

УДК 65.011.56:519.876.5, 629.12.001, 681.518: 004.685.5

ТЕОРИЯ ПРАКТИКИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В СУДОСТРОЕНИИ

Алексеев А.В. (Санкт-Петербург)

Актуальность. Цифровая трансформация общества привела к интенсивному развитию теории и практики моделирования организационно-технических систем и процессов [1]. Это, в свою очередь, позволило создать, пожалуй, наиболее совершенный класс, высшую форму технологии комплексного моделирования – класс цифровых двойников объектов автоматизации и их процессов [2-5].

Состояние вопроса. Для современных, исключительно сложных по структуре, функциональным возможностям и алгоритмам объектов автоматизации и их анализа, переход к моделям класса ЦД позволил перейти по существу к системно замкнутому, единому циклу их комплексного моделирования.

Циклу моделирования от теоретического модельного представления ОА к синхронизированному вводу в цифровую модель реальных исходных данных от соответствующих датчиков их съема с ОА, к прогнозированию их поведения, цифровой оценке получаемых результатов и оценке эффективности функционирования ОА в интересах обоснования технических решений по их совершенствованию.

Как правило, ранее этот цикл в силу сложности решаемых исследовательских задач, недостаточных возможностей вычислительных средств ограничивался длительным процессом теоретического обоснования моделей и, в лучшем случае, экспериментальной апробацией возможности реализации модели без масштабного исследовательского использования разработанной модели и средства ее реализации на широком спектре исходных данных. Согласно ряду исследований, уровень методов моделирования в рамках науки управления в ряде случаев превосходит уровень использования моделей.

С переходом к классу ЦД обстановка принципиально изменилась. У создаваемых моделей в классе ЦД [2-8] появилась уникальная возможность их использования в реальном масштабе времени (РМВ) от реальных исходных данных, снимаемых с реального ОА. Тем самым, стала доступной возможность оценки адекватности модели и ее использования для прогнозирования поведения реального ОА. В том числе, в широком спектре вариантов исходных данных, включая тестирование по различным сценарным вариантам нештатных и даже аварийных ситуаций.

Проблема развития ЦД. В связи с новыми возможностями вычислительной техники, практика и бурные темпы создания ЦД для широкого круга задач привели к тому, что теоретический сегмент их обоснования и создания стал «теряться» среди обилия получаемых эмпирических, подчас разрозненных, данных, а также без их верификации и оценки валидности [7-11]. Более того, имеют место отдельные попытки создать теорию ЦД, к сожалению, в отрыве от обилия уже известных практик их создания, включая диссертационные исследования на степень доктора наук [12-14].

Исследователи и сегодня по-разному трактуют понятие ЦД в развитие трактовки ГОСТ [15], их назначение, основные задачи, характерные свойства, критерии оценки качества и развития, а также многие другие теоретические и прикладные аспекты.

Постановка задачи исследования. В этой связи представляется целесообразным на основе систематизации широкого спектра эмпирических данных сформулировать базовые теоретические положения модельного описания ЦД, их специфических свойств, структурных характеристик и ожидаемых результатов, построения, создания и, главное, использования ЦД.

Причем, в этой связи уместно поставить задачу разработки определенных методологических положений именно теории практики цифровых двойников применительно к одной из отраслей знаний и экономики, среди которых выбрано судостроение.

Ожидаемый результат. Моделирование сегодня является главным средством научного познания действительности, основным методом исследования ОА [1-15]. Как способ теоретического анализа и практического действия, моделирование направлено на разработку и использование моделей описания ОА, прогнозирования и оценки целесообразности (качества) их создания, функционирования и развития ОА [12-15]. Именно поэтому предлагаемая попытка обобщить теорию практики ЦД может, по нашему мнению, способствовать дальнейшему развитию ЦД и повышению за счет их возможностей качества управления ОА.

Направление и метод решения задач исследования. С учетом многообразия мнений в сообществе исследователей теории и практики ЦД принято целесообразным решить поставленную задачу исследования на основе анализа одного из практических и перспективных вариантов ЦД [5], а также опыта и результатов его создания, использования для неоднородного ряда ОА [16-23].

В его основе инвариантность исполнения, интерактивная актуализация и синхронизация модели с состоянием ОА и процессами его функционирования с целью интеллектуальной поддержки в автоматическом режиме и оптимизации принимаемых оператором (администратором) ОА управленческих решений по эффективному ее функционированию в сочетании с прогнозированием показателей качества ОА, визуализацией системных свойств и характеристик, а также мониторингом состояния, структурной и функциональной динамики ОА.

Рассматривая этот вариант в качестве исследовательского прототипа (ИП), обладающего, по нашей оценке, определенным конкурентным превосходством в сравнении с альтернативными вариантами, задача разработки теории практики ЦД решалась методом реализации следующих базовых задач прикладных исследований:

- систематизации и формулировки понятия, предназначения и базовых теоретических положений по концепции развития ЦД, их классификации, основным и преимущественным свойствам;
- представления структурной и функциональной модели ЦД, обоснованию метода их реализации, системы критериев и показателей их качества, анализа и синтеза;
- определения путей перспективного развития и эффективной реализации разработанной модели ЦД на соответствие теоретическим положениям по критериям ее адекватности, верификации и валидности.

