI3NxqRIS.pdf> (дата обращения: 02.04.2025).

² ГОСТ Р 57700.37-2021. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. 11 с.

³ ГОСТ Р 2.051-2023. Электронная конструкторская документация. Основные положения. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2023. 10 с.

к виду и составу ДЭ, ММ и КМ, описывающих структуру, функциональность и поведение изделия, рекомендуется устанавливать в стандарте предприятия и(или) в техническом задании на разработку, что требует проведения предварительных исследований.

Исследования по ЦД коммутационных аппаратов (КА) находятся на ранней стадии и посвящены в основном вопросам моделирования только части процессов применительно к разным типам аппаратов. Так, например, в [14] предложена имитация работы однополюсного герметичного контактора постоянного тока на основе моделирования магнитной системы; в [12] рассмотрены программа и аппаратные средства контроля и обработки параметров коммутационного тока и напряжения и температуры окружающего воздуха для трехполюсного контактора переменного тока; [13] посвящена вопросам создания КМ, связи между математическими моделями электромагнитного и теплового полей и разработки адаптивной нейронной сети в обеспечение оптимального контактного нажатия в однополюсном силовом реле (контакторе) постоянного тока. В этих работах используются разные толкования понятий и, соответственно, подходы к моделированию, усложняющие оценку возможностей использования их результатов.

Цель исследования – выявление особенностей и систематизация основных подходов к разработке ЦМ и двойников сильноточного коммутационного аппарата, востребованных на основных стадиях его жизненного цикла, прежде всего на стадии проектирования.

Материалы и методы. Исследование основано на анализе и обобщении положений и требований современных стандартов по КМ и ДЭ и особенностей работы, проектирования и применения сильноточных КА (контакторов и автоматических выключателей низкого напряжения). Оценка особенностей подходов выполнена в основном на ЦМ. За основу методологии проектирования приняты положения и методы реверс-инжиниринга (обратного проектирования), обеспечивающие высокий уровень адекватности цифровой модели уже на начальном этапе ее создания, совмещенном с началом разработки самого КА.

В качестве объекта исследования принят КА с интеллектуальными возможностями, содержащий датчики контроля параметров (количества включений-отключений, температуры внутри корпуса и т.п.) и электронную схему управления на основе микропроцессора. В качестве прототипа предложено использовать образец КА ведущей зарубежной электротехнической компании. Наибольший интерес представляют КА на несколько сотен и тысяч ампер, ЦД которых востребованы при моделировании энергосистем [1, 3–5, 9] и могут стать одним из эффективных средств предотвращения аварийных ситуаций при эксплуатации управляемого КА объекта с высокой энергоемкостью (трансформатора, генератора и т.п.).

Результаты исследования. ЦД КА на разных стадиях жизненного цикла (ЖЦ) представляют собой системы, состоящие из разных форм физического объекта, ДЭ, КМ и информационных связей. Структура таких ЦД, составленная на основе концептуальной структуры (рис. 1), приведена на рис. 2.

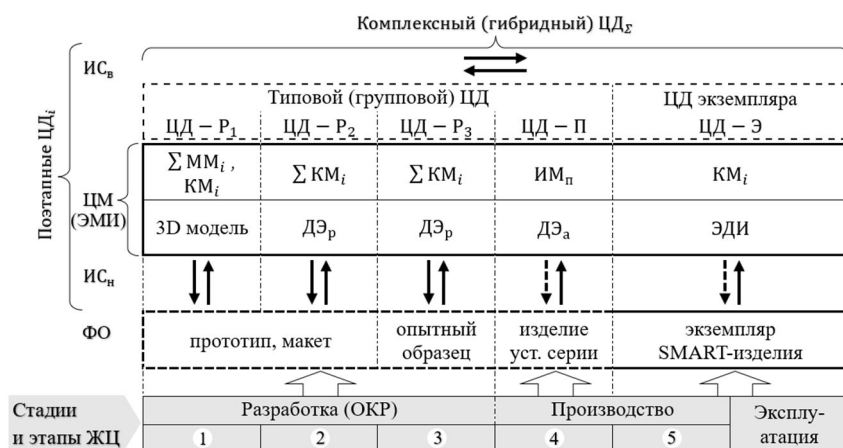


Рис. 2. Структура ЦД КА на разных стадиях (этапах) ЖЦ:

