

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ, СТРУКТУРА И РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ТИПОВОГО ОБЪЕКТА ИНФОРМАТИЗАЦИИ

А.В. Алексеев (Санкт-Петербург), А.В. Михальчук (Тверь),
В.Н. Грачев, С.В. Миклуш (Санкт-Петербург)

Введение. В развитии технологий ситуационного управления в настоящее время разработчиками морской техники и морских транспортных систем (МТ МТС) все большее внимание уделяется вопросам мониторинга системных показателей качества функционирования сложных технических систем и объектов, мониторинга и прогнозирования обстановки в интересах поддержки принятия решений и обоснования выбора оптимальных решений, обеспечения эффективного ситуационного управления [1].

В условиях освоения новых информационных технологий, резкого возрастания соответствующих возможностей, требований и тенденции существенного роста сложности современной МТ МТС особое значение приобретают вопросы их комплексного моделирования в обеспечение эффективного исследовательского проектирования, научно-технического обоснования и оптимального выбора проектных, технических, технологических и управленческих решений (ПТУР) [2, 3].

Более того, интенсивное развитие методов имитационного, цифрового, комплексного моделирования и полимодельных технологий обострило задачу мониторинга и интеллектуального анализа ситуационных факторов, обстановки и поддержки принятия решений, а также роботизации управления в целом [4, 5].

Одним из перспективных решений в направлении комплексного моделирования в последнее десятилетие специалистами признается, активно осваивается и успешно развиваются парадигма, методология и технологии так называемых «цифровых двойников» (ЦД, цифровой тени, Digital Twin), в том числе объектов МТ МТС [5, 6].

В условиях широкого спектра интерпретации различных подходов к парадигме ЦД, взглядов на их построение, возможности и использование далее в сравнительном аспекте рассмотрим так называемый вариант ЦД типового объекта информатизации.

Актуальность. При анализе технологических путей развития, оценке качества и эффективности современных сложных систем автоматизации в составе объектов МТ МТС сегодня приходится учитывать большое число показателей качества, отражающих их системные свойства и функциональные возможности с использованием большого числа измеряемых, либо оцениваемых экспертами частных показателей качества (ЧПК) в сочетании с оценкой групповых (ГПК) и других системных показателей качества (ПК, как правило, при проектировании) Q и эффективности эксплуатации (Э) W объектов МТ МТС (ОМТС) в целом, как меры реализации проектного качества.

Без оценки этих системных (интегральных, обобщенных) показателей ОМТС практически не представляется возможным принимать обоснованные решения по определению системных и технологических свойств и путей развития ОМТС, обосновывать проектные и принимать управленческие решения [1–8], что предполагает необходимость разработки соответствующих системных моделей.

Вместе с тем, общепризнанных между заказчиками и проектантами (исполнителями) полномасштабных (с учетом более 10 системных ЧПК и ГПК) моделей оценки Q и W с соответствующими средствами их цифровизации, как правило, нет [6–8]. Это, естественно, не позволяет в полной мере переходить к реализации парадигмы ЦД.

Состояние проблемы. Проблема сложности современных ОМТС, средств и систем обеспечения безопасности мореплавания, средств и систем борьбы за живучесть корабля, судна, пунктов управления различного назначения, ситуационных центров, интегрированных автоматизированных систем в защищенном исполнении и многих других ОМТС, ужесточение требований к качеству процессов их создания и эксплуатации обуславливают необходимость поиска инвариантных (неизменных по структуре и алгоритмам к специфике ОМТС) решений по их модельному представлению, что в классе математических моделей представляет известную трудность [2, 3, 5].

Более того, особо востребованными сегодня следует считать математические модели и соответствующие базы данных и знаний, имеющие обобщенный характер, а в ряде случаев - типовую структуру и технологии реализации моделей, не зависящие от их специфических (позитивной и негативных) свойств ОМТС, решаемых ими функциональных задач, т.е. **инвариантных к их специфике ОМТС** [5–8].

Практика альтернативного моделирования качества и эффективности ОМТС, в том числе по методам анализа иерархий Т. Саати, анализа и синтеза при информационном дефиците профессора Н.В. Хованова [2, 3], по квалиметрическим методам анализа, синтеза и оптимизации [5–9] подтверждает по существу их безальтернативность и возможность результативного использования при многовариантном цифровом многокритериальном моделировании, создании ЦД объектов типа ОМТС.

