УДК 656.612.052:681.516.54:004.89
DOI: 10.37890/jwt.vi87.705

Принципы формирования процессных цифровых двойников судна

С.В. Ермаков
ORCID 0009-0009-7814-8877
Н.Ж. Малинин
ORCID 0009-0004-7439-0547
Д.В. Шевчук
ORCID 0009-0003-7861-5005
Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия

Аннотация. Настоящая работа посвящена решению проблемы формирования цифровых двойников процессов, протекающих на судне, находящимся в эксплуатации. При этом акцент сделан на таких эксплуатационных процессах как маневрирование и скоростное проседание судна. Показано, что существующие математические модели движения судна не обеспечивают абсолютно точного описания процесса маневрирования и имеют ограничения по применению, так же как имеют ограничения эмпирические формулы и алгоритмы для определения скоростного проседания. В качестве альтернативы для виртуального представления эксплуатационных процессов судна предлагается использовать цифровые двойники (Digital Twins – DT) этих процессов. В работе приведено обоснование принципов формирования таких цифровых двойников, при котором в первую очередь содержательно проанализировано понятие «процесс», включая непосредственно его дефиницию, классификации, принципы локализации, параметры и характеристики, частные состояния. Дано пояснение концептуальному различию между математической и цифровой моделями судна.

Приведены результаты содержательного анализа понятия «цифровой двойник», представлена визуализация концепции цифрового двойника морского судна в период его эксплуатации. Обоснована структура процессного эксплуатационного цифрового двойника судна. Непосредственно цифровой двойник есть суть совокупность векторного пространства векторов параметров и векторного пространства векторов характеристик. Представлены решения некоторых частных задач по формированию процессного эксплуатационного двойника, связанных с оптимизацией представления входных и выходных величин (параметров и характеристик). В заключение поставлены задачи для дальнейшего исследования, итоговая цель которого – создание полноценной методической базы для формирования и использования процессных эксплуатационных цифровых двойников судна.

Ключевые слова: эксплуатационные процессы судна, параметры и характеристики, цифровые двойники, принципы формирования.

Creating process-centric digital twins of a vessel principles

Sergey V. Ermakov
ORCID 0009-0009-7814-8877
Nikita Zh. Malinin
ORCID 0009-0004-7439-0547
Danila V. Shevchuk
ORCID 0009-0003-7861-5005
Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

Abstract. This paper addresses the problem of creating digital twins of processes occurring on a vessel in operation. Emphasis is placed on operational processes such as maneuvering

and the squat. It is shown that existing mathematical models of vessel motion do not provide an absolutely accurate description of the maneuvering process and have limitations in their application, similar to the limitations of empirical formulas and algorithms for squat determining. As an alternative to virtual representation of vessel operational processes, it is proposed to use digital twins (DTs) of these processes. The paper substantiates the principles for creating digital twins of vessel operational processes. The article provides a rationale for the principles of forming such digital twins, which primarily includes a substantive analysis of the concept of "process", including its definition, classifications, localization principles, parameters and characteristics, and particular states.. The conceptual distinction between mathematical and digital models of a vessel is explained.
The article presents the results of a substantive analysis of the concept of «digital twin» and presents a visualization of the concept of a digital twin of a marine vessel during its operation. The structure of a process operational digital twin of a vessel is substantiated. A digital twin is essentially a set of a vector space of parameter vectors and a vector space of characteristic vectors. Solutions to some specific problems in creating a process operational twin are presented, related to the optimization of the representation of input and output quantities (parameters and characteristics). In conclusion, tasks for further research are set, the ultimate goal of which is the creation of a comprehensive methodological base for the formation and use of process operational twins of a vessel.

Keywords: vessel operational processes, parameters and characteristics, digital twins, principles of formation.

Введение

К настоящему времени разработано и используется немалое количество математических моделей, алгоритмов и формул для описания тех или иных процессов, связанных с эксплуатацией морского судна. В первую очередь, это математические модели движения судна, предназначенные для решения различных прикладных задач. В настоящее время существует целый ряд таких моделей, описанных в литературе. Так, в работе [1] рассмотрены восемь частично линеаризированных и нелинейных моделей, проанализированы достоинства, недостатки и ограничения этих моделей, а также проведена оценка их применимости в навигационных тренажёрах и в системах прогнозирования движения судов [1]. В качестве резюме этого исследования можно процитировать следующий вывод авторов: «…ни одна модель не является идеальной, ни одна не обеспечивает приемлемую точность сразу по всем … стандартным маневрам ни для одного судна» [1, с. 205].

Однако подход к прогнозированию протекания тех или иных процессов, связанных с эксплуатацией судна и обеспечением его навигационной безопасности, основанный на математическом описании этих процессов, далеко не ограничивается маневрированием. Так, при движении судна на мелководье, его корпус претерпевает скоростное проседание (squat), при котором увеличивается динамическая осадка судна и одновременно уменьшается запас глубины под килем (Under Keel Clearance – UKC). Очевидно, что игнорирование или неграмотный учёт UKC может привести (и нередко приводит) к касанию грунта или посадки на мель. Величина проседания зависит, в первую очередь, от скорости судна, и к настоящему времени предложено и используется значительное количество способов и формул для вычисления (предвычисления) скоростного проседания и UKC. Иными словами, процесс скоростного проседания судна на мелководье имеет практически значимое математическое описание. Вместе с тем, вопрос прогнозирования UKC и динамической осадки нельзя считать однозначно решённым. Во-первых, большинство формул являются исключительно эмпирическими. Во-вторых, методическая погрешность является неотъемлемым атрибутом большинства способов. В-третьих, методология определения скоростного проседания не содержит способов,

обладающих свойством универсальности как по типам судов, так и по условиям плавания – в любом случае имеют место быть ограничения [2, 3].