1 – техпроект; 2 – разработка рабочей КД и ТД; 3 – испытания опытных образцов; 4 – постановка на производство; 5 – изготовление;

ЦМ – цифровая модель; ИС_н и ИС_в – информационные связи низшего и высшего уровней; ФО – физический объект;

ММ и КМ – математическая и компьютерная модели;

ИМ – имитационная модель; ДЭ – документ электронный;

ЭДИ – электронное дело изделия; ЭМИ – электронный макет изделия

В структуре применены термины по ГОСТ Р 57700.37, ГОСТ Р 2.005¹, ГОСТ Р 57412², а также следующие термины с соответствующими определениями:

– **типовой (групповой) ЦД**: ЦД, являющийся общим (типовым) для множества ФО разных форм – прототипа, макета, опытного образца и изделия установочной серии. Типовой ЦД может применяться отдельно для описания определенного процесса состояния характеристики изделия;

– **комплексный (гибридный) ЦД**: ЦД, включающий типовые ЦД и ЦД экземпляра (изделия серийного производства с индивидуальным электронным делом);

– **информационная связь низшего уровня**: информационная связь в типовых ЦД и ЦД экземпляра;

– **информационная связь высшего уровня**: информационная связь между ЦД разных этапов в комплексном ЦД.

Основное содержание ЦМ может быть сформировано наиболее эффективно на первой стадии ЖЦ изделия (при непосредственном участии разработчика изделия).

Особенности подходов к созданию ЦМ КА на этапе проектирования изделия. При реверс-инжиниринге исходными данными для разработки ЦМ являются 3D-модель прототипа и технические требования на разработку КА.

¹ ГОСТ Р 2005-2023. Единая система конструкторской документации. Термины и определения. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2023. 20 с.

² ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели изделия в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с.

Основная задача при обратном проектировании 3D-модели нового КА заключается в оптимизации конструкции в целях устранения «узких» мест прототипа и усовершенствования с учетом новых требований и особенностей технологий российского производства. Именно здесь наиболее эффективны математическое и компьютерное моделирование процессов функционирования, подтверждающие работоспособность и устанавливающие зависимости основных характеристик изделия. Подходы к созданию используемых при этом ЦМ, в том числе расчетных геометрических моделей, могут быть определены на основе результатов анализа сути толкований (определений) применяемых терминов и требований к структуре и порядку разработки моделей, установленных в стандартах. На рис. 3 приведены принятые за основу при создании ЦД (ЦМ) стандарты ЕСКД (ГОСТ Р 2.052-2024¹, ГОСТ Р 2.057-2024², ГОСТ Р 2.053-2023³, ГОСТ Р 2.810-2023⁴ и т.п.) и стандарты в области КМ и моделирования (ГОСТ Р 57412-2017, ГОСТ Р 57700.21-2024⁵, ГОСТ Р 57700.44-2024⁶, ГОСТ Р 57700.37-2021 и т.п.) и показаны их взаимосвязи и связи со стандартами по ЦМ.

ГОСТ Р 2.810 на электронный макет изделия можно использовать в качестве основополагающего документа при создании ЦМ, так как состав электронного макета изделия практически соответствует составу ЦМ. Электронный макет изделия может формироваться в разных автоматизированных системах управления данными об изделии, а в отличие от ЦМ содержит только результаты расчетов и моделирования.

Основу моделирования КА составляют ММ, основанные на общей теории физических процессов в электрических аппаратах (тепловых, электромагнитных, механических, коммутационных и др.) [6] и описывающие отдельные функции и характеристики аппарата (работоспособность, нагрев, наработку и т.п.). Адекватность построенных на их базе КМ и соответственно ЦМ_i и ЦД на разных стадиях ЖЦ (см. рис. 2) может быть определена по результатам натурных испытаний ФО (прототипа, макета, опытного образца и др.), что является одним из основных положений построения ЦМ (ГОСТ Р 57700.37). Общая модель КА, состоящая из описаний всех процессов, отсутствует, и нет острой необходимости в ней, по крайней мере на начальной стадии цифровой трансформации производства.