Теория практики ЦД. Исходными теоретическими положениями теории практики создания и использования исследовательского прототипа ЦД были приняты:

1. *Определение.* Вопрос формирования понятийного аппарата при проведении исследований всегда является определяющим и требующим особой тщательности в аспектах однозначности толкования и граничных условий определения каждого понятия и, что немаловажно, их системы в целом. В этой связи и в связи с наличием многочисленных определений понятия ЦД [1-14], включая ГОСТ [15], ниже приведено в авторской редакции следующее определение ЦД.

Цифровой двойник объекта автоматизации и его анализа – цифровая (виртуальная) интерактивная модель («копия») объекта автоматизации и соответствующих процессов, синхронизированная (с двухсторонними связями) с ним и позволяющая:

- **формировать и отображать** (визуализировать) операторам адекватный структурно-функциональный и системный динамический образ (облик) ОА для *когнитивной обработки* практических данных, их использования при *разработке, производстве, эксплуатации ОА в обеспечение их конкурентной способности и продвижения на рынке;*

- **оптимизировать** параметры, характеристики, проектное качество и эффективность эксплуатации ОА, в том числе *за счет* ниже названных технологий цифрового паспорта (ЦП), квалиметрического анализа, синтеза, оптимизации решений (КАСОП [16-24]), роботизированного проектирования и использования соответствующих комплексов (РПК [23-30]);

- **прогнозировать** (предсказывать) результаты функционирования ОА и их развития, в том числе *за счет* технологий и систем мониторинга, прогнозирования и контроля (СМПК [25]), квалиметрического прогнозирования [7-8], мониторинга результатов реализации плановых позиций в контрольных точках по данным квитиования (СПРУ [26]);

- **обеспечивать** качество ОА (продуктов и услуг в целом), в том числе за счет технологий ЦД, квалиметрического анализа, синтеза, повышения конкурентной способности и перспективности развития (КСПр [10-11]);

- **обнаруживать проблемы** функционирования ОА и решать их, в том числе *за счет* технологий и систем поддержки решений и управления (СПРУ [19-23, 26]).

2. *Предназначение.* ЦД ОА – средство исследования процессов функционирования, свойств и характеристик ОА с целью анализа, синтеза, отработки и оптимизации технологических решений, сопоставления их между собой, определения соответствия теоретических и практических результатов, обоснования путей совершенствования ЦД.

Это обеспечивает *возможность использования ЦД для:* 2.1. Проектного обоснования планирования применения ЦД и эффективной эксплуатации ОА в зависимости от его функциональных свойств и технического состояния. 2.2. Принятия обоснованных решений о техническом обслуживании и ремонте изделия. 2.3. Использования ЦД для подготовки и переподготовки специалистов по эффективной эксплуатации ОА. 2.4. Накопления, систематизации и обработки практических данных для исследования ОА с использованием ЦД и научно-технического обоснования путей развития ОА и его ЦД.

3. *Основные задачи ЦД и алгоритмы их решения.* Для достижения назначенных целей необходимо решать следующие основные задачи:

3.1. Регистрации и визуализации основных квалиметрических данных о ЦД (задача формирования цифрового паспорта (ЦП), цифрового профиля ЦД) в сопоставлении с другими альтернативными вариантами и ЦП, в первую очередь, с исследовательским прототипом, что позволяет в едином информационном пространстве достаточно объективно представлять все множество объектов анализа класса ЦД.

Алгоритм реализации задачи ЦП с представлением квалиметрических данных ЦД включает определение и структуризацию основных параметров, характеристик, частных показателей качества (ЧПК) и свойств (групповых показателей качества, ГПК), а также оценку комплексного показателя качества (КПК) отдельного объекта моделирования (КПК) Q_k и агрегированного показателя качества (АПК) их системы Q [16, 19, 23]

$$Q_k = C_{k,M}^{t_M} \left\{ w_m, C_{m,G}^{t_G} \left[w_g, C_{g,N}^{t_N} (w_n, q_n) \right] \right\}, \quad (1)$$

$$Q = C_P^{t_P} \left\{ w_p, C_{p,R}^{t_R} \left[w_r, C_{r,K}^{t_K} (w_k, Q_k) \right] \right\}, \quad (2)$$

где: $C_{g,N}^{t_N} (w_n, q_n)$ – обобщенный оператор свертки ЧПК q_n с общим их числом N и индексом критериальной значимости w_n в g -ый ГПК $C_{g,N}^{t_N} (...)$ по алгоритму типа t_N : А – для аддитивного (линейного) алгоритма, впервые предложенного А.Н. Крыловым; М – для мультипликативного алгоритма Д.Ф. Нэша; Г – для гармонического алгоритма и других алгоритмов свертки (первый уровень свертки показателей качества);

$C_{m,G}^{t_G}[\mathbf{w}_g, C_{g,N}^{t_N}(\dots)]$ – обобщенный оператор свертки при соответствующих индексах критериальной значимости \mathbf{w}_g ГПК с их общим числом G в m -ый модельный (МПК) показатель качества (второй уровень свертки показателей качества ОА);

$C_{k,M}^{t_M}\{\mathbf{w}_m, C_{m,G}^{t_G}[\dots]\}$ – обобщенный оператор свертки МПК в k -ый комплексный, (интегральный, обобщенный, сводный) показатель (КПК) качества (четвертый уровень свертки показателей качества ОА).