В таблице систематизированы основные подходы к реализации парадигмы ЦД, в т.ч. с использованием данных ряда источников, включая данные [10, 11], а также приведены авторское определение ЦД и особенности предлагаемой ими модели, структуры, методики и пример реализации.

При этом, типовыми задачами, решаемыми ЦД, являются:

- 1) проведение тестовых запусков процессов или производственной цепочки по соответствующим моделям сценариев фактической обстановки (СФО);
- 2) обнаружение проблем или уязвимостей до запуска производства, эксплуатации;
- 3) повышение эффективности процессов или систем, отследив все сбои еще до старта;
- 4) снижение рисков жизни и здоровью персонала, финансовых, материальных и т.п.;
- 5) повышение конкурентоспособности и прибыльность, маркетинговых преимуществ;
- 6) долгосрочное прогнозирование и планирование развития компании, продукции на всех стадиях жизненного цикла;
- 7) повышение лояльности клиентов за счет точного прогнозирования спроса и потребительских качеств продуктов и услуг.

Предлагаемое направление развития ЦД. Новые возможности и перспектива решения актуальной задачи системного характера открываются, по нашему мнению, при переходе в развитие ЦД к концепции квалиметрического оценивания ОМТС, их полимодельного анализа, синтеза и оптимизации на основе соответствующих квалиметрических методов измерения, оценивания и управления качеством ОМТС [8, 9].

В развитие этой концепции в докладе приведены в обобщенном виде и структурированы основные методы и математические модели агрегирования векторных критериев оценки качества, оптимизации проектных решений ОМТС, включая полимодельный квалиметрический метод их системной оптимизации [5, 7, 8], позволяющий с использованием обобщенного алгоритма оценки качества сформировать и использовать математическую модель оценки их системы.

Систематизация основных данных по парадигме ЦД

Этап	Авторы	Основные результаты, понятие, существо
Впервые дано понятие ЦД	2002, Майкл Гривс, проф. Мичиганского университета	Понятие: В идеальных условиях вся информация, которую можно получить от изделия, может быть получена от его цифрового двойника.
Официально определена роль ЦД	2010. Отчет NASA о моделировании и симуляции	Роль: Сверхреалистичная виртуальная копия космического корабля, которая воспроизводила бы этапы строительства, испытаний и полетов.
Пик развития ЦД	2015. Gartner Hype Cycle	Период зрелости ЦД благодаря развитию технологий искусственного интеллекта и интернета вещей.
Популярное понятие ЦД. Классификация ЦД	ЦД – это цифровая (виртуальная) модель любых объектов, систем, процессов или людей. Она точно воспроизводит форму и действия оригинала и синхронизирована с ним	Типы ЦД: 1. Прототип (DTP) – виртуальный аналог реального объекта, который содержит все данные для производства оригинала. 2. Экземпляр (DPI) – содержит данные обо всех характеристиках и эксплуатации физического объекта, включая трехмерную модель, действует параллельно с оригиналом. 3. Агрегированный двойник (DTA) – вычислительная система из цифровых двойников и реальных объектов, которыми можно управлять из единого центра и обмениваться данными внутри системы.
Предлагаемые концепция и определения ЦД	Максимизация ценности обрабатываемой информации за счет использования системных показателей качества, их мониторинга и прогнозирования	Цифровой двойник – цифровая, виртуальная интерактивная модель объекта автоматизации и соответствующих процессов, синхронизированная с ними и позволяющая: оптимизировать параметры, характеристики, проектное качество и эффективность объекта автоматизации; предсказывать результаты их развития, функционирования ОМТС; обеспечивать качество продуктов и услуг в целом, а также обнаруживать проблемы функционирования ОМТС и решать их.
Типовые концепции ЦД	Цифровые двойники: от концепций до промышленной эксплуатации	Статический близнец (прототипирование реального объекта для сравнения реального объекта с цифровой копией). Функциональный близнец (синхронизация с объектом). Интеллектуальный близнец (с самообучением и выводом).
Примеры внедрения ЦД	ЦД г. Сингпур. ЦД представительского автомобиля Ghibli. ЦД электроавтомобиля Tesla. ЦД 28 станков АО «КАМАЗ». ЦД анализа 23 сценариев развития и снижения числа операторов на 87 скважинах «Газпромнефть-Хантоса». ЦД авиационных двигателей ТВ7-117СТ и АИ222-25 «ОДК» (экономия 30% затрат).	
Особенности предлагаемого варианта реализации	Минимизация информационной избыточности сбора и представления системно значимой информации, ее семантического сжатия путем агрегирования показателей качества, их мониторинга, прогнозирования и контроля. Представления системы структурированных сравнительных характеристик (цифрового паспорта) с возможностью автоматического квалиметрического анализа и оптимизации.	