¹ ГОСТ Р 2.052-2024. Электронная геометрическая модель изделия. Основные положения. М.: Росстандарт, 2024. 19 с.

² ГОСТ Р 2.057-2024. Электронная модель сборочной единицы: Общие требования. М.: Росстандарт, 2024. 6 с.

³ ГОСТ Р 2.053-2023. Электронная структура изделия. Основные положения. М.: Росстандарт, 2023. 10 с.

⁴ ГОСТ Р 2.810-2023. Электронный макет изделия. Общие требования. М.: Росстандарт, 2023. 8 с.

⁵ ГОСТ Р 57700.21-2024. Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Термины и определения. М.: Росстандарт, 2024. 7 с.

⁶ ГОСТ Р 57700.44-2024. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. М.: Росстандарт, 2024. 14 с.

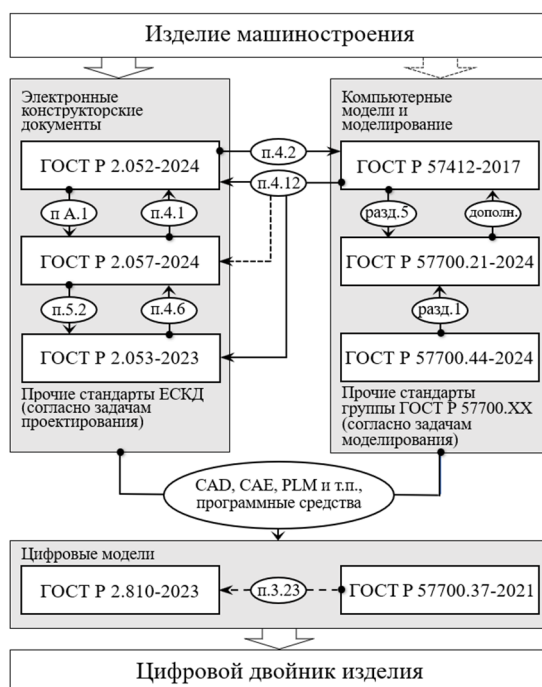


Рис. 3. Взаимосвязь основных стандартов, используемых при оценке подходов к созданию ЦМ и ЦД (на стадии проектирования)

Вычисления по ММ основных физических процессов могут быть реализованы в среде широко распространенных программных комплексов (COMSOL, Ansys, MATLAB и др.). При этом не требуется экспертизы в области теории полей (тепловых, электромагнитных), машин и механизмов или коммутации электрических цепей и дуговых процессов. Однако важно правильно выбрать исходные ММ. Так, например, для решения основных задач на начальном этапе при реверс-инжиниринге можно использовать следующие уравнения:

а) уравнение магнитного поля, выраженное через векторный магнитный потенциал A [6]:

$$\begin{aligned} B &= \nabla_x A; \nabla A = 0; \\ \nabla^2 A &= -\mu_0 \mu_r J \text{ при } \mu_r = \text{const}; \\ \nabla^2 A &= -\mu_0 (J + \nabla_x M) \text{ при } \mu_r = f(H), \end{aligned}$$

где B – магнитная индукция, Тл; H – напряженность, А/м; J – объемная плотность тока, А/м²; M – намагниченность, А/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость; ∇ – дивергенция; ∇_x – ротор;

б) уравнение теплопроводности, составляющее основу исследования температурного поля [6]:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + q = c \gamma \frac{\partial \theta}{\partial t}, \text{ (для стационарного режима: } \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0),$$

где θ – температура в точке с координатами при x, y, z , К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

γ – плотность материала, кг/м^3 ; q – плотность мощности внутренних источников тепла, Вт/м^2 ;

в) уравнения статики механизма КА, представляющего, как правило, плоский механизм с вращательным и (или) прямолинейным движением [2]:

$$\sum M = 0; \sum \vec{F} = 0,$$

где M – моменты сил, действующие на звенья кинематической пары, $\text{Н} \cdot \text{м}$; $\vec{F}$ – векторы сил;

г) уравнение динамики механизма КА [2]:

$$M_d(\varphi) - M_c(\varphi) = J_n(\varphi)\omega \frac{d\omega}{d\varphi} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_n(\varphi)}{d\varphi},$$

где M_d и M_c – соответственно приведенный момент движущих сил и момент сил противодействия, $\text{Н} \cdot \text{м}$; J_n – приведенный момент инерции, $\text{Н} \cdot \text{м}^2$; ω – угловая скорость, рад/с ; φ – угол поворота звена, рад .