Для системы объектов анализа с ЧПК, ГПК, МПК и КПК в модели (2) приняты следующие обозначения:

$C_{r,K}^{t_K}(\mathbf{w}_k, Q_k)$ – обобщенный оператор свертки КПК Q_k с общим их числом K в r -ый сводный показатель качества (СПК) однородных ОА по алгоритму типа t_K (пятый уровень свертки показателей качества ОА);

$C_{p,R}^{t_R}[\mathbf{w}_r, C_{r,K}^{t_K}(\dots)]$ – обобщенный оператор свертки СПК $C_{r,K}^{t_K}(\dots)$ с общим их числом R в p -ый модельный системный показатель качества (МСПК) разнородных, либо однородных ОА по алгоритму типа t_K (шестой уровень свертки показателей качества);

$C_P^{t_P}\{\mathbf{w}_p, C_{p,R}^{t_R}[\dots]\}$ – обобщенный оператор свертки МСПК $C_{p,R}^{t_R}[\dots]$ с общим их числом P в полимодельный агрегированный показатель качества (АПК) системы ОА по алгоритму типа t_P (седьмой уровень свертки показателей качества ОА).

Пример решения задачи ЦП, реализованной в модуле «1.ЦП» роботизированного проектного комплекса (РПК) «КСР-2023» [9-11, 18], приведен на рисунке 1.

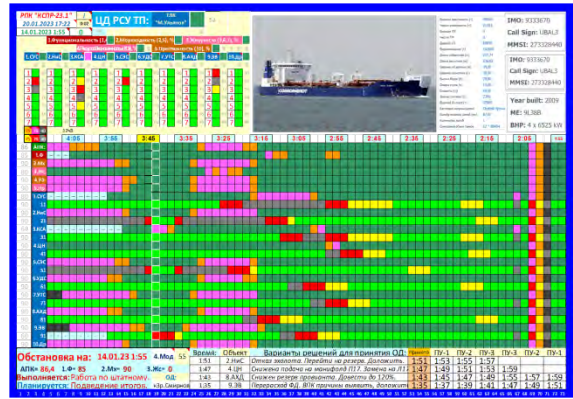
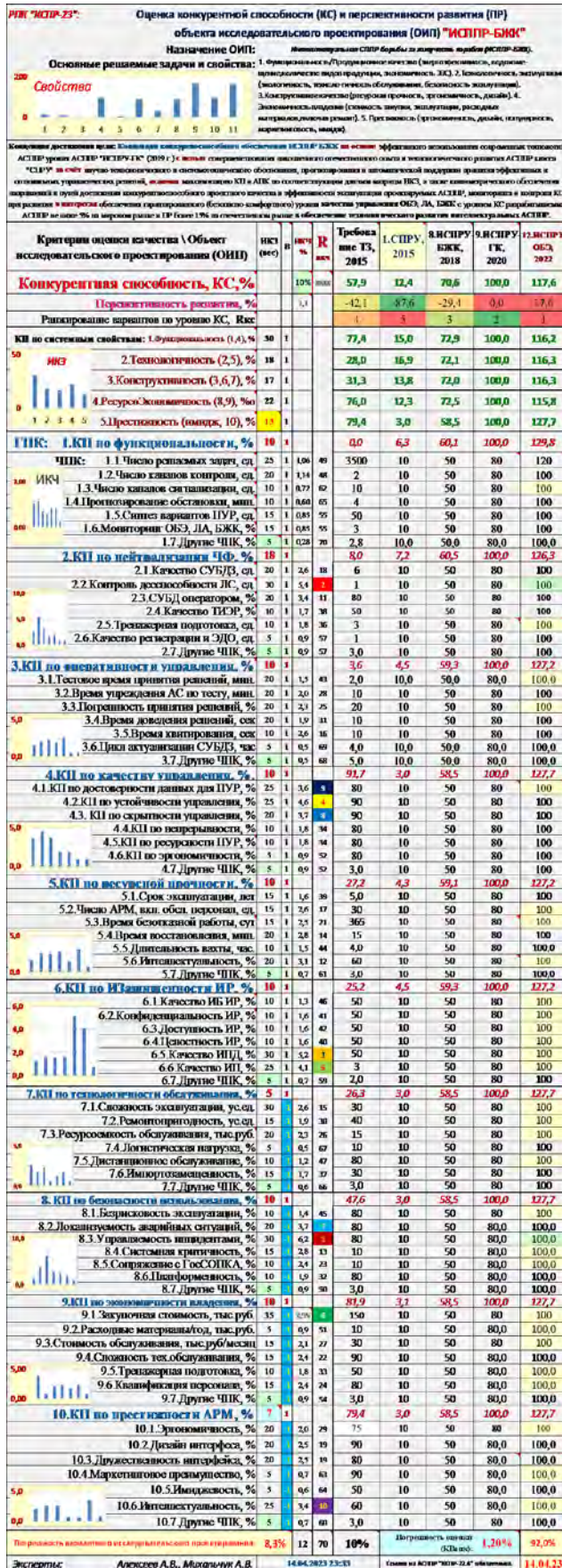


Рис. 1.б. Экранная форма модуля «2.СМПК (ЦМ)»