В настоящее время наряду с математическим моделирование получает признание и распространение моделирование цифровое, т.е. создание так называемых цифровых двойников объектов и процессов [4]. Следует предположить, что такой инструмент прогнозирования, как цифровой двойник, может быть использован для моделирования и прогнозирования различных процессов, связанных с обеспечением навигационной безопасности судна. Так, например, имея цифровую модель судна, информацию о его загрузке, прогнозируемых условиях плавания (включая характеристики акваторий плавания) и трафике на пути его следования, можно формировать рекомендации по оптимизации маршрута и режима движения. Кроме того, цифровой двойник может применяться для контроля состояния или управления физическим объектом при использовании технологий автономного судовождения [5].

Формирование любого цифрового двойника – сам по себе процесс во многих отношениях ресурсоёмкий. В свою очередь, его результативность во многом зависит не только от оптимальности соотношения требующихся и имеющихся ресурсов, но и от качества того фундамента, на котором он строится, т.е. от грамотно поставленных и сформулированных целей, задач и общих правил их достижения и решения. Таким образом, создание общих правил (принципов) формирования процессных двойников судна является актуальной задачей, а настоящая статья посвящена именно её решению.

Эксплуатационные процессы судна. Соотношение математического и цифрового моделирования

В общем случае под процессом необходимо понимать последовательную и необратимую смену состояний объекта (системы) во времени [6].

Количественно любая система описывается двумя классами величин, именуемыми параметрами и характеристиками. Параметры являются величинами, описывающими первичные свойства системы и условия её функционирования, и, одновременно, исходными данными задачи анализа системы. В свою очередь характеристики, являясь функцией параметров и результатом решения задачи анализа, описывают уже вторичные свойства системы. Исходя из этого, состояние системы определяется совокупностью значений её характеристик, зависящих от значений параметров и описывающих это состояние. Изменение хотя бы одной характеристики системы инициирует переход системы из одного состояния в другое, т.е. инициирует процесс (его начало или продолжение). Само изменение характеристики (характеристик) как причина перехода системы из одного состояния в другое называется событием [6]. Здесь следует заметить, что в различных иных источниках то, что здесь описано как характеристики и параметры, может иметь другие наименования.

Функционирование практически любой системы определяется совокупностью процессов, каждый из которых, по сути, является локальным. Однако конкретизация процесса как локального может быть двояким. Во-первых, под таковым следует понимать процесс, протекающий не во всей системе в целом, а в некоторой её части, т.е. в подсистеме. Во-вторых, локальный процесс может охватывать и всю систему целиком, но определяться изменением лишь части характеристик из всего его множества. В первом случае границы процесса определяются физически (посредством декомпозиции системы на составные части). Во втором случае первичны характеристики, и декомпозиции (разбиению на подмножества) подвергается уже множество характеристик. Очевидно, что эти два принципа локализации процессов плотно взаимосвязаны, но однако они не тождественны друг другу.

Из приведённого, прикладного для настоящего исследования пояснения понятия «локальный процесс» следует представленное далее также прикладное обоснование понятия «частное состояние».

Судно является сложной технической системой, анализ состояния которой через множество всех характеристик не является рациональным. Более обоснованно рассматривать состояние не как что-то единое и единственное, а как множество его аспектов – частных состояний, каждый из которых описывается своим (ограниченным) пулом характеристик. Под частным состоянием системы (судна), таким образом, следует понимать совокупность характеристик, описывающих систему или часть системы (подсистему), образующих подмножество локальных характеристик множества всех характеристик системы (судна) и связанных с конкретной задачей по обеспечению эффективного функционирования системы (безопасной эксплуатации судна). В дальнейшем речь будет идти только о частных состояниях.

Здесь следует заметить следующее:

– подмножества локальных характеристик, описывающие различные частные состояния, так же как и различные локальные процессы могут пересекаться;

– некоторое исходное состояние (частное состояние) системы (подсистемы) в сочетании с внешними воздействиями, которые испытывает система (подсистема) в рассматриваемый промежуток времени, есть причина его последующих состояний (принцип причинности) [7];

– время (длительность и одновременность) – это универсальное свойство любого процесса;

– состояние системы (в том числе и частное состояние) можно иначе определить как точку в многомерном пространстве характеристик, которая одновременно является концом вектора характеристик, а движение этой точки (конца вектора) в указанном пространстве определяет траекторию состояний системы.

На рис. 1 графически представлено взаимоотношение представленных и описанных выше понятий (структура локального процесса).

Процессы могут быть управляемыми и неуправляемыми, линейными и разветвлёнными, конечными и (абстрактно) бесконечными и т.д. Необходимость использования конкретной классификации процессов, выделения того или иного типа процессов обуславливается содержанием (структурой) конкретного процесса и задачами, которые подлежат решению при его исследовании и использовании.

В частности, в целях настоящего исследования имеет значение классификация процессов на дискретные и непрерывные. У дискретных процессов состояния чётко ограничены друг от друга, а для каждого из них существуют смежные (соседние) состояния – предыдущее и (или) последующее. В свою очередь, непрерывные процессы характеризуются тем, что для любых двух состояний существует как минимум одно промежуточное состояние, т.е. понятие «смежные» состояния для непрерывных процессов не существует, а длительность события Δt стремится к нулю (на рис. 1 $\Delta t = t_k - t_n \to 0$).

Однако в целях настоящего исследования необходимо ввести в эту классификацию ещё один тип процессов – квазидискретные процессы. Под таковыми следует понимать непрерывные по сути процессы, прошедшие процедуру принудительной дискретизации.