При реверс-инжиниринге расчет износа контактов с достаточной точностью может быть выполнен по универсальной экспоненциальной зависимости, коэффициенты которой устанавливаются по результатам натурных испытаний (для определенных сочетаний токов и напряжений и вида аппарата), или датчиком учета количества коммутаций, установленным в конструкции КА.

Модельные эксперименты по оптимизации основных узлов КА (электромагнитного привода, контактной системы, передаточного механизма) с использованием математических выражений (моделей) представляют, по сути, виртуальные испытания ЦМ (ЦД). Особенности подходов к таким экспериментам (испытаниям) рассмотрены применительно к электромагнитному приводу контактора. На начальном этапе разработки ЦМ и ДЭ изделия целесообразно совместить виртуальные испытания с проведением конструкторского анализа (оценки промежуточных результатов, уточнения конструктивных, технологических и других параметров и т.п.).

Адекватность ЦМ узлов проектируемого изделия может быть оценена сопоставлением результатов их виртуальных испытаний с результатами натурных испытаний образцов прототипа. При необходимости уточняются расчетные геометрические модели и (или) настройки параметров решателя программного средства.

При моделировании макета и опытного образца нового КА могут быть применены ЦМ прототипа с учетом соответствующих изменений конструкции, а результаты расчетов и компьютерного моделирования представить в электронном (цифровом) макете интегрированного типа (ГОСТ Р 2.810), включающего функциональный и конструкторский электронные макеты изделия. Для макетов и опытных образцов КА проведение виртуальных испытаний на их ЦМ (ЦД) представляется нецелесообразным, так как для КА, как и для других изделий традиционного назначения, установлены все виды и методы испытаний стандартами, которые являются обязательными и вполне достаточными для подтверждения характеристик и качества изделия.

Особенности подходов к созданию ЦМ КА на стадиях производства и эксплуатации. На стадии производства могут быть использованы в основном

имитационные модели, основанные на технологическом электронном макете изделия и обеспечивающие организацию эффективного производства (по возможности с использованием средств автоматизации). Как на стадии производства, так и на стадии эксплуатации не требуются ЦМ_i функционирования, содержащие описания физических процессов в самом изделии. Так же, как показывает практика, не вносятся изменения в конструкции КА, которые могли бы повлиять на его характеристики. В основном осуществляется сбор и анализ информации от датчиков, установленных в КА, и (или) от систем микропроцессорного управления. Эту информацию можно включить в ЭДИ.

Выводы. 1. При создании ЦМ и ЦД КА, которые наиболее востребованы на этапе проектирования, целесообразно исходить из особенностей положений современных стандартов ЕСКД и компьютерного моделирования.

2. Моделирование физических процессов в ЦМ можно выполнить на основе известных ММ, не требующих экспертности в области теории и реализуемых высоким уровнем адекватности в распространенных программных средствах.

3. Модельные эксперименты, представляющие, по сути, виртуальные испытания, являются наиболее эффективными при оптимизации конструкции КА, проектируемого по технологиям реверс-инжиниринга.

4. Рекомендуется использовать результаты исследования при создании ЦМ КА на этапах разработки КА, а результаты применения этих ЦМ на последующих стадиях ЖЦ – при создании программно-технологической платформы, например, входящего в состав общей экосистемы предприятия.