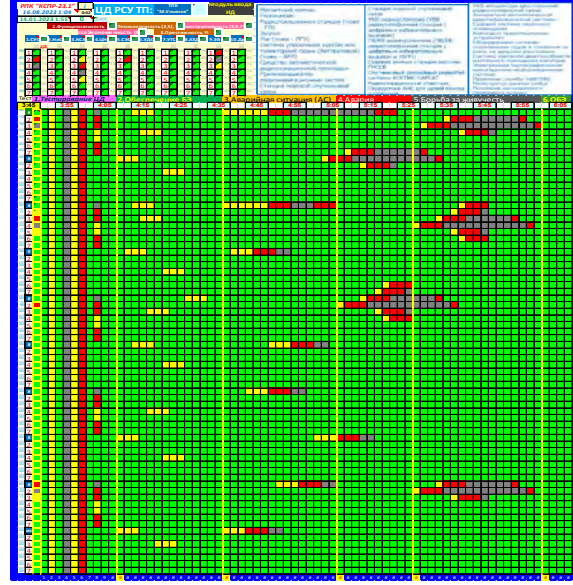


Рис. 1.в. Экранная форма модуля «3.СМПК (ЦТ)»

Перечень датчиков технического состояния судовых систем (ЧТК)

№ датчика	Обозначение	Модуль в ЦД	Адрес в ЦД	Назначение
1	ЭРП_д1	2.ИД	E9	Завка на ремонт принтера, датчик №1 подключается в поле (ячейка) E9 модуля "2.ИД"
2	ЭРП_д2	2.ИД	E10	Завка на ремонт интернета, датчик №2 подключается в поле (ячейка) E10 модуля "2.ИД"
3	ДВ IS	2.ИД	E11	Датчик включения IntraService, подключается в поле (ячейка) E11 модуля "2.ИД"
4	ДР IS	2.ИД	E12	Датчик работоспособности IntraService, подключается в поле (ячейка) E12 модуля "2.ИД"
5	ДЗ IS	2.ИД	E13	Датчик звонящие IntraService, подключается в поле (ячейка) E13 модуля "2.ИД"
6	ДП Intr	2.ИД	H9	Датчик посещения IntraService, подключается в поле (ячейка) H9 модуля "2.ИД"

Рис. 1.г. Экранная форма (фрагмент) модуля «4.ИД»

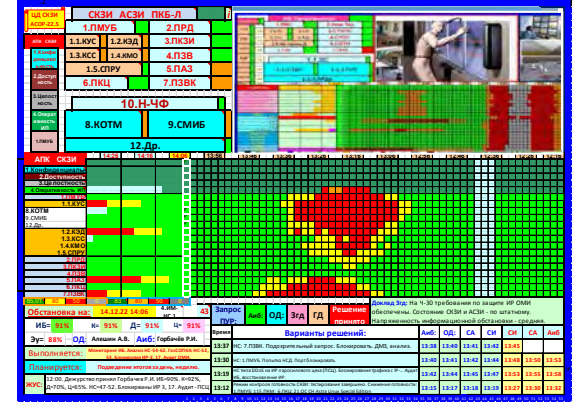


Рис. 1.д. Экранная форма модуля «5.СПРУ»

Рис. 1. Пример основных экранных форм модуля «1.ЦП» ЦД при реализации в РПК «СПРУ-2023»

На рис. 1 представлены основные системные (паспортные) данные по тезаурусу, решаемым задачам, свойствам и характеристикам 5 вариантов ОА типа интеллектуальных систем поддержки принятия решений по борьбе за живучесть корабля (ОИП «ИСППР-БЖК»), в том числе с элементами искусственного интеллекта [27].

3.2. Цифрового комплексного (полимодельного) моделирования (ЦМ) качества и эффективности процессов функционирования ОА в РМВ с визуализацией результатов системы мониторинга, прогнозирования и контроля (СМПК) в структурной, динамической (временной) форме с аудио-видео-поддержкой операторов ЦД.

Алгоритм реализации задачи ЦМ (СМПК) и представления квалиметрических данных ЦД включает непрерывную оценку и визуализацию значений АПК, КПК, МПК, ГПК, которые непрерывно оцениваются по вводимым ЧПК. Соответствующее прогнозирование реализуется на интервале упреждения до 16 циклов длительностью, например, (1...2) минуты с контролем по 2-битовой (4 уровня) модели контроля: соответствие требованиям (ВТ); угроза невыполнения требований (УНТ); невыполнение требований (НТ); угроза потери управления (УПУ) [19].

При этом, алгоритм прогнозирования реализует модель адаптивного регрессионного анализа по (4...16) значениям ЦМ в каждом канале контроля обстановки [23].

В свою очередь, для получения значений отдельных ЧПК и ГПК в контексте парадигмы полимодельности могут использоваться отдельные модели, естественно, при их наличии и целесообразности (при наличии достаточного их модельного качества).

Пример решения задачи ЦМ, реализованной в модуле «2.ЦМ» РПК «КСПР-2023» [19], приведен на рис. 1.б. Описание подобных данных подробно приведено ранее в ряде работ [16, 19, 24, 29, 30, 32], опубликованных в ходе отработки данного решения.

3.3. Цифрового комплексного (полимодельного) моделирования, аналогичного задаче ЦМ, и отличающегося использованием в качестве исходных – данных от датчиков измерения фактического состояния ОА. Получаемый при этом результат моделирования вполне обоснованно и часто называют «цифровой тенью» ОА (ЦТ).

Алгоритм реализации задачи ЦТ, естественно, идентичен алгоритму задачи ЦМ (СМПК), что позволяет получить одно из важнейших преимуществ – возможность непосредственного сравнения результатов моделирования с фактическими данными.

Пример реализации задачи ЦТ, реализованной в модуле «3.ЦТ» РПК «КСПР-2023» [19], приведен на рис. 1.в. Пример перечня вводимых данных с датчиков фактической обстановки приведен на рис. 1.г.

