

Научная статья

УДК 656.612.052:681.516.54:004.89

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-48-58>

EDN PTTCME

Цифровой двойник судна в период эксплуатации и оценка возможности его использования в целях построения и реализации траектории морских автономных надводных судов

**Сергей Владимирович Ермаков[✉], Елена Вадимовна Мулина,
Никита Жанович Малинин**

*Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский
государственный технический университет», Калининград, Россия, sv.ermakov@bgarf.ru[✉]*

Аннотация. Рассмотрена и обобщена концепция цифровых двойников, являющаяся основой и одним из условий четвертой промышленной революции как в общем в промышленности, так и в морской индустрии. Проанализирована терминология концепции, включая множество определений термина «цифровой двойник», а также различные подходы к реализации этой концепции на практике. Рассмотрены различные типы цифровых двойников, которые были введены основателем концепции М. Гризовом: цифровой двойник прототипа, цифровой двойник образца, агрегированный цифровой двойник и операционный цифровой двойник. Обоснованы принципы построения цифрового двойника судна, включая индивидуальность, тождественность, необходимость использования в его структуре математических моделей, машинного обучения, искусственного интеллекта. Построена схема функционирования цифрового двойника судна в период эксплуатации, которая содержит физическое пространство – судно, датчики, однотипные суда, суда-цели, навигационное пространство; виртуальное пространство – цифровые двойники компонентов судна, процессов, навигационного пространства, других судов, а также операционный цифровой двойник, предназначенный для целевой обработки информации. Идентифицированы проблемы интеграции концепции цифровых двойников в процесс развития морских автономных надводных судов (МАНС), связанные с необходимостью хранить и обрабатывать большой объем данных, отсутствием общепринятых стандартов для таких данных, а также проблема адекватного восприятия информации внешним капитаном при дистанционном управлении судном. В контексте эволюции МАНС произведена прогнозная оценка роли цифровых двойников в функционировании автономных судов в различные периоды их эволюции с акцентом на задачу построения и реализации траектории движения МАНС.

Ключевые слова: цифровой двойник судна, морские автономные надводные суда, траектория, судовождение, автоматизация

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-48-58>. EDN PTTCME.

Original article

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

Sergey V. Ermakov[✉], Elena V. Mulina, Nikita Zh. Malinin

*Baltic Fishing Fleet State Academy of the FSBEI HE “Kalininograd State Technical University”,
Kalininograd, Russia, sv.ermakov@bgarf.ru[✉]*

Abstract. The concept of digital twins, which is the basis and one of the conditions of the fourth industrial revolution in both the general industry and the marine industry, is considered and summarized. The terminology of the concept is analyzed, including many definitions of the term “digital twin”, as well as various approaches to the implementation

of this concept in practice. Various types of digital twins, which were introduced by the founder of the concept M. Reeves, are considered: the digital twin of the prototype, the digital twin of the sample, the aggregated digital twin and the operational digital twin. The principles of building a ship's digital twin are substantiated, including individuality, identity, and the need to use mathematical models, machine learning, and artificial intelligence in its structure. A scheme of functioning of a ship's digital twin during operation is constructed, which contains a physical space – a ship, sensors, vessels of the same type, target vessels; navigation space; virtual space – digital twins of ship components, processes, navigation space, other vessels, as well as an operational digital twin designed for targeted information processing. The problems of integrating the concept of digital twins into the development of marine autonomous surface vessels (MASV) are identified, related to the need to store and process a large amount of data, the lack of generally accepted standards for such data, as well as the problem of adequate perception of information by an external captain during remote control of the vessel. In the context of the evolution of the MASV, a predictive assessment of the role of digital twins in the functioning of autonomous vessels in various periods of their evolution has been made, with an emphasis on the task of constructing and implementing the trajectory of the MASV.

Keywords: digital twin of a vessel, maritime autonomous surface ships, trajectory, navigation, automation

For citation: Ermakov S. V., Mulina E. V., Malinin N. Zh. 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 of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2025;2:48-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-48-58>. EDN PTTCME.

Введение

К настоящему времени мировое морское сообщество пришло к устойчивому пониманию того, что будущее морского флота связано, в первую очередь, с созданием, внедрением и развитием морских автономных надводных судов (МАНС). Различные страны и организации за последнее десятилетие достигли в своих разработках в области автономного судоходства немалого прогресса, свидетельство чему – множество представленных концептов МАНС.