Методика решения задачи. Качество, как мера соответствия ОМТС своему предназначению, является базовым системным свойством и критерием, характеризующим совокупность его основных свойств и характеристик. Поэтому в развитие методологии [5–9] одной из первых при создании ЦД и наиболее важных задач квалиметрического оценивания следует считать корректное построение системно целостного множества критериев оценки качества ОМТС Q с соответствующими ЧПК q_n при их числе N .

На следующем этапе создания ЦД и решения задачи цифровизации качества ОМТС проводится агрегирование ЧПК в соответствующие G ГПК, которые далее агрегируются в M модельных показателей качества (МПК) с последующим их агрегированием в K комплексных показателей качества (КПК) для каждого n - того ОМТС.

Тем самым каждый из ГПК характеризует определенное свойство ОМТС, а их векторное сложение позволяет выйти соответственно на МПК и КПК (агрегированный, обобщенный, интегральный) соответствующего ОМТС и, тем самым, снизить далее сложность задачи анализа.

Аналогично далее N КПК множества ОМТС агрегируются в R агрегированных сводных показателей качества (АСПК) для всего множества ОМТС, а далее – в P модельных сводных показателей качества (МСПК) и в единый полимодельный сводный показатель качества (ПСПК), системно целостно отражающий качество ОМТС.

Перспективность оценки системных показателей качества. Получение подобных оценок позволяет на принципиально новом уровне при формировании и использовании ЦД решать задачи концептуального, исследовательского, конструкторско-технологического обоснования и проектирования эффективных и оптимальных проектных и эксплуатационных решений за счет специфики инвариантного моделирования ОМТС с соответствующими системными и техническими показателями качества, являющимися основными элементами так называемого «цифрового паспорта» ОМТС.

Причем переход от ЧПК к АПК осуществляется на основе полимодельного (многомодельного) подхода к оценке качества каждого ОМТС отдельно, а для их системы (группы) – от АСПК с соответствующей моделью индексов значимости каждого элемента в составе системы ОМТС к МСПК и ПСПК.

Это обеспечивает наряду со снижением уровня сложности решения задачи квалиметрической оценки, анализа, синтеза альтернативных вариантов и их оптимизации возможность перехода от задач ситуационной оценки качества системы ОМТС к непрерывному наблюдению (мониторингу) и прогнозированию динамики их качества, обоснованию и принятию решений по управлению ею. А при вводе данных от датчиков (системы сенсоров) состояния ОМТС – к мониторингу динамики их состояния, прогнозированию и контролю системных показателей эффективности W в сопоставлении с системными показателями проектного качества Q .

Как следствие, именно КПК и ПСПК позволяют количественно оценивать, прогнозировать, контролировать и анализировать основные свойства ОМТС, прогнозировать и синтезировать предпочтительные свойства, обосновывать оптимальные варианты построения, создания и эффективного использования/применения на всех стадиях жизненного цикла ОМТС, что, как известно, имеет особо ценное значение.

Систематизация методов агрегирования в ЦД. В результате обобщения и структурирования данных в докладе приведены в систематизированном виде в развитие результатов [6] основные методы и математические модели агрегирования векторных критериев оценки качества, оптимизации проектных решений объектов исследовательского проектирования ОМТС, в который вошли: обобщенный метод оценки и анализа показателей качества с иерархической структурой и использованием специально введенного обобщенного оператора свертки; методы и математические модели комплексного показателя качества ОМТС.

При этом преимущественное значение для ЦД данного типа имеет представление комплекса характеристик ОМТС в сопоставлении с их аналогами с соответствующей оценкой их конкурентной способности и перспективности развития.