Аналогичный пример ЦД другого типа ОА – Системы комплексной защиты информации, реализованный на базе РПК «КАСОП-23» [24], приведен на рис. 1.д.

3.4. Управления базой данных и знаний, обеспечивающего решение всего комплекса задач ЦД (СУБДЗ), включая актуализацию данных и их хранение.

3.5. Поддержки решений оператора по управлению ЦД (обоснования и регистрации проектных, управленческих решений), а также мониторинга и управления реализаций принятых решений (СПРУ) по технологии, подробно представленных ранее в ряде работ [9-11, 16, 18, 26].

Пример решения задачи СПРУ, реализованной в модуле «2.СМПК (ЦМ)» и «3.ЦБ», приведен соответственно в нижней части на рис. 1.б и рис. 1.д.

4. *Типовая структура.* Характерными элементами структуры ЦД, представленной на рис. 1, являются модули:

«4.1.ЦП» – цифровой паспорт, цифровой профиль ОА.

«4.2.СМПК (ЦМ)» – цифровая модель ОА, полимодельный комплекс цифрового представления ОА, реализующий задачи мониторинга, прогнозирования и контроля проектного качества и эффективности эксплуатации ОА.

«4.3.ЦТ» – цифровая тень, реализующая комплекс задач модуля «2.СМПК (ЦМ)», но при использовании в качестве исходных – данные от датчиков считывания информации с реального ОА.

«4.4.СУБДЗ» – система актуализации и управления базой данных и знаний.

«4.5.СПРУ» – система поддержки решений и управления их реализацией.

5. *Основные позитивные свойства и преимущества ЦД* могут быть сформулированы следующим образом:

5.1. Полномасштабное решение задачи комплексного моделирования ОА на основе функционально замкнутого полимодельного комплекса заданной структуры.

5.2. Использование в реальном, либо модельном масштабе времени, исходных данных из СУБДЗ, в том числе в варианте сценариев фактической обстановки (СФО) в виде модели, либо фрагментов записи реальных процессов.

5.3. Возможность актуализации и накопления разнородных данных в СУБДЗ с их вариантной структуризацией и использованием, в том числе при вариантном проектировании и ранжировании.

5.4. Возможность инструментальной верификации, оценки и контроля валидности за счет возможности сопоставления модельных и фактических исходных данных.

5.5. Возможность использования ЦД в учебно-тренажерном режиме, а также в качестве экспериментальной платформы для отработки новых технологических решений с использованием структурированных данных СУБДЗ, СФО и уникальных исходных данных.

5.6. Инвариантность ЦД представленного типа (прототипа) к специфике ОА.

5.7. Возможность отработки и оптимизации комплекса проектных и управленческих решений.

6. *Основные специфические (негативные) свойства ЦД:*

6.1. Необходимость высокой широкопрофильной квалификации операторов и пользователей-исследователей ЦД.

6.2. Высокие ресурсные требования по разработке, созданию и, даже, эксплуатации ЦД, как следствие их высокой интеллектуальной насыщенности при одновременной излишней осторожности (даже, боязни) операторов и пользователей.

6.3. Относительная сложность автоматической регистрации и интерпретации условий моделирования и их результатов, как следствие большого объема данных.

7. *Система критериев оценки проектного качества и эффективности эксплуатации ЦД:* 7.1. Качество модельного представления ЦД по значению АПК. 7.2. ГПК, характеризующие модельные свойства ЦД: адекватность, конечность, информативность, безызбыточность, функциональность, доступность модели ЦД. 7.3. ГПК эффективности эксплуатации: достоверность вводимых исходных данных; погрешность оценки АПК ЦД; эффективность эксплуатации ЦД (доля времени использования ЦД в режиме цифрового близнеца); доля предотвращенных аварийных ситуаций; степень соответствия параметров ЦД заданным требованиям; доля контролируемых параметров ОА; индекс верификации ЦД; индекс валидности ЦД.

8. *Основные требования к ЦД:* 8.1. ЦД должен использовать и отражать данные на всех стадиях и этапах жизненного цикла (ЖЦ) ОА (укрупненно) [16]: Р – разработки ОА; П – производства ОА; Э – эксплуатации. 8.2. ЦД должен обеспечивать коллективную работу специалистов в едином информационном пространстве с числом автоматизированных рабочих мест (АРМ) по числу основных структурных элементов (порядка 5 в соответствии с п.4) при одновременной возможности управления ЦД с каждого из АРМ. 8.3. ЦД должен обеспечивать точности по критерию коэффициента вариации (КВ) прогнозируемых свойств (ГПК) порядка 5% при КВ вводимых данных до 15% относительно фактических параметров ОА. 8.4. ЦД должен обеспечивать заданные требования

в течение всего ЖЦ ОА с возможностью актуализации хранимых данных. 8.5. ЦД должен состоять минимум из 5 структурных элементов согласно п. 4, обеспечивающих решение 5 основных задач согласно п. 3 в режимах работы:

Р.1. Комплексный самоконтроль (по проектным данным с формированием ЦП).

Р.2. Моделирование (с выбором типовых СФО и формированием ЦМ, отработкой задач интерпретации обстановки, информационно-аналитической и интеллектуальной поддержкой решений, регистрацией принятых решений и мониторингом их реализации).

Р.3. Прогнозирование (по реальным данным ОА с формированием ЦБ, актуализацией и расширением комплекта СФО по наиболее характерным эпизодам).

Р4. Учебно-тренажерный (для подготовки и переподготовки специалистов).