Прямыми подтверждением мирового признания реальности перехода морского флота на технологии автономного судовождения и актуальности исследований в этом направлении является включение практически на постоянной основе вопросов нормирования эксплуатации МАНС в повестку дня сессий Комитета по безопасности на море Морской международной организации (ИМО).

Многие ключевые задачи, которые изначально подлежали решению в целях становления технологий автономного судоходства, действительно, получили некоторые первичные варианты решений, позволившие перейти от теории к практике, от гипотез, рассуждений и доказательств к испытаниям первых МАНС. Однако делать вывод о том, что эти варианты решений являются оптимальными, пока преждевременно. Скорее всего, развитие технологий МАНС будет иметь эволюционный характер, который подразумевает их постепенное совершенствование и появление новых решений ключевых задач.

Одной из таких задач является построение и реализация траектории движения МАНС, которая, по сути, фрагментируется на несколько связанных, но относительно самостоятельных задач. Первая из них – планирование перехода судна, т. е. предва-

рительная прокладка в классическом для навигации понимании этого термина. Здесь судно достаточно рассматривать как материальную точку. Вторая задача – обеспечение движения судна по заранее проложенному пути – исполнительная прокладка. В этом случае судно также можно принимать опять же за материальную точку, но при наличии некоторого ряда условий может быть допустима интерпретация судна только как тела, имеющего набор свойств. Третья задача – построение и реализация траектории судна при совместном плавании, требующем решения задачи безопасного расхождения. Для современного судоводителя эти задачи являются тривиальными, а для автоматических систем навигации и управления МАНС (систем принятия решений) – плохо формализуемыми.

В различных отраслях экономики, в том числе и в морской индустрии, уже нашли свое применение такие современные инновационные прогрессивные технологии, как интернет вещей (IoT), глубокое обучение, облачные вычисления, искусственный интеллект. К числу таких «умных» технологий относится и технология, основанная на использовании цифровых двойников реальных объектов (Digital Twins Technology – DTT). Интерес прикладной науки к DTT стал резко расти начиная с 2018 г., когда кривая количества публикаций, посвященных теории и приложениям цифровых двойников, резко пошла вверх [1].

В морской индустрии цифровые двойники уже используются или прогнозируются к использованию в ближайшем будущем для решения задач проектирования, постройки, испытаний и эксплуатации судов. Целью настоящей работы является оценка применимости технологии цифровых двойников на различных этапах эволюции МАНС для решения

задачи построения и реализации траектории.

Концепция цифровых двойников. Цифровой двойник судна

Упомянутая динамика публикаций, связанных с DTT, подразумевает присутствие различных подходов к пониманию термина «цифровой двойник» и, наоборот, отсутствие единого общепринятого определения.

Так, в работе [2] цифровой двойник определяется как виртуальная копия машины, роботов и устройств, содержащая данные, функции и интерфейсы связи.

В свою очередь, авторы документа [3] под цифровым двойником понимают цифровое представление физического объекта, связанных с ним процессов, систем и информации.

В ряде публикаций [4–6] цифровой двойник отождествлен с трехмерной цифровой динамически эволюционирующей моделью физического объекта при обязательном их (модели и объекта) взаимодействии.

Более оригинальное определение представлено в [7]: цифровой двойник – это цифровое зеркальное отражение физических объектов или процессов, созданное при помощи искусственного интел-

лекта, машинного обучения и данных, получаемых и полученных с датчиков.

Ниже приведены определения для цифровых двойников, принятые за основу в двух известных компаниях – ANSYS и General Electric (GE).

Цифровой двойник ANSYS – созданная в цифровом пространстве имитационная модель, которая полностью соответствует эксплуатационным характеристикам реальной системы и способна имитировать ее в реальном времени. В таком понимании данные датчиков, установленные в реальной системе, используются в качестве граничного условия имитационной модели для реализации синхронной работы реальной и виртуальной систем [8].

Цифровой двойник GE – это программное обеспечение, которое представляет объекты и процессы, используемые для понимания, прогнозирования и оптимизации производительности [8].

Большинство же определений цифрового двойника носит строго прикладной отраслевой характер.