Литература

1. Андрюшкевич С.К., Ковалев С.П., Нефедов Е.И. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем // Цифровая подстанция. 2019. № 12. С. 28–33.
2. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. 4-е изд. М.: Наука, 1988. 360 с.
3. Богомолов Р.А. Цифровые двойники меняют процессы управления в энергосистеме // РУМ. 2023. № 2(610). С. 36–40.
4. ИТ-инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов / Н.И. Вороний, А.В. Массоль, И.Н. Колосок, А.Г. Массель // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 1. С. 3–13.
5. Ожегов М.А. Цифровые технологии в энергетике: перспективы и современность // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 1(76). С. 18–19.
6. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. 5-е изд., перераб. и доп. СПб.: Лань, 2015. 592 с.
7. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: Альянс Принт, 2020. 401 с.
8. Применение цифровых двойников в промышленности / С. Малакути, П.В. Шалквик, Б. Босс, Ч.Р. Састри // Современные технологии. 2022. № 8. С. 34–41.
9. Тарануха Н.Л., Семенова С.В., Панков С.Н. Цифровой двойник – эффективный инструмент цифровой трансформации промышленных предприятий // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 3. С. 11–26. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-11-26.
10. DOD Instruction 5000.97, «Digital Engineering» – DOD Directives Division, 2023. Available at: <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodi/500097p.PDF> (Access Date: 2025, Apr. 23)
11. Shao G. Use Case Scenarios for Digital Twin Implementation Based on ISO 23247. Available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=932269 (Access Date: 2025, Apr. 23)

12. Huang F., Liao W. Design and Application of a MCU-based Smart Contactor System. *Energy and Power Engineering*, 2013, no. 5, pp. 1–5. DOI: 10.4236/epe.2013.53B001.

13. Yu G.-F., Chiu Y.-J., Zheng X. et al. Contact pressure of high-voltage DC power relay change and life production and structure optimization. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814021991666.

14. Zhang B., Zhang M., Dong T. High-Fidelity Digital Twin Modeling Method for Contactor Operation Simulation. In: *The 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Application (LDIA 2021)*. Shenyang, Shenyang University of Technology, 2021, 1 p. DOI: 10.1109/LDIA49489.2021.9505888.

ИВАНОВ ИВАН ПЕТРОВИЧ – кандидат технических наук, главный научный сотрудник, АО «ВНИИР-Прогресс», Россия, Чебоксары (ipivanov@vniir.ru).

МИХАЙЛОВ АЛЕКСЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ – кандидат технических наук, руководитель направления, АО «ВНИИР-Прогресс»; и.о. заведующего кафедрой электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (avmikhailov@vniir.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9072-3442>).

МОИСЕЕВ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ – заместитель генерального директора, АО «ВНИИР-Прогресс», Россия, Чебоксары (moiseev@vniir.ru).

Ivan P. IVANOV, Alexey V. MIKHAILOV, Sergey A. MOISEEV
FEATURES OF APPROACHES TO CREATING DIGITAL MODELS
AND DOUBLES OF SWITCHING DEVICES

Key words: digital model, digital twin, computer model, mathematical model, electronic design document, switching device.

General provisions and requirements for the development and application of a digital twin of a mechanical engineering product are established in the national standard, and the requirements defining the features of approaches to creating a digital twin of a product of a certain type are recommended to be established in the enterprise standard and/or in the technical specifications for development, which requires preliminary development. Research on digital twins of switching devices is at an early stage.

The purpose of the study is to identify the features and systematize the main approaches to the development of digital models and twins of a high-current switching device that are in demand at different stages of its life cycle.

Materials and methods. Approaches to the development of a digital twin have been developed based on the analysis and generalization of the provisions of modern Unified System for Design Documentation and computer modeling standards. Their features are developed for the design stage of the product itself, performed using reverse engineering technologies. A switching device with intelligent functions is adopted as an object of study.

Results. A structure of digital twins of a switching device has been developed, reflecting the differences in the composition by the type of main elements (physical object, electronic design document, computer models and information links) for different stages (phases) of the life cycle. Interrelations of modern standards have been identified. Initial mathematical models for solving the main design problems have been considered. At the same time, it is proposed to calculate the wear resistance of the switching device using proven empirical dependencies.

Model experiments to optimize the design of a switching device using mathematical and computer models are, in fact, virtual tests of digital models. Conducting virtual tests of prototypes and installation series samples seems inappropriate, since for switching devices, as well as for other devices of traditional purpose, all types and methods of testing are established by standards, which are mandatory and quite sufficient in the development and application of their intended purpose.

At the stages of production and operation, it is recommended to use simulation models and processing of information from sensors installed in the device.

Conclusions. When creating digital models, one should proceed from the provisions of the standards. It is sufficient to model physical processes based on known mathematical models. Model experiments based on these models, which are, in fact, a type of virtual tests, are advisable to use in design optimization. It is recommended to use the research results in the creation and application of digital models of high-current switching devices.