Р5. Информационно-поисковый (с возможностью визуализации структурированных данных по отслеживанию и анализу истории создания и развития ОА на этапах ЖЦ).

9. Состав основных теоретических положений анализа и синтеза (прогнозирования) функционирования ОА с использованием ЦД: парадигма подобия реальному ОА; понятие ЦД; концепция ЦД; классификация ЦД; цели и задачи ЦД; структура ЦД; свойства и система критериев анализа и синтеза ЦД; качество модели ЦД; методология анализа и синтеза проектного качества и эффективности эксплуатации ЦД; технология реализации модели ЦД; верификация и валидность ЦД; перспективы развития ЦД.

10. Состав основных теоретических положений исследовательского проектирования ОА с использованием ЦД: концепция исследовательского проектирования; систематизация и анализ практик, а также тенденций развития ЦД; анализ системных показателей качества ЦД и их корневой чувствительности; вариантное проектирование, ранжирование и оптимизация ЦД; обоснование технологических и технических решений по реализации оптимального варианта ЦД; верификация и оценка валидности.

Блоки 8 и 9 представленной теории практики ЦД по понятным причинам ограниченного объема статьи приведены в варианте структурного состава, но многие из положений могут быть заимствованы из известных публикаций, включая [28-46].

11. Перспективные направления развития: 11.1. Накопление и совершенствование системы вариантов проектных и управленческих решений. 11.2. Переход в режим роботизированного управления ЦД. 11.3. Использование ЦД в автоматическом режиме управления ОА по решению задач, достижению назначаемых целей и другие.

12. Методические проблемы разработки, создания и использования ЦД: 12.1. Проблема адекватности и контроля качества модели ЦД. 12.2. Проблема достоверности исходных данных и принятых допущений. 12.3. Проблема ограниченных возможностей в получении нужной информации, которые влияют и на построение, и на использование модели ЦД. 12.4. Проблема доверия пользователей к ЦД и ограниченного объема их использования на практике. 12.5. Проблема чрезмерного предъявления требований к ЦД и соответствующих ожиданий, что приводит к чрезмерной их стоимости, далеко не всегда обоснованной и адекватной. Соответствующая тенденция использования модных деклараций и маркетинговых спекуляций.

13. Вместе с тем, опыт проведения многовариантных исследований и квалитетического анализа широкого спектра ОА позволяет, прежде всего, отметить особую важность и конструктивность ЦД, их возможностей и перспективность за счет:

13.1. Использования характерных для ЦД системных аспектов, методологии и технологии проведения анализа качества структурно и функционально сложных ОА [5-7], что позволяет использовать, прежде всего, данные повышенной ценности.

13.2. Анализа динамики, эмерджентных свойств и синтеза качества при исследовательском проектировании оптимального варианта ОА, а также взаимосвязей элементов в составе ЦД, характеризующих и влияющих на качество ОА.

13.3. Синтеза эффективных алгоритмов управления при обосновании качества проектных и управленческих решений (ПУР) на основе данных квалиметрического анализа, что указывает на актуальность и целесообразность квалиметрического мониторинга управления качеством ОА.

13.4. Использование концепции полимодельного анализа-синтеза ПУР, обеспечивающей многоаспектный (полимодельный) учёт особенностей разработки и эксплуатации ОА с соответствующим многокритериальным методическим аппаратом и технологией автоматизированной поддержки принятия ПУР, например, с использованием интеллектуальных систем класса автоматизированных систем поддержки принятия решений типа «ASPID», «МАИ», «КРОПУР», «АСОР», «КАСОР» [7, 16-18, 28, 31-36, 44].

13.5. Обоснования и, прежде всего, оптимизации ПУР, подлежащих внедрению при создании современных структурно и функционально сложных ОА, что обеспечивает их эффективное и безопасное, в том числе катастрофоустойчивое использование.

13.6. Моделирования и анализа качества ОА при различных вариантах их построения и использования с соответствующим ранжированием.

13.7. Анализа факторов и проблем, а также обоснования программ внедрения новых технологий и ПУР с учётом «операторского компонента» ОА, т.е. «пресловутых» человеческих факторов, имеющих сегодня, как известно, ключевой характер.

Выводы. Цифровая трансформация общества привела к интенсивному развитию теории и практики моделирования сложных организационно-технических систем и процессов, созданию высшей формы комплексного моделирования – класса ЦД современных, исключительно сложных по требованиям, структуре, функциональным возможностям и алгоритмам объектов анализа.

На основе анализа одной из перспективных пятиэлементной структуры ЦД типового ОА систематизированы теоретические положения, современные взгляды и концепции развития ЦД, сформулированы преимущественные свойства, критерии и показатели их качества. Показано, что первоочередным требованием и критерием оптимизации ЦД следует считать показатели валидности, интеллектуализации процессов и конкурентного превосходства развития ЦД.

Автор выражает искреннюю благодарность профессору Соколову Б.В., заведующему кафедрой к.т.н. Согонову С.А., профессору Хруцкому О.В, профессору Равину А.А. и к.т.н. Михальчуку А.В. за многолетнее творческое сотрудничество, помощь и поддержку при подготовке настоящей статьи.