Модель оценки качества ОМТС в их ЦД. В предлагаемой на основе ряда предыдущих исследований [5–9] математической модели оценки качества ОМТС в х ЦД используется обобщенный оператор $C_{k,M}^{t_M}$ свертки критериев и соответствующих показателей качества. Это позволяет представить математическую модель агрегирования векторных критериев оценки качества системы ОМТС в виде базовых моделей КПК отдельного объекта морской техники Q_k и их системы Q типа

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

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

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

$C_{m,G}^{t_G} [w_g, C_{g,N}^{t_N} (...)]$ – обобщенный оператор свертки при соответствующих индексах критериальной значимости w_g ГПК с их общим числом G в m -й МПК (второй уровень свертки);

$C_{k,M}^{t_M} \{w_m, C_{m,G}^{t_G} [...]\}$ – обобщенный оператор свертки МПК в k -й агрегированный (интегральный, обобщенный) КПК (четвертый уровень свертки).

Для системы объектов в модели (2) приняты следующие обозначения:

$C_{r,K}^{t_K} (w_k, Q_k)$ – обобщенный оператор свертки КПК Q_k с общим их числом K в r -й АСПК однородных/разнородных объектов анализа по алгоритму типа t_K (пятый уровень свертки);

$C_{p,R}^{t_R} [w_r, C_{r,K}^{t_K} (...)]$ – обобщенный оператор свертки АСПК $C_{r,K}^{t_K} (...)$ с общим их числом R в p -й МСПК разнородных/однородных объектов анализа по алгоритму типа t_R (шестой уровень свертки);

$C_P^{t_P} \{w_p, C_{p,R}^{t_R} [...]\}$ – обобщенный оператор свертки МСПК $C_{p,R}^{t_R} [...]$ с общим их числом P в ПСПК системы объектов анализа по алгоритму типа t_P (седьмой уровень свертки показателей качества объектов анализа).

Реализация модели в ЦД. Опыт выполнения комплексных оценок качества и их использования при исследовательском проектировании с применением представленного комплекса математических моделей (1) – (2) и методики [5, 8] показал высокую **информативность и когнитивность получаемых данных**, явную **перспективность использования полимодельного квалиметрического метода** при анализе и синтезе направлений концептуального и технологического развития, технического проектирования и соответствующих маркетинговых исследований, что имеет существенное значение именно для ЦД, как цифрового модельного образа, отражающего качество решения каждой функциональной задачи и степень достижения целей ОМТС.

Пример реализации ЦД на основе представленной математической модели приведен в виде двух основных интерфейсных форм цифрового паспорта ОМТС типа «Танкер ледового класса (ТЛК)» (рис. 1), а также результатов мониторинга, прогнозирования и контроля качества (СМПК по модельным данным, рис. 2) макетнодействующего образца ЦД роботизированного проектного комплекса (РПК) «КСР-23», реализующего в качестве базовой технологию СПРУ [8, 13].

Тем самым приведенная комплексная математическая модель, реализованная в ЦД на основе квалиметрического анализа ОМТС и подробно представленная при описании рис. 1 и рис. 2, позволяет решать на качественно новом уровне системные задачи концептуального, исследовательского и конструкторско-технологического синтеза, прогнозирования и обоснования эффективных и оптимальных структурно-функциональных проектных и эксплуатационных решений за счет специфики инвариантного квалиметрического моделирования сложных и разнородных объектов. Разработанный макетнодействующий образец ЦД обеспечивает наряду с мониторингом системных показателей качества ОМТС их сопоставление с аналогами и, тем самым, обоснование направлений совершенствования ОМТС по критерию максимума АПК, в том числе с использованием метода индексов корневой чувствительности.

Реализация приведенной технологии и РПК «КСР-23» в варианте ЦД (как показала практика моделирования) позволяет непрерывно и в реальном масштабе времени оценивать (рис. 1), наблюдать (рис. 2), анализировать, контролировать и оптимизировать структуру ОМТС и наиболее значимые (системные) показатели обстановки, прогнозировать ее развитие и принимать упреждающие автоматизированные решения по управлению качеством и эффективностью ОМТС, контролировать их. А в целом – максимизировать ценность обрабатываемой и представляемой операторам ценности информации по критерию А.А. Харкевича, характеризующему отношение приращения вероятности достижения цели за счет используемой информации к ее количеству.