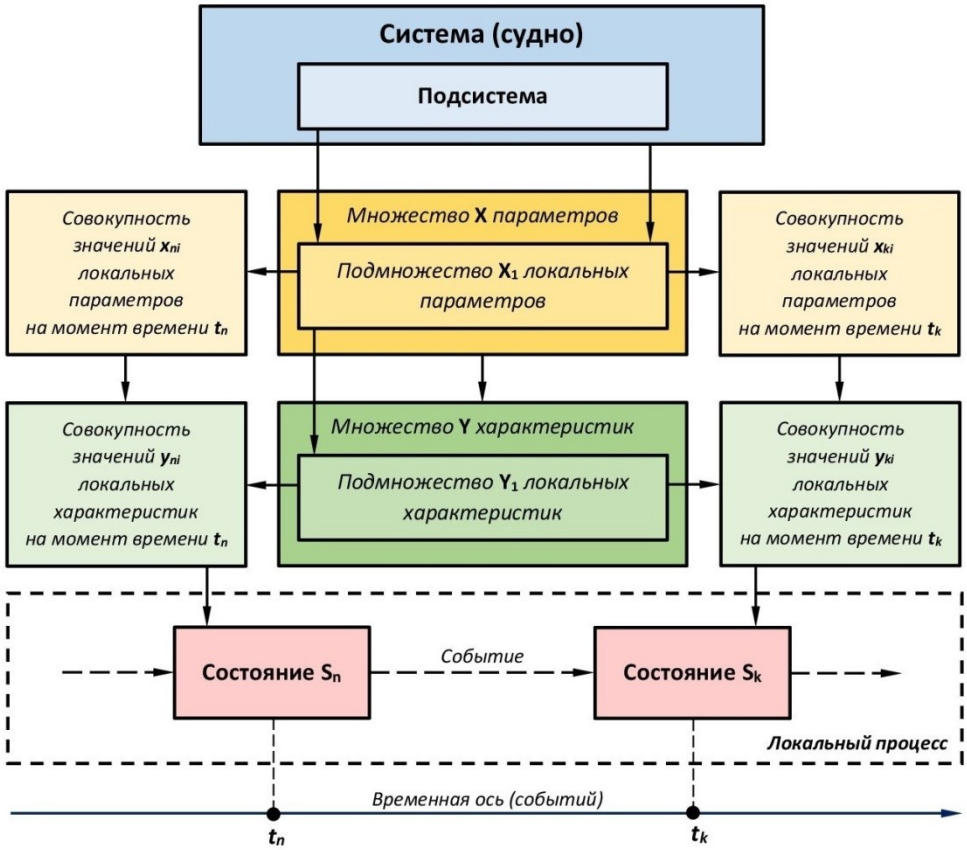


Рис. 1. Структура локального процесса

Например, процесс скоростного проседания судна, для которого параметрами являются скорость его движения, глубина под килем, статическая осадка и пр., а характеристиками – скоростное проседание и UKC, является непрерывным. Однако для предупреждения критических для безопасности судна значений характеристик вполне достаточно, например, ограничиться последовательностью состояний, события для которых будут определяться не любым изменением скорости судна и (или) глубины, а только изменением на некоторую ранее заданную величину ε. Значение этой величины, которую можно назвать чувствительностью параметра, будет определяться практически значимой точностью характеристики (её чувствительностью), которой должно обладать её значение для принятия решения по управлению процессом скоростного проседания (предупреждению касания грунта). Подобная дискретизация позволит избежать реакции той же системы поддержки принятия решений на неизбежную флуктуацию значений параметров и снизит нагрузку на вычислительные алгоритмы.

В случае маневрирования судна при его плоскопараллельном движении и, в частности, циркуляции, вектор характеристик будет включать в себя координаты и курсовой угол, а вектор параметров является результатом суперпозиции следующих векторов [1]:

1) вектор постоянных параметров, характеризующих конкретное моделируемое судно,

2) вектор управляющих воздействий, включающий в себя угол перекладки руля, частота вращения и шаговое отношение гребного винта, положение регулятора подруливающего устройства,
3) вектор нагрузки на судно, определяемый распределением груза,
4) вектор внешних возмущающих воздействий.

Здесь дискретизация имеет смысл для второго и четвёртого векторов из числа перечисленных. При этом, принимая во внимание, что параметры, составляющие вектор управляющих воздействий, изменяются, как правило, скачкообразно (т.е. процесс их изменения можно классифицировать как дискретный), то дискретизация здесь может потребоваться только при медленном непрерывным относительно длительным по времени изменением параметров.

Процесс скоростного проседания, процесс маневрирования в числе многих определим как эксплуатационные процессы, т.е. процессы, имеющие место во время эксплуатации судна. Тем самым рассматриваемые в настоящей статье процессы обосабливаются от тех, что являются неотъемлемой частью проектирования судна, его постройки, ремонта и т.д.

В общем виде, принимая во внимание изложенное, любой процесс можно описать следующим образом:

$$\vec{S}(t) = \vec{Y}\left(y_1, y_{2,}..., y_l\right) = F\left[\vec{X}\left(x_1, x_2, ..., x_m\right), t\right], \quad (1)$$

где $\vec{S}(t)$ – вектор состояния, $\vec{X}$ – вектор параметров, $\vec{Y}$ – вектор характеристик, F – оператор, устанавливающий правила (в частности, функцию) определения соответствия вектора характеристик вектору параметров в конкретный момент времени (позволяющие найти искомые характеристики по известным параметрам).

Математические модели эксплуатационных процессов судна (в частности, математические модели движения судна, его скоростного проседания на мелководье) основаны на аналитических выражениях, требующих проведения математических операций со значениями параметров для получения конечного результата (значений характеристик). Иными словами, функция зависимости характеристик от параметров представляется формулами (уравнениями и (или) их решениями).

В свою очередь, цифровая модель эксплуатационного процесса судна (в строгом восприятии являющаяся разновидностью математической модели) не предусматривает аналитической записи и представляет собой совокупность наборов значений параметров, где каждому набору «назначается» свой набор характеристик.