Литература

1. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности» от 6 ноября 2021 г. № 3142-р.
2. Серугендо Д.Д., Каттинг-Десель А.Ф., Гиз Л., Корменье Т., Хан И., Хоссенлоп Л. Цифровые двойники: от концепций до промышленной эксплуатации. [Электронный ресурс] / <https://www.osp.ru/os/2022/04/13056597> (дата обращения 12.04.2023).
3. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое / науч. ред. А. Боровиков. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
4. Библиотека цифровых моделей и виртуальный полигон для выполнения цифровых двойников / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019612794, 28.02.2019. Заявка № 2019611680 от 20.02.2019.
5. Цифровой двойник системы комплексной защиты информации в инвариантном исполнении (ЦД СКЗИ) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр программ Федеральной службы по интеллектуальной собственности) № 2023662162, 23.06.2023.

6. **Соловьев И.В., Корольков Г.Н., Бараненко А.А., Баранов М.Н. и др.** Морская радиоэлектроника: Справочник / под ред. В.А. Кравченко. – СПб.: Политехника, 2003. – 246 с.
7. **Согонов С.А., Максимова М.А., Хруцкий О.В., Равин А.А., Михальчук А.В.** Модель и технология цифровых двойников систем автоматизации судов / Актуальные проблемы морской энергетики: материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2023.
8. **Смольников А.В., Сус Г.Н., Ушакова Н.П.** Когнитивные технологии системы поддержки принятия решений и управления борьбой за живучесть корабля, судна // Системы управления и обработки информации: науч.-техн. сб. / АО «Концерн «НПО «Аврора». – СПб., 2019. – Вып. 3(46). – С. 18-27.
9. **Тычинин И.Ю., Худобородов Е.Ф.** Теория практики системного обоснования требований и путей обеспечения военно-технического превосходства ВМФ // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы восьмой международной научно-технической конференции в рамках Третьего Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». – СПб.: СПбГМТУ, 2019. – С. 251-357.
10. **Кузнецов В.В., Равин А.А., Согонов С.А., Хруцкий О.В.** Оптимизация системного управления ОМТИ: теория практики // Труды СПбГМТУ, выпуск 5 (Труды ЛКИ. Выпуск 268). – 2018. – С. 65-69.
11. **Равин А.А., Согонов С.А., Хруцкий О.В.** Теория практики оптимизации процессов системного управления объектами морской техники // Корабельная энергетика: из прошлого в будущее: материалы Всероссийского межотраслевого научно-технического форума. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2017. – с. 343-346.
12. **Жиляев А.А.** Методы и средства построения «цифровых двойников» процессов управления предприятиями на основе онтологий и мультиагентных технологий: Автореф. дисс. ... к.т.н. – 2021. (ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева»)
13. **Пантюхин О.В.** Разработка методологии управления качеством продукции ответственного назначения на основе цифровых двойников технологических процессов и изделий (на примере изготовления гильз для высокоэффективных патронов): Автореф. дисс. ... д.т.н. – 2021. (Тулский государственный университет).
14. **Воробьев А.В.** Методологические основы обработки пространственной информации для поддержки принятия решений на основе агрегированных цифровых двойников (на примере высокоширотных геомагнитных данных): Автореф. дисс. ... д.т.н. – 2021. – 32 с.
15. Национальный стандарт Российской Федерации Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники. Основные положения. – 2021. – 17 с.
16. **Алексеев А.В.** Концептуальные аспекты развития критических объектов морской техники и морской инфраструктуры. – СПб.: Морские интеллектуальные технологии, 2015. – № 2 (28). Т.1. – с. 48-58.
17. **Соколов Б.В., Алексеев А.В.** Моделирование сложных систем: эволюция взглядов и концепций, полимодельные комплексы, проблемы и направления развития // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). Труды конференции (электронное издание), 20–22 октября 2021 г. – Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2021. – С. 83-88.
18. **Алексеев А.В., Михальчук А.В., Грачев В.Н., Миклуш С.В.** Технология разработки, структура и реализация цифрового двойника типового объекта информатизации / Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и

- комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем (ИКМ МТМТС-2023)». Труды конференции (Программа Международного Военно-морского салона «МВМС-2023»). – М. Издательство Перо, 2023. – С. 36-43.
19. **Алексеев А.В.** Модель инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники // Морские интеллектуальные технологии / Marine intellectual technologies. – 2020. – № 2, том 2. – С. 53-60.
 20. **Алексеев А.В., Согонов С.А., Максимова М.А., Хруцкий О.В., Равин А.А., Михальчук А.В.** Модель и технология цифровых двойников систем автоматизации судов // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2023 (в печати).
 21. **Алексеев А.В., Согонов С.А., Максимова М.А., Хруцкий О.В., Равин А.А., Михальчук А.В.** Методология создания и учебно-лабораторного использования цифровых двойников систем автоматизации судов и аудита их информационной защищенности // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2023). – СПб., 2022. – С. 402-407.
 22. **Алексеев А.В.** Квалиметрическая концепция и технология создания и использования цифровых двойников в инвариантном исполнении // Международный технологический форум (рабочие материалы). – Рыбинск, 2023.
 23. **Алексеев А.В.** Примеры реализации полимодельного квалиметрического метода системной оптимизации объектов морской техники и морской инфраструктуры // Морские интеллектуальные технологии / Marine intellectual technologies. – 2021. – № 2 (52), том 3. – С. 69-81.
 24. Программа квалиметрического анализа, синтеза и оптимизации решений (КАСОП) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр программ Федеральной службы по интеллектуальной собственности) № 2023616388, 27.03.2023.
 25. Цифровой мониторинг, прогнозирование и контроль успешности реализации комплекса организационно-технических решений (ЦМПК) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр программ Федеральной службы по интеллектуальной собственности) № 2023661669, 1.06.2023.
 26. Программный комплекс системной поддержки принятия решений и управления (СПРУ) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр программ Федеральной службы по интеллектуальной собственности) № 2023616019, 21.03.2023.
 27. **Алексеев А.В., Евсеенко С.М.** Об интеллекте и определении степени интеллектуализации продукции и деятельности приборостроительного предприятия // Инновации. Научно-практический ежемесячный журнал. – 2021. – № 06 (272). – С. 36-47
 28. **Алексеев А.В., Михальчук А.В., Карпов А.Е., Орлов К.М., Каганский М.А.** Практика реализации полимодельного квалиметрического метода системной инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы VIII межрегиональной научно-практической конференции. – Севастополь: СевГУ, 2022. – С. 131-136.
 29. **Алексеев А.В.** Технология и программный комплекс квалиметрической ранговой оценки качества сложных информационно-аналитических систем // Материалы IX всероссийской научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении – 2008». – СПб., 2008. – С.110-118.