Обобщенная простейшая визуализация цифрового двойника представлена на рис. 1. Здесь необходимо акцентировать внимание на различии понятий «данные» и «информация» (без раскрытия этого различия).



Рис. 1. Простейшая визуализация концепции цифрового двойника
(основные части цифрового двойника)

Fig. 1. Simple visualization of the digital twin concept (the main parts of a digital twin)

Хотя терминология со временем изменилась, основная концепция модели цифрового двойника осталась довольно стабильной с момента ее создания в 2002 г. Эта концепция основана на идее, что цифровая информационная конструкция в физической системе может быть создана как самостоятельная сущность. Цифровая информация является здесь «двойником» информации, которая была встроена в саму физическую систему, и будет связана с ней на протяжении всего жизненного цикла системы [9].

Основоположник концепции цифровых двойников М. Гризвз, практически указав на самодостаточность термина «цифровой двойник», т. е. на такую описательность этого словосочетания, кото-

рая не требует определений (термин одновременно является своей дефиницией), одновременно представил самое точное определение: *цифровой двойник* – это набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или фактический физический произведенный продукт от микрометрического уровня до макрореометрического уровня [9].

В оригинальной (авторской) концепции различают два типа цифровых двойников: цифровой двойник прототипа (Digital Twin Prototype – DTP) и цифровой двойник образца (Digital Twin Instance – DTI).

Цифровой двойник прототипа представляет собой некоторый набор информации, необходимый и достаточный для создания физического объекта

(в оригинале артефакта в смысле объекта, создаваемого человеком, в нашем случае – судна). В свою очередь, цифровой двойник образца описывает конкретный физический продукт.

Отсюда можно сделать вывод о соотношении DTP, DTI и реального (физического) объекта. В случае цифрового двойника прототипа именно он является источником («прапородителем») для физического объекта. И, наоборот, сам физический объект первичен по отношению к DTI.

Здесь необходимо заметить о не самом удачном (но уже устоявшемся) переводе слова *twin*. Интуитивное распространенное восприятие содержания слова «двойник» связано с его перманентной вторичностью по отношению к оригиналу. Между тем Digital Twin подразумевает на некотором уровне идентичность с физическим объектом и позволяет делать множество выводов о внешнем виде, свойствах, функционировании оригинала без непосредственного к нему обращению. При этом оригинал нередко обозначают не как физический объект (*physical object*), а как физическую сущность (*physical entity*) или физический близнец (*physical twin*).

Кроме DTP и DTI, М. Гризв ввел также понятия агрегированного цифрового двойника (*Digital Twin Aggregate – DTA*) и операционного цифрового двойника (*Digital Twin Environment – DTE*).

Агрегированный цифровой двойник обобщает в себе DTI нескольких образцов (экземпляров) одного и того же объекта и является не цифровым двойником, как таковым, а некоторой вычислительной конструкцией, которая взаимодействует со «своими» DTI при необходимости (*ad hoc*) или постоянно.

Операционный цифровой двойник – некоторое мультидоменное прикладное пространство – среда цифровых двойников, обеспечивающая выполнение разнообразных операций с ними для решения различных прикладных задач (например, прогнозирования).

В целях настоящего исследования констатируем, что морское судно первично появляется в виртуальном пространстве в виде цифрового двойника прототипа, а уже на следующем этапе появляется физический объект, у которого после начала эксплуатации появляется свой DTI.

Морские суда не являются массовым продуктом даже при серийном производстве, что делает более наглядным восприятие агрегированного цифрового двойника. В таком случае DTA объединяет (или, что точнее, обобщает) цифровые двойники судов одной серии, т. е. судов, построенных по одному проекту, – так называемых *sister ships*.

В ряде публикаций, например в [10], авторы предполагают наличие нескольких (как правило,

четырех) уровней цифрового двойника:

- цифровой двойник компонента – некоторого фрагмента, составной части (механизма, детали) основного объекта;
- цифровой двойник основного объекта;
- цифровой двойник системы объектов, который может включать в отличие от DTA не только совокупность однотипных экземпляров, но и все совместно работающее оборудование;
- цифровой двойник технологического процесса.