Концепция цифровых двойников. Цифровой двойник судна. Цифровой двойник эксплуатационного процесса

Как правило, в настоящее время чаще используется понятие «цифровой двойник», а не «цифровая модель». Это связано, в первую очередь, с развитием соответствующего направления исследований в англоязычных странах и введением там в обиход словосочетания Digital Twin.

Хотя терминология со течением временя менялась и пополнялась, основная концепция цифровых двойников оставалась довольно стабильной с момента ее создания в 2002 году. В общем случае, цифровой двойник – это набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или фактический физический произведенный продукт (объект, систему) от микроатомного уровня до макрогеометрического уровня и может существовать как самостоятельная сущность, одновременно будучи связанной с физическим объектом на протяжении всего жизненного цикла [4, 8]. Обобщённая простейшая визуализация цифрового двойника представлена на рис. 2 [4].



Рис. 2. Простейшая визуализация концепции цифрового двойника (основные части цифрового двойника)

В работе [4] представлена уже концепция цифрового двойника морского судна в период эксплуатации. Схематически эта концепция изображена на рис. 3.

Структурно эта концепция включает в себя внутренние и внешние, значимые для цифрового двойника судна элементы из реального и виртуального пространства. Кроме самого судна реальное пространство содержит навигационное пространство, датчики S (сенсоры), другие суда V той же серии (того же проекта), суда T, которые осуществляют навигацию на той же акватории, что и наше судно, и могут считаться целями, как их понимают в задачах по расхождению судов [4].

Цифровой двойник судна включает в себя цифровые двойники компонентов DTC и процессов DTO. К первым (DTC) относятся виртуальные представления навигационного оборудования, судовой энергетической установки, механизмов, агрегатов и т.п. Множество DTO включается в себя цифровые двойники навигации, маневрирования (включая циркуляцию), швартовки, постановки на якорь, погрузки, выгрузки и т.д. В число цифровых двойников компонентов и процессов входит также ретроспективная информация, которая являлась основой цифрового двойника судна в периоды его проектирования, постройки и испытаний [4].

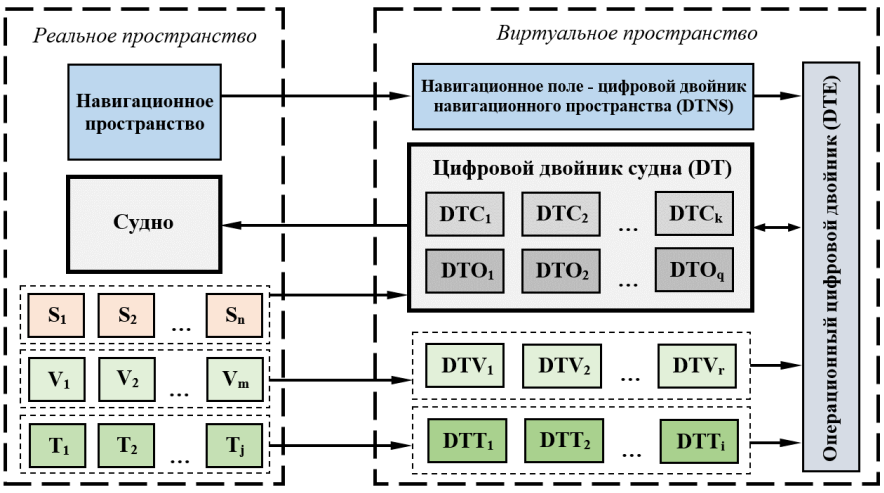


Рис. 3. Визуализация концепции цифрового двойника морского судна в период его эксплуатации

Внешними по отношению к цифровому двойнику судна элементами виртуального пространства являются информационное навигационное поле (цифровой двойник навигационного пространства DTNS), цифровые двойники судов V и T (DTV и DTT),

а также операционный цифровой двойник (DTE), представляющий собой некоторую среду цифровых двойников, которая предназначена для выполнения различных (в первую очередь, вычислительных) операций [4].

Далее выделим из схемы, представленной на рис. 3, цифровой двойник процесса (процессный эксплуатационный цифровой двойник судна) и обоснуем его структуру и содержание (рис. 4).



Рис. 4. Процессный эксплуатационный цифровой двойник судна

В отличие от того, как это сделано в структуре цифрового двойника, представленного на рис. 3, операционный цифровой двойник (DTE) не вынесен отдельным блоком, а является некоторой средой для процессного цифрового двойника (DTO). Входные для процессного двойника параметры первоначально «проходят» DTE, содержащего, как было отчасти замечено выше, существующие математические модели процессов, ретроспективные данные, полученные при наблюдении за процессом или его моделировании на стадии, предшествующей вводу в эксплуатацию, процессные цифровые двойники судов-прототипов. Кроме того, операционный цифровой двойник включает в себя различные инструменты обработки данных, суть которых будет пояснена ниже. Таким образом, в отношении операционного цифрового двойника имеет место некоторая его дефрагментация, результатом которой является выделение информационных и инструментального фрагментов.

Непосредственно цифровой двойник есть суть совокупность двух векторных (линейных) пространств X и Y, где пространство X представляет собой полную совокупность векторов параметров $\vec{X}_i\left(x_{1i}, x_{2i}, ..., x_{mi}\right)$, а пространство Y – также полную совокупность векторов характеристик $\vec{Y}_j\left(y_{1j}, y_{2j,}..., y_{lj}\right)$. При этом имеет место быть сюръективное отображение векторного пространства X на векторное пространство Y $\left(f{:}X \to Y\right)$, т.е. такое соответствие между двумя векторными пространствами, при котором каждому вектору пространства X поставлен в соответствие как минимум один вектор пространства Y (каждый вектор пространства Y является образом хотя бы одного вектора пространства X) [9, 10].