Специфические свойства модели и ЦД. Возможности ЦД проявляются и реализуются в процессе вариантного исследовательского проектирования [5–11] за счет:

- возможности учета практически всей совокупности значимых показателей качества (>70) без ограничения их числа, содержания и каких-либо особенностей;
- масштабирования параметров ОМТС и показателей их качества за счет соответствующей технологической идентичности (универсальности) процедур агрегирования и их инвариантности к специфике функционирования ОМТС;
- агрегирования ЧПК в ГПК с учетом индексов критериальной значимости (весовых коэффициентов) и их модели в виде соответствующей матрицы. Именно ГПК непосредственно отражают свойства отдельных объектов анализа и позволяют проектанту на этапе синтеза и оптимизации управлять свойствами и характеристиками ОМТС за счет выбора соответствующих соотношений между ГПК и ЧПК, учета степени их влияния на КПК, АСПК, МСПК, ПСПК;
- анализа соответствующих системных свойств ОМТС, что позволяет качественно и количественно выявлять лицам, обосновывающим и принимающим решения, устойчивые признаки ОМТС (свойства), односторонне отличающие их от других объектов и систем объектов или характеризующие их общность;
- агрегирования КПК в АСПК, который отражает агрегированное системное (сводное, интегральное, обобщенное) свойство группы однородных или/и разнородных ОМТС в целом с учетом «своей» модели критериальных предпочтений, каждый из которых отражает значимость данного объекта анализа в составе системы объектов.

Заключение

В результате проведения ряда поисковых и прикладных исследований обоснованы целесообразность и возможность инвариантного модельного представления качества современных структурно сложных объектов и их систем, а также мониторинга, прогнозирования и управления их качеством, включая процессы их структурной и функциональной динамики, реализованные в варианте цифровых двойников отдельных объектов морской техники и ЦД их систем.

Применительно к развитию парадигмы цифровых двойников на основе анализа ценности информации по критерию А.А. Харкевича и реализации технологии СПРУ в варианте РПК «КСР-23» предложено новое определение, типовые структура и методика,

а также представлен макетно-действующий образец реализации технологии цифрового двойника, инвариантного к специфике объектов морской техники и их систем.

Представленный вариант ЦД, как показали результаты его апробации, позволяет на качественно новом уровне решать задачи концептуального, исследовательского и конструкторско-технологического обоснования эффективных и оптимальных системных, структурно-функциональных, проектных и эксплуатационных решений за счет специфики инвариантного квалиметрического моделирования разнородных ОМТС.

Литература

1. **Архипов А.В., Четвертаков М.М.** Долгосрочная кораблестроительная программа: принципы разработки и проблемы реализации // Оружие наследников Победы. М.: Издательский дом «Оружие и технологии». 2015, с. 794–801.
2. **Худяков Л.Ю.** Исследовательское проектирование кораблей. Л.: Судостроение, 1980. 324 с.
3. **Захаров И.Г.** Обоснование выбора. Теория практики. СПб.: Судостроение, 2006. 528 с.
4. Морская радиоэлектроника: Справочник / **И.В. Соловьев, Г.Н. Корольков, А.А. Бараненко, М.Н. Баранов, А.В. и др.;** Под ред. **В.А. Кравченко.** СПб.: Политехника, 2003. 246 с.
5. **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.
6. **Согинов 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.
7. **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: научн.-техн. сб. / АО «Концерн «НПО «Аврора». СПб., 2019. Вып. 3(46), с. 18-27.
8. **Алексеев А.В.** Примеры реализации полимодельного квалиметрического метода системной оптимизации объектов морской техники и морской инфраструктуры // Морские интеллектуальные технологии / Marine intellectual technologies, № 2 (52) том 3, 2021, с. 69–81.
9. **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 конф. Севастополь, 20-24 сентября 2022 г. / Севастопольский государственный университет; науч. ред. Б.В. Соколов. Севастополь: СевГУ, 2022, с. 131–136.
10. **Д.Д. Серугендо, А.Ф. Каттинг-Десель, Л. Гиз, Т. Корменье, И. Хан, Л. Хоссенлоп.** Цифровые двойники: от концепций до промышленной эксплуатации. [Электронный ресурс] / <https://www.osp.ru/os/2022/04/13056597> (дата обращения 12.04.2023).
11. **Прохоров А., Лысачев М.** Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое / научн. ред. А. Боровиков. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
12. 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.
13. Цифровой двойник системы комплексной защиты информации в инвариантном исполнении (ЦД СКЗИ) / Заявка СПбГМТУ на регистрацию ПО (12.04.2023).