Однако, по сути, подобное распределение (классификация) цифровых двойников на уровни без определения соотношения этих уровней не является обоснованным, несколько искажает оригинальную концепцию цифровых двойников и является некоторой латентной тавтологией содержания понятия «цифровой двойник». Если изначально определен некоторый основной физический объект (в нашем случае – морское судно), то его цифровой двойник – это есть набор информации, имеющей к существованию объекта в конкретный момент или период времени (период жизненного цикла объекта) непосредственное отношение. В этот набор в числе прочего (и при необходимости) входит информация о каждом компоненте, о технологических процессах и др. Таким образом, выделенный в каких-либо целях из цифрового двойника объекта некоторый объем информации остается частью этого цифрового двойника. Только для удобства, а также для предупреждения излишнего терминологического разнообразия этот объем можно также называть цифровым двойником (например, цифровым двойником навигации).

Цифровой двойник должен содержать не только большой массив данных, полученных с датчиков физического объекта, но также математические модели. Их задача – устранение информационных пробелов, связанных с отсутствием данных или невозможностью прямого измерения параметра. Иными словами, предназначение в цифровом двойнике математических моделей – отражение неопределенности реального мира. Математические модели используются для весьма конкретных целей, а их вывод рассматривается в контексте миллионов точек данных.

Очевидно, что кроме математических моделей, цифровой двойник (операционный цифровой двойник) для обработки текущих и ретроспективных данных должен использовать все современные методы и средства (машинное обучение, искусственное обучение и др.) с целью обеспечения полноты содержащейся в двойнике информации и точного отражения «поведения» физического объекта в любой момент времени, в том числе приходящийся на будущий период.

Цифровой двойник судна должен быть индиви-

дуальным, т. е. отражать сущность и соответствующие процессы конкретного судна, а не любого судна аналогичного проекта или схожего по характеристикам. Вместе с тем он должен быть агрегированным, т. е. включать 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 информационные пробелы.

Режим онлайн должен быть единственным режимом цифрового двойника судна в том смысле, что он должен быть всегда доступен, без задержек обновлен, с максимально возможной точностью соответствовать реальному судну и без какого-либо ожидания выдавать всю необходимую ин-

формацию, имеющую потенциал действия.

Представленные описания и анализ концепции цифровых двойников позволяют построить схему, определяющую принципы формирования и функционирования цифрового двойника судна в период эксплуатации (рис. 2). В эту схему включены внутренние и внешние значимые для цифрового двойника судна элементы из реального и виртуального пространства. Кроме 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.

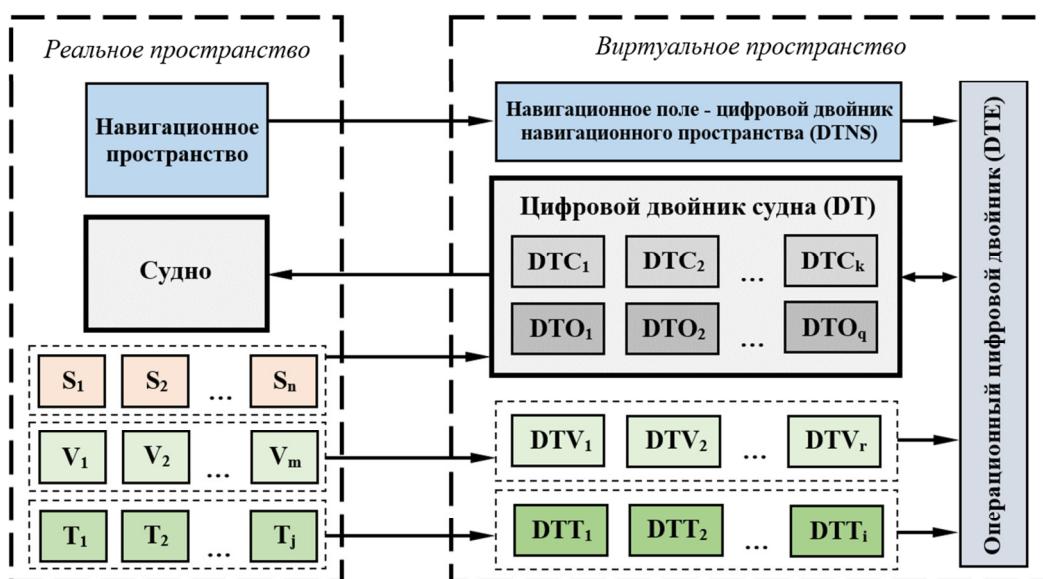


Рис. 2. Визуализация принципов формирования и функционирования цифрового двойника морского судна в период его эксплуатации

Fig. 2. Visualization of the formation and functioning principles of a vessel digital twin during its operation

Цифровой двойник судна включает в состав 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 объединяет 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 прототипа DTP, согласно теории М. Грибза.