30. **Алексеев А.В.** Технология оптимизации проектных и управленческих решений при создании автоматизированных систем объектов морской инфраструктуры в защищённом исполнении // *Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009).*
31. **Согинов С.А., Потехин В.С., Мусатенко Р.И.** Теория практики квалиметрического анализа объектов критической информационной инфраструктуры // *Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2021). XII Санкт-Петербургская межрегиональная конференция.* Санкт-Петербург, 28-30 октября 2021 г.: *Материалы конференции.* – СПб.: СПОИСУ, 2021. – С. 240-242.
32. **Алексеев А.В.** Теория практики полимодельного анализа, синтеза и оптимизации разнородных объектов морской техники и морской инфраструктуры // *Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021).* Труды конференции (электронное издание), 20–22 октября 2021 г. – Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2021. – С. 77-82.
33. **Александров В.Л., Алексеев А.В.** Теория практики квалиметрического обеспечения конкурентной способности и перспективности развития объектов морской техники и морской инфраструктуры // *Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017).* 18-20 октября 2017 г. Труды конференции – СПб.: НОИМ, 2017. – С. 74.
34. **Алексеев А.В.** Теория практики агрегирования векторных критериев при системном моделировании объектов морской техники: верификация и валидность, качество и эффективность моделирования // *Девятая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019).* 16-18 октября 2019 г. Труды конференции – Екатеринбург: НОИМ, 2019. – С. 75-82.
35. **Бобрович В.Ю., Антипов В.В., Мусатенко Р.И., Смольников А.В.** Системное управление проектным качеством и живучестью объектов морской техники: теория практики / *Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем (ИКМ МТМТС-2023)».* Труды конференции (Программа Международного Военно-морского салона «МВМС-2023») – М.: Издательство Перо, 2023. – С. 48-56.
36. **Александров В.Л., Алексеев А.В., Поляничко В.В., Ходан С.В.** Проблема организационно-технического мониторинга, прогнозирования и управления жизненным циклом // *Четвертая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2017).* Труды конференции – СПб.: АО «ЦТСС», 2017. – С. 11-15.
37. **Кабанов А.А., Федоров И.А.** Архитектура системы управления цифровыми двойниками производств как основа интеграции различных моделей их представлений // *Вестник РГРТУ.* – 2022. – № 82. – С. 162-176.
38. **Речкалов А.В., Артюхов А.В., Куликов Г.Г., Новиков В.Н.** Концепция системного представления предметной области при формировании цифрового двойника производственного процесса машиностроительного предприятия // *Вестник УГАТУ.* – 2022. – Т. 26, № 1 (95). – С. 120-135.
39. **Халютин С.П., Старостин И.Е., Давидов А.О., Харьков В.П., Жмуров Б.В.** Цифровые двойники в теории и практике авиационной электроэнергетики // *Электричество.* – 2022. – № 10.

40. **Дьяков А.А.** Теория практик: социально-философский потенциал концепции // Известия Саратовского университета. – 2011. – Т. 11. – С. 8-12.
41. **Воробьев А.В., Шакирова Г.Р. и др.** Теория и практика создания информационных систем специального назначения. – Уфа: УГАТУ, 2015. – 165 с.
42. **Воробьев А.В., Христодуло О.И.** Применение цифровых двойников в отраслевых системах поддержки принятия решений при обработке геофизической информации // Перспективы науки. – 2021. – №4 (139). – С. 186-189.
43. **Хитрых Д.** Цифровой двойник: концепция, уровни, связь с Интернетом вещей и роль численного и системного моделирования // САПР и графика. – 2020. – № 7.
44. **Скулябин М.А., Алексеев Ю.С.** Технологии цифровых двойников. Перспективы и проблемы применения в судостроении // Доклад на мастер-классе «Теория и практика цифровых двойников в судостроении». – СПб.: СПбГМТУ, ИАП БЖКС, 2023. – 23 с.
45. **Воронин К.П., Краморенко А.В.** Направления применения цифровых двойников в судоподъеме / Доклад на мастер-классе «Теория и практика цифровых двойников в судостроении». – СПб.: СПбГМТУ, ИАП БЖКС, 2023. – 24 с.
46. **Алексеев А.В.** Квалиметрическая концепция и технология ЦД при исследовательском проектировании объектов морской техники и инфраструктуры / Доклад на мастер-классе «Теория и практика цифровых двойников в судостроении». – СПб.: СПбГМТУ, ИАП БЖКС, 2023. – 15 с.