Кроме сюръективного отображения (сюръекции) существуют ещё такие отношения множеств (пространств), как биекция и инъекция (рис. 5). Биективное (взаимно однозначное) отображение (соответствие) предполагает, что каждому элементу векторного пространства X соответствует ровно один вектор пространства Y, при этом определено обратное отображение, которое обладает тем же свойством. В свою очередь, при инъективном (одно-однозначном) отображении разные вектора пространства X переводятся в разные вектора пространства Y. При этих определениях

инъективное отображение является одновременно биективным, а сюръективное – и биективным, и инъективным [9, 10].

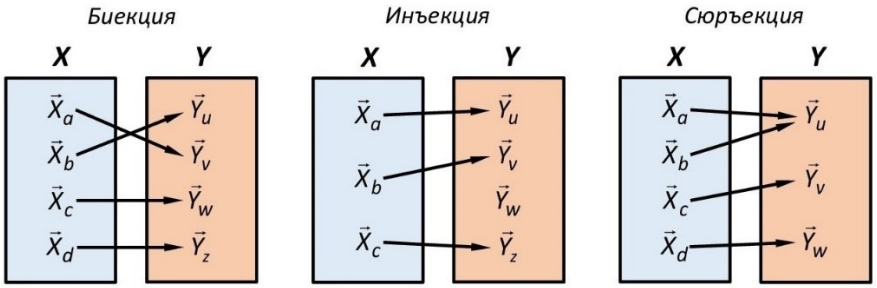


Рис. 5. Виды отображения векторных пространств

Сюръективность отображения объясняется здесь тем, что одну, требуемую совокупность характеристик процесса можно получить различным набором входных для процесса параметров. Так, элементы циркуляции, как и в принципе траекторию движения судна на циркуляции можно получить более, чем одним сочетанием значений скорости судна, угла перекладки руля и прочих определяющих циркуляцию параметров. Также одни и те же величины скоростного проседания и UKC могут определяться различными комбинациями значений скорости, поперечного сечения канала, глубины и т.д. Здесь следует допустить, что при более глубоком и обширном анализе эксплуатационных процессов могут быть обнаружены эксплуатационные процессы, для которых цифровой двойник будет представлять биекцию или инъекцию векторных пространств. Однако, на настоящем этапе исследования подобное считается больше исключением, чем правилом, особенно для эксплуатационных процессов, имеющих отношение к навигации судна.

В случае исключительно формального подхода к анализу процессного цифрового двойника можно сделать вывод о том, что пространства X и Y являются бесконечными. Действительно, практически любой набор значений параметров (любой вектор пространства X) в случае измерения параметров с абсолютной точностью (или нулевой погрешностью, что в принципе невозможно) и (или) при использовании в числовом значении бесконечно большого количества значащих цифр будет уникальным. При этом для любого значения параметра будут существовать большие и меньшие значения. Таким образом, как количество возможных значений самих параметров, так и число их комбинаций (число векторов) будет бесконечным. Следовательно, пространство X будет бесконечным, так же как и будет бесконечным пространство Y векторов характеристик.

Однако результат любого измерения любого параметра будет содержать некоторую погрешность Δ_1. Кроме того, некоторые параметры (не измеряемые, а устанавливаемые оператором) могут быть заданы только с определённой точностью. Так, например, угол перекладки руля, как правило, задаётся с точностью до целых, т.е. дискретность задания этого параметра равна 1°. При этом истинное значение угла перекладки руля будет неизвестным, в общем случает отличным от заданного и находится в некотором интервале. Подобный вывод можно сделать по отношению к любому заданному или измеренному параметру, истинное значение которого с некоторой вероятностью находится в доверительном интервале $\left(x_{изм} - \Delta x_1; x_{изм} + \Delta x_1\right)$, где Δx_1 определяется как указанной вероятностью, так и величиной погрешности измерения (задания). Таким же образом (посредством интервальной оценки) формируется понятие об истинных значениях характеристик.

Вместе с тем, для значений характеристик процесса достаточно не фактической, а практически значимой точности, т.е. той точности, которая обеспечит выполнение

поставленной задачи. Таким образом, изначально можно сформировать дискретное и конечное множество $y_{i1}, y_{i2}, .., y_{ij}, ..., y_{il}$ возможных значений той или иной (*i*-й) характеристики. Тогда в случае формирования процессного цифрового двойника любое измеренное значение характеристики будет при его записи в DTO меняться на y_{ij}, если это измеренное значение попадает в интервал $\left(y_{ij} - \left(y_{ij} - y_{i(j-1)}\right)/2; y_{ij} + \left(y_{i(j+1)} - y_{ij}\right)/2\right) = \left(y_{ij} - \Delta_{yj.л}; y_{ij} + \Delta_{yj.пр}\right)$. Указанный интервал не является доверительным в том смысле, которой вкладывается в него математической статистикой. В общем случае отстояния граничных значений интервала справа и слева от значения характеристики y_{ij}, содержащейся во множестве возможных значений, могут отличаться, т.е. $\Delta_{yj.л} \neq \Delta_{yj.пр}$, т.к. дискретность $d_{yij} = y_{ij} - y_{i(j-1)}$ ряда возможных значений характеристики не обязательно должна быть постоянной. Сами же значения $\Delta_{yj.л}$ и $\Delta_{yj.пр}$ зависят в первую очередь от необходимой (практически значимой) точности измерений этих характеристик в контексте задачи, для решения которой формируется цифровой двойник. Разработка же методики определения величин $\Delta_{yj.л}$ и $\Delta_{yj.пр}$ является задачей будущего периода настоящего исследования. Однако, одно условие существования и использования представленных интервалов и упомянутой методики очевидно: фактическая точность не должность быть хуже необходимой.