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 в определении М. Грибза, как оно представлено выше.

Одним из цифровых двойников процессов будет цифровой двойник навигации – некоторый набор текущей и ретроспективной статической и динамической информации о судне и навигационном поле, необходимый и достаточный для построения траектории движения судна в конкретные периоды времени в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективах и реализации этой

траектории. Под навигационным полем здесь следует понимать сложное информационное поле, представляющее собой результат суперпозиции элементарных информационных полей, порождаемых реальными, значимыми для безопасности плавания условиями и явлениями, и определяющее оптимальные траекторию и скорость движения судна [11].

Информацией от иных элементов виртуального пространства цифровой двойник судна DT «питается» не напрямую, а через операционный цифровой двойник DTE, в котором с использованием различных инструментов (методов, моделей и др.) осуществляется целевая обработка информации. Именно в операционном цифровом двойнике происходит слияние информации, шумоподавление, извлечение и слияние признаков, преобразование и реорганизация информации в объеме, необходимом как для полноценного функционирования DT, так и для решения прикладных задач.

В реальном пространстве количество датчиков (сенсоров) *n* определяется обширным перечнем информации, необходимой для обеспечения полноценного функционирования цифрового двойника. В контексте решения задачи построения и реализации траектории судна (в том числе и МАНС) обязательными датчиками являются среди прочих: курсоуказатель, лаг, приемник ГНСС, эхолот, датчики перекладки руля, угловой скорости движения судна, датчики осадок, ветра, волнения и иные датчики, для обоснования полного комплекса которых необходимо провести отдельное исследование. Здесь очевидно, что фиксация многих данных в настоящее время производится обязательным к установке на многих морских судах регистратором данных рейса (Voyage Data Recorder – VDR). Однако следует предположить, что как датчиков – поставщиков данных для VDR, так и самих данных будет недостаточно для полноценного функционирования цифрового двойника судна.

В числе датчиков, как указано, среди прочих включены датчики параметров окружающей среды при том, что навигационное пространство представлено отдельным элементом пространства реального, для которого существует свой цифровой двойник. На первый взгляд, подобное соседство может свидетельствовать о дублировании данных и информации. Однако это не так. Датчики параметров окружающей среды фиксируют состояние локального навигационного поля, охватывающее навигационное пространство, в котором судно осуществляет навигацию в конкретный отрезок времени, позволяющее считать локальное навигационное поле стационарным. В свою очередь, навигационное пространство в качестве отдельного элемента представляет собой всю совокупность

акваторий плавания морских судов (по сути, всю поверхность Мирового океана). Источником данных для цифрового двойника такого пространства (глобального навигационного поля) являются не судовые датчики, а внешние по отношению к судну источники, в числе которых, в первую очередь, технические средства дистанционного зондирования Земли, а также различные ресурсы и системы информации об обстановке в Мировом океане. Двойник DTNS дает возможность прогнозировать навигационное поле для любой точки в любой момент времени.

Наличие в реальном пространстве, связанном с нашим судном, судов того же проекта необходимо для обеспечения полноты и избыточности информации для основного цифрового двойника DT. Если для оценки и прогнозирования какой-либо навигационной ситуации в DT не будет хватать информации, он может «позаимствовать» ее у цифровых двойников судов того же проекта.

С одной стороны, суда-цели одновременно являются элементами как реального, так и составляющего его навигационного пространства. Однако в терминологии, представленной в [11], цели представляют собой источник возмущения навигационного поля как виртуального отображения навигационного пространства, не являясь при этом частью этого пространства.