References

1. Andryushkevich S.K., Kovalev S.P., Nefedov E.I. *Podkhody k razrabotke i primeneniyu tsifrovyykh dvoynikov dlya energeticheskikh sistem* [Approaches to development and application of digital twins for energy systems]. *Tsifrovaya podstantsiya*, 2019, no. 12, pp. 28–33.
2. Artobolevsky I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin. 4-e izd.* [Theory of mechanisms and machines. 4th ed.]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 360 p.
3. Bogomolov R.A. *Tsifrovye dvoyniki menyayut protsessy upravleniya v energosisteme* [Digital twins are changing the management processes in the energy system]. *RUM*, 2023, no. (610)2, pp. 36–40.
4. Voronay N.I., Massol A.V., Kolosok I.N., Massel A.G. *IT-infrastruktura dlya postroeniya intellektual'nykh sistem upravleniya razvitiem i funktsionirovaniem energeticheskikh sistem na osnove tsifrovyykh dvoynikov i tsifrovyykh obrazov* [IT infrastructure for building intelligent control systems for the development and functioning of energy systems based on digital twins and digital images]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2021, no. 1, pp. 3–13.
5. Ozhegov M.A. *Tsifrovye tekhnologii v energetike: perspektivy i sovremennost'* [Digital technologies in the energy sector: prospects and modernity] *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2023, no. 1(76), pp. 18–19.
6. Kurbatov P.A., ed. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov. 5-e izd.* [Fundamentals of electrical apparatus theory. 5th ed.]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2015, 592 p.
7. Prokhorov A., Lysachev M. *Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt* [Digital twin. Analysis, trends, global experience]. Moscow, Al'yans Print, 2020, 401 p.
8. Malakuti S., Shalkvik P.V., Boss B., Sastri C.R. *Primenenie tsifrovyykh dvoynikov v promyshlennosti* [Application of digital twins in industry]. *Sovremennye tekhnologii*, 2022, no. 8, pp. 34–41.
9. Taranukha N.L., Semenova S.V., Pankov S.N. *Tsifrovoy dvoynik kak effektivnyy instrument tsifrovoy transformatsii promyshlennykh predpriyatiy* [Digital twin as an effective tool for digital transformation of industrial enterprises]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2023, vol. 21, no. 3, pp. 11–26. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-11-26.
10. DOD Instruction 5000.97, «Digital Engineering» – DOD Directives Division, 2023. Available at: <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodi/500097p.PDF> (Access Date: 2025, Apr. 23).
11. Guodong Shao. Use Case Scenarios for Digital Twin Implementation Based on ISO 23247. Available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=932269 (Access Date: 2025, Apr. 23)
12. Huang F., Liao W. Design and Application of a MCÜ-based Smart Contactor System. *Energy and Power Engineering*, 2013, no. 5, pp. 1–5. DOI: 10.4236/epe.2013.53B001.
13. Yu G.-F., Chiu Y.-J., Zheng X. et al. Contact pressure of high-voltage DC power relay change and life production and structure optimization. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814021991666.
14. Zhang B., Zhang M., Dong T. High-Fidelity Digital Twin Modeling Method for Contactor Operation Simulation. In: The 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Application (LDIA 2021). Shenyang, Shenyang University of Technology, 2021, 1 p. DOI: 10.1109/LDIA49489.2021.9505888.

IVAN P. IVANOV – Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, JSC VNIIR-Progress, Russia, Cheboksary (ipivanov@vniir.ru)

ALEXEY V. MIKHAILOV – Candidate of Technical Sciences, Head of the Direction, JSC VNIIR-Progress; Acting Head of the Department of Electrical and Electronic Devices, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (avmihailov@vniir.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9072-3442>).

SERGEY A. MOISEEV – Deputy General Director, JSC VNIIR-Progress, Russia, Cheboksary (moiseev@vniir.ru).

Формат цитирования: Иванов И.П., Михайлов А.В., Моисеев С.А. Особенности подходов к созданию цифровых моделей и двойников коммутационного аппарата // Вестник Чувашского университета. 2025. № 2. С. 62–71. DOI: 10.47026/1810-1909-2025-2-62-71.