Аналогичные умозаключения можно сделать и по отношению к входным параметрам процесса, возможные значения каждого из которых представляются множествами $x_{i1}, x_{i2}, .., x_{ij}, ..., x_{im}$ с тем дополнением, что величины $\Delta_{xj.л}$ и $\Delta_{xj.пр}$ будут определяться также значениями $\Delta_{yj.л}$ и $\Delta_{yj.пр}$.

Такое представление множеств возможных значений параметров и характеристик делает векторные пространства *X* и *Y* конечными, а процедуру формирования процессного цифрового двойника и его дальнейшее использование более рациональными. Рациональность в этом случае заключается в компромиссе между простотой, точностью и полнотой цифрового двойника, а количество возможных векторов параметров и характеристик будет определять произведением количественных объёмов множеств. Так, допустим, что некоторый процесс определяется тремя входными параметрами (или характеристиками), при этом для первого из них существует 11 возможных значений, для второго – 6, а для третьего – 8. Тогда векторное пространство *X* (или *Y*) будет содержать $11 \cdot 6 \cdot 8 = 528$ векторов. Однако, следует заметить, что некоторые векторы будут содержать в себе координаты (значения параметров), сосуществование которых может быть физически неразумным при том, что по отдельности числовые значения параметров (характеристик) существовать могут. Например, волнение в 8 баллов и штиль (т.е. ветер 0 баллов) являются физически разумными, но только тогда, когда они не наблюдаются на одной акватории в один момент времени (т.е. не являются координатами одного вектора параметров). Таким образом, определяемое через упомянутое выше произведение количество векторов пространства *X* является не точным, а оценочным (максимально возможным). Такие «физически неразумные» вектора поименуем для определённости «безадресными». Для безадресных векторов пространства *X* не существует образа в пространстве *Y*. И, наоборот, безадресные вектора пространства *Y* не имеют прообраза в пространстве *X*. Тем самым нарушается сюръективное отображение, но только в том случае, если процедура формирования векторов обоих пространств с использованием множеств возможных значений и характеристик останется механистическим и

формальным и не будет разработана и реализована методика исключения безадресных векторов из пространств.

Очевидно, что при формировании цифрового двойника путём измерения и записи параметров и характеристик, безадресные векторы, являясь, как было сказано выше, «физически неразумными», возникнуть не могут. Однако их источником может стать операционный цифровой двойник, который не только «укладывает» измеренные значения параметров и характеристик в интервалы, но и выполняет более сложную задачу – устраняет информационные пробелы, т.е. «додумывает» те вектора и их координаты, которые не были получены в результате измерений. В результате и в случае некорректного выполнения указанной задачи векторные множества будут включать все возможные с точки зрения комбинаторики, а не практики, вектора, в т.ч. и безадресные.

Задача устранения информационных пробелов может быть решена посредством использования содержащихся в операционном цифровом двойнике данных об аналогичных процессах, полученных на судах-прототипах, математических моделей и различных математических инструментов, в частности, нейросетей.

Так, например, операционный цифровой двойник, используя соответствующие критерии и методики, подбирает несколько (в частном случае, одну) математических моделей процесса, ранжирует их по степени применимости и точности, уточняет при необходимости и на основе уже имеющихся векторов параметров и их образов эмпирические коэффициенты и вычисляет недостающие значения векторов характеристик. Эти значения могут быть представлены непосредственно в процессный цифровой двойник либо в нейросеть для дальнейшей их совместной обработки со значениями, полученными из других источников – информационных фрагментов операционного цифрового двойника. Вместе с тем, построение нейросети, включая выбор архитектуры и обучение модели, представляют собой отдельную масштабную процедуру, содержание и успех выполнение которой зависит в первую очередь от поставленной перед процессным цифровым двойником задачи (или задач). В любом случае, для восполнения пробелов векторных пространств нейросеть должна научиться «затягивать» их при помощи математических моделей, информации, уже содержащейся в процессном цифровом двойнике, а также представленной в аналогичных судовых двойниках судов-прототипов и ретроспективной информации, определяя предварительно для этих видов информации (значений параметров и характеристик) адекватные весовые оценки (веса).

Лингвистическая формализация принципов

Приведенные выше рассуждения и выводы либо являются непосредственно правилами формирования процессного цифрового двойника, либо имеют отношение к обоснованию этих правил, в совокупности представляя собой принципы формирования DTO. Вместе с тем, кодекс принципов нельзя считать полным без представленного ниже описания их посредственном естественного языка, т.е. без лингвистической формализации принципов.

Первым в числе принципов укажем тривиальный *принцип адекватности*, согласно которому процессный цифровой двойник по известным параметрам процесса должен «производить» все его значимые характеристики, т.е. характеристики, определяющие процесс «как есть».

С принципом адекватности тесно связан *принцип необходимой точности*, согласно которому, цифровой двойник должен не просто выдавать на выходе все значимые характеристики, но и делать это с такой точностью, которая необходима для решения задач или задачи, определяющих назначение цифрового двойника.

Принцип индивидуальности заключается в том, что цифровой двойник судна должен отражать сущность и соответствующие процессы конкретного судна, а не любого судна аналогичного проекта или схожего по характеристикам. Вместе с тем,

он должен быть по сути агрегированным, т.е. включать в себя цифровые двойники судна той же серии, которые будут нести вспомогательные функции, помогая вместе с математическими моделями и другими средствами и методами закрывать цифровому двойнику судна информационное пробелы. В этом заключается *принцип агрегированности* цифрового двойника.

Режим онлайн должен быть единственным режимом цифрового двойника процесса в том смысле, что он должен быть всегда доступен, без задержек обновлён и без какого-либо ожидания выдавать всю необходимую информацию. Этот режим определяет *принцип быстродействия* цифрового двойника.