Цифровой двойник судна в контексте эволюции МАНС

Термин «морское автономное надводное судно» (Maritime Autonomous Surface Ships – MASS), его определение, а также классификация МАНС были введены в обиход ИМО в 2017 г. исключительно в целях регулятивного обзора (Regulatory Scoping Exercise – RSE), однако со временем этот термин вышел за пределы RSE и нашел хотя и не абсолютное, но широкое применение.

В понимании Морской международной организации МАНС – это судно, полностью или частично (в зависимости от степени автономности) способное выполнять свои функции без взаимодействия с человеком. Классификация МАНС предполагает *четыре степени автономности* и, будучи дополнена авторскими формулировками в скобках, выглядит следующим образом [11]:

I – судно с автоматизированными процессами и поддержкой принятия решений: экипаж находится на борту для управления и контроля судовых систем и функций (непосредственно пилотируемое судно с экипажем);

II – дистанционно управляемое судно с экипажем на борту: судно контролируется и эксплуатируется из удаленного места, но экипаж находится на борту (дистанционно пилотируемое судно с экипажем);

III – дистанционно контролируемое судно без экипажа на борту: судно контролируется и управляется из удаленного места (дистанционно пилотируемое безэкипажное судно);

IV – полностью автономное судно: управляющая система судна способна принимать решения и самостоятельно определять требуемые действия (автономное судно, беспилотное безэкипажное судно).

Очевидно, по представленной классификации полностью автономным судном является только МАНС четвертой степени автономности. В целях же настоящего исследования представленную классификацию приведем к более простому виду, установив три типа судов: автоматизированное судно, дистанционно пилотируемое судно и беспилотное судно.

В работе [12] приведена следующая возможная перспективная и ретроспективная периодизация развития технологий автоматизации процессов судовождения:

- эпоха нулевой автоматизации (эпоха примитивного судовождения);
- эпоха частичной автоматизации (эпоха постепенного неравномерного техногенеза судовождения):
 - период элементарной первичной автоматизации;
 - период базовой автоматизации;
 - период продвинутой автоматизации;
- эпоха полной автоматизации или эпоха искусственного интеллекта и автономного судовождения:
 - период теорий и концепций МАНС;
 - период концептов и пилотных проектов МАНС;
 - период первичной интеграции МАНС;
 - период паритета;
 - период гегемонии МАНС;
 - период монополии МАНС;
 - период полной автономности судов мирового флота.

Перечисленные эпохи и периоды идут не последовательно друг за другом, а могут накладываться, причем накладываться значительно. Так, соответствуют представленной периодизации в настоящее время три периода из числа перечисленных. Первый из них – период продвинутой автоматизации – означает то, что состав мирового флота определяется исключительно автоматизированными (но не автономными) судами. Однако следует считать, что результаты научных исследований в области МАНС достигли некоторой критической массы, позволившей создать пилотные проекты и концепты МАНС. Таким образом, одновременно с периодом продвинутой автоматизации мировой флот сейчас находится в следующих за ним временных периодах.

На языке концепции цифровых двойников два первых периода эпохи полной автоматизации подразумевают появления первых цифровых двойников прототипов МАНС (DTP-MASS), которые, безусловно, имеют свои особенности, но принципиально мало отличаются от DTP автоматизированных судов.

В целях эксплуатации, в частности навигации, автоматизированных судов цифровой двойник судна, по сути, является (может являться) информационной системой или, точнее, системой поддержки принятия решений (СППР), т. е. средством, входящим в ряд многих других средств автоматизации. В случае планирования и осуществления перехода судна в классическом понимании этих процедур цифровой двойник позволит автоматизировать их практически полностью. Предварительную и исполнительную прокладку в электронной картографической навигационно-информационной системе (ЭКНИС) будет «осуществлять» не вахтенный помощник капитана, а именно цифровой двойник судна. При автоматическом управлении судном в случае его следования прямым курсом или на циркуляции цифровой двойник будет обеспечивать наиболее точное (близкое к оптимальному) управляющее воздействие, придавая при существующих условиях плавания перу руля такие углы поворота, которые позволяют судну следовать по линии пути с минимальными от нее отклонениями. Таким образом, авторулевого, функционирующего по командам цифрового двойника, можно считать практически совершенной адаптивной самонастраивающейся системой автоматического регулирования курса судна.