Следующий принцип – *принцип конечности (ограниченности в объёме)* цифрового двойника, подразумевающий включение в DTO такого объёма информации, который делает процедуры его формирования и дальнейшего использования исполнимыми и эффективными. Иными словами, начальная стадия формирования процессного цифрового двойника, по окончанию которой он уже может использован по назначению, должна длиться физически разумное время, а информация занимать физически разумный объём памяти. В свою очередь, при использовании цифрового двойника по назначению объём информации не должен «тормозить» выработку характеристик процесса и инициировать сдвиг по времени между входом (параметрами) и выходом (характеристиками). Таким образом, принцип конечности обеспечивает также и принцип быстродействия.

Рядом с принципом конечности сосуществует *принцип оценивания полноты и её достаточности*. Если первым ограничивается максимум объёма информации, то вторым, по сути, её минимум. Иными словами, цифровой двойник для обеспечения своей полной функциональности должен включать в себя некоторый минимум информации, при этом такой минимум должен быть оценён непосредственно перед началом формирования по методике, которая ещё подлежит обоснованию.

Как было показано выше, даже непрерывные параметры должны питать цифровой двойник дискретными значениями. В этом заключается *принцип дискретности и квазидискретности*.

Принцип эволютивности цифрового двойника определяет необходимость присутствия у него способности к бесконечному развитию и модификациям.

Показанная выше сюръективность отображения векторного пространства параметров на векторное пространство характеристик указывает на самостоятельный и важный принцип, который именуется следующим образом – *принцип сюръективности*.

При формировании любого процессного эксплуатационного цифрового двойника природа детерминированности набора характеристик своим набором параметров никакого значения не имеет. Как запись в цифровой двойник пары векторов (параметров и характеристик), так и извлечение характеристик по текущим входным параметрам при использовании цифрового двойника должен иметь чисто механистический характер. Тем самым обоснуемый перечень принципом можно полонить ещё одним – *принципом игнорирования причинности*.

Операционный цифровой двойник среди прочего включает в себя математические модели, ретроспективную информацию, цифровые двойники других судов того же типа т.п., которые «включаются» в работу в первую очередь при возникновении необходимости восполнить информационные пробелы в процессном цифровом двойнике. В таком случае, как и в случае совместного использования данных, полученных косвенным (через математические модели и пр.) и прямым (посредством измерений) путём, процессный цифровой двойник должен определять ценность данных от каждого источника, т.е. должен «взвешивать» их, оценивая степень применимости. Таким образом, процедура формирования цифрового двойника должна соответствовать *принципу взвешенного использования данных*.

В итоге, при формировании процессного эксплуатационного цифрового двойника судна необходимо принимать во внимание следующие принципы:

– принцип адекватности;
– принцип необходимой точности;
– принцип индивидуальности;
– принцип агрегированности;
– принцип конечности (ограниченности в объёме);
– принцип оценивания полноты и её достаточности;
– принцип дискретности и квазидискретности;
– принцип эволютивности;
– принцип сюръективности;
– принцип игнорирования причинности;
– принцип взвешенного использования данных.

Представленный перечень не является исчерпывающим, однако он содержит основные правила формирования цифрового двойника, следование которым должно максимально способствовать получению эффективного инструментария для прогнозирования развития любого процесса, связанного с эксплуатацией морского судна.

Заключение

Технология цифровых двойников (Digital Twins Technology), несмотря на большое количество проблем, препятствующих её массовому внедрению в настоящий момент, видится одним из самых перспективных направлений развития морского флота. Более того, существующие тенденции в сфере автономного судоходства делают эту технологию ещё более востребованной. В условиях стремительного развития концепции морских автономных надводных судов возникает насущный вопрос о создании интеллектуальных систем, которые не просто повторяют действия человека, но и способны предсказывать развитие ситуации, анализируя огромные объемы данных в реальном времени. Цифровой двойник, представляющий собой виртуальную копию физического объекта, который постоянно обменивается данными с ним, является идеальным инструментом для решения этой задачи. В сфере судоходства он позволяет перейти от реактивного управления, когда решения принимаются после изменения обстановки, к проактивному, когда система заранее просчитывает несколько сценариев и предлагает оптимальный вариант.

В отличие от сухопутных физических объектов морское судно для реализации цифровых двойников является объектом более сложным, а, точнее, более проблематичным. В первую очередь, это связано с необходимостью наличия на борту средств хранения информации, объём которой в случае DT позволяет отнести их к большим данным (big data). В свою очередь, вариант облачного хранения предусматривает наличие надёжного непрерывного высокоскоростного Интернет-соединения. Меньшая проблема имеет место быть с источниками данных цифрового двойника. В этих целях может использоваться навигационное и иное оборудование современных морских судов, являющееся для них штатным (обязательным). Ещё одна проблема – методологическое обеспечение формирования цифрового двойника – отчасти решена в настоящей статье, посвящённой DTO – цифровым двойникам процессов, для которых приведены описание (в том числе графическое) и сформулированы (обоснованы) ряд правил представления параметров, «питающих» DTO, и характеристик, являющихся результатом его работы.

Все изложенные в настоящей работе положения имеют отношение к любому процессному судовому двойнику судна (т.е. к любому эксплуатационному процессу). Однако, изначально акцент был сделан на маневрировании и скоростном проседании. В рамках же продолжения исследования видится в первую очередь необходимой разработка методики оценки полноты и достаточности цифрового двойника,

обоснование его содержания (перечень параметров и характеристик), подбор надлежащих математических моделей, формул и алгоритмов, разработка методики по их актуализации (уточнению) посредством использования записанных в DT пар «вектор параметров – вектор характеристик». Одновременно следует ожидать технических и программных решений, касающихся методов и средств хранения большого объёма данных.

Список литературы

1. Юдин Ю.И., Сотников И.И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9, № 2. С. 200-208.
2. Ермаков С.В., Шевчук Д.В. Концепция адаптивной системы оценки текущего и прогностических значений скоростного проседания судна // Балтийский морской форум: Материалы XI Международного Балтийского морского форума. В 8-ми томах, Калининград, 25-30 сентября 2023 года. Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2023. С. 25-28.
3. Шевчук Д.В., Ермаков С.В. Целеполагание для развития адаптивной системы оценки текущего и прогностического значений скоростного проседания судна // Вопросы безопасности. 2025. № 4. С. 1-14. DOI: 10.25136/2409-7543.2025.4.75846.
4. Ермаков С.В., Мулина Е.В., Малинин Н.Ж. Цифровой двойник судна в период эксплуатации и оценка возможности его использования в целях построения и реализации траектории морских автономных надводных судов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2025. № 2. С. 48-58. DOI: 10.24143/2073-1574-2025-2-48-58.
5. РС: Цифровые двойники судов могут применяться для проверки и подтверждения принятых технических решений. URL: https://portnews.ru/news/364426/ (дата обращения 08.11.2025).
6. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
7. Новая философская энциклопедия: В 4 т. / Ин-т философии Рос. акад. наук, Нац. обществ.-науч. фонд; Науч.-ред. совет.: В. С. Степин [и др.]. М.: Мысль, 2010. Т. 3. 2010. 692 с.
8. Grieves, M., Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4.
9. Ершов Ю.Л., Палютин Е.А. Математическая логика. СПб.: Лань, 2004. 336 с.
10. Верещагин Н.К., Шень А. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Часть 1. Начала теории множеств. М.: МЦНМО, 2002. 128 с.

References

1. Yudin Yu.I., Sotnikov I.I. Matematicheskie modeli ploskoparallel`nogo dvizheniya sudna. Klassifikaciya i kriticheskij analiz [Mathematical models of plane-parallel vessel motion. Classification and critical analysis] // Vestnik MGTU. Trudy` Murmanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2006. T. 9, № 2. (In Russ). Pp. 200-208.
2. Ermakov S.V., Shevchuk D.V. Koncepciya adaptivnoj sistemy` ocenki tekushhego i prognosticheskih znachenij skorostnogo prosedaniya sudna [Concept of an adaptive system for assessing current and prognostic values of squat] // Baltijskij morskoj forum: Materialy` XI Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma. V 8-mi tomah, Kaliningrad, 25-30 sentyabrya 2023 goda. Kaliningrad: Kaliningradskij gosudarstvenny`j tehnicheskij universitet, 2023. (In Russ). Pp. 25-28.
3. Shevchuk D.V., Ermakov S.V. Celepolaganie dlya razvitiya adaptivnoj sistemy` ocenki tekushhego i prognosticheskogo znachenij skorostnogo prosedaniya sudna [Goal setting for the development of an adaptive system for assessing the current and predicted values of the vessel's squat] // Voprosy` bezopasnosti. 2025. № 4. (In Russ). Pp. 1-14. DOI: 10.25136/2409-7543.2025.4.75846.
4. Ermakov S.V., Mulina E.V., Malinin N.Zh. Cifrovoj dvojnik sudna v period e`kspluatacii i ocenka vozmozhnosti ego ispol`zovaniya v celyah postroeniya i realizacii traektorii morskih avtonomny`h nadvodny`h sudov [Digital twin of a vessel during operation and assessment of its possible use for the purpose of constructing and implementing of maritime autonomous surface

ships trajectory] // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tehnika i tehnologiya. 2025. № 2. (In Russ). Pp. 48-58. DOI: 10.24143/2073-1574-2025-2-48-58.
5. RS: Cifrovy`e dvojniki sudov mogut primenyat`sya dlya proverki i podtverzhdeniya prinyaty`h tehnicheskih reshenij. URL: https://portnews.ru/news/364426/ (08.11.2025).
6. Aliev T.I. Osnovy` modelirovaniya diskretny`h system [Fundamentals of discrete systems modeling]. (In Russ). SPb: SPbGU ITMO, 2009. 363 p.
7. Novaya filosofskaya e`nciklopediya [New Philosophical Encyclopedia]: V 4 t. / In-t filosofii Ros. akad. nauk, Nacz. obshhestv.-nauch. fond; Nauch.-red. sovet.: V.S. Stepin [i dr.]. M.: My`sl`, 2010. T. 3. 2010. (In Russ). 692 p.
8. Grieves, M., Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4.
9. Ershov Yu.L., Palyutin E.A. Matematicheskaya logika [Mathematical logic]. SPb.: Lan`, 2004. 336 p.
10. Vereshhagin N.K., Shen` A. Lekcii po matematicheskoj logike i teorii algoritmov. Chast` 1. Nachala teorii mnozhestv [Lectures on mathematical logic and theory of algorithms. Part 1. Elements of set theory]. M.: MCzNMO, 2002. 128 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ермаков Сергей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания, Калининградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «КГТУ»), 236029, г. Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru

Sergey V. Ermakov, Ph.D. in Engineering Science,Associate Professor of Department of Navigation and Maritime Safety, Kaliningrad State Technical University, 6, Molodeznaya str., Kaliningrad, 236029

Малинин Никита Жанович, преподаватель кафедры судовождения и безопасности мореплавания, Калининградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «КГТУ»), 236029, г. Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: for_informatics@mail.ru

Nikita Zh. Malinin, Lecturer of Department of Navigation and Maritime Safety, Kaliningrad State Technical University, 6, Molodeznaya str., Kaliningrad, 236029

Шевчук Данила Влаимирович, аспирант кафедры судовождения и безопасности мореплавания, Калининградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «КГТУ»), 236029, г. Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: schevchuk.dan@yandex.ru

Danila V. Shevchuk, postgraduate student of Department of Navigation and Maritime Safety, Kaliningrad State Technical University, 6, Molodeznaya str., Kaliningrad, 236029

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; принята к публикации 10.04.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 04.02.2026; published online 20.09.2026.