В случае же решения задачи безопасного расходжения судов цифровой двойник будет тем дополнением или замещением средств автоматической радиолокационной прокладки (САРП), которое позволит рассчитывать, проигрывать и исполнять маневр более точно и эффективно, учитывая практически все факторы, влияющие на траекторию судна при маневрировании.

Здесь необходимо обратить внимание на проблемы, которые будут препятствовать внедрению и развитию концепции цифровых дневников и увеличивать длительность перечисленных выше периодов эпохи полной автоматизации.

Во-первых, функциональность цифрового двойника судна подразумевает необходимость хранения большого объема данных и высокопроизводительных вычислений. Локальный сервер, который теоретически можно установить и использовать на судах, не обеспечит ни того, ни другого. Кроме того, для обслуживания такого сервера на судне требуется соответствующий (и, скорее всего, освобожденный) специалист, а возможно, и штат спе-

циалистов. Однако подобное увеличение судовой роли противоречит как существующей уже долгое время тенденции к сокращению экипажей, так и самой парадигме автоматизации. На первый взгляд, решение проблемы здесь видится в использовании облачных технологий, которые позволяют хранить и обрабатывать практически неограниченный объем данных. Вместе с тем для обеспечения коммутации судовых датчиков с облаком суда должны быть обеспечены надежным широкополосным высокоскоростным доступом в глобальную сеть.

Наличие описанной проблемы с движением, хранением и обработкой информации несколько меняет архитектуру цифрового двойника, представленную на рис. 2. Цифровой двойник судна не сможет обновляться непрерывно актуальными данными с других судов так же, как и цифровой двойник навигационного пространства нельзя будет считать полноценным по причине отсутствия постоянного взаимодействия с источниками информации. Таким образом, среди задач, которые подлежат оперативному решению, будут присутствовать задачи с такими исходными данными (начальными условиями), для которых цифровой двойник судна в представленной выше архитектуре не сможет выдать оптимальное решение или не сможет выдать решение вовсе.

Другой проблемой, которая может привести к таким же последствиям, является отсутствие единых общих стандартов в отношении форматов данных и информации, их получения, хранения и обработки. В итоге цифровые двойники даже при наличии устойчивых, надежных и обладающих достаточной пропускной способностью каналов связи между ними не смогут в принципе взаимодействовать («общаться») из-за отсутствия общего языка и правил.

Существование указанных проблем до некоторого момента времени будет сдерживать развитие концепции цифровых двойников в морской индустрии и ее внедрение в эксплуатацию флота, а начиная с этого момента остановят развитие. Ограниченностю взаимодействия внешних и внутренних элементов цифрового двойника означает потерю как минимум одного из его сущностных признаков – онлайн-соответствия своему физическому объекту (судну), оставаясь при этом достаточно эффективной СППР, но не более.

Обозначенные проблемы не являются критичным препятствием экспансии МАНС в мировой флот, но однозначно увеличивают как срок этой экспансии, так и длительность следующих периодов развития.

Период первичной интеграции МАНС предполагает начало промышленной эксплуатации ди-

станционно пилотируемых судов на морских маршрутах и линиях. Когда же количество этих судов достигнет 25–30 % от общего количества судов мирового морского флота, начнется период паритета, которому также будет свойственна вторая волна экспансии МАНС, где фронтом уже будут беспилотные суда.

Периоды эксплуатации дистанционно пилотируемых судов, скорее всего, будут сопровождаться еще одной проблемой, которая к настоящему времени пока еще не вышла из-за горизонта научных исследований. Эта проблема заключается в том, что лица, принимающие решения, т. е. внешний капитан, эмоционально и (или) интеллектуально отделяются от реальной системы. Есть основания предполагать, что это может привести к неспособности обнаружить и отреагировать на детали, которые были бы видны в реальности. Однако эта, как и все перечисленные проблемы, гипотетически подлежит решению.

В случае дистанционно пилотируемых судов функция полноценного цифрового двойника остается такой же, какой она была описана выше для автоматизированного судна, потому что итоговое решение, как и ответственность за это решение, здесь остается за человеком.

Когда доля автономных судов в мировом флоте достигнет 60–70 %, наступит период гегемонии МАНС. В этот период на акваториях Мирового океана будут соседствовать беспилотные суда, дистанционно пилотируемые суда и оставшиеся автоматизированные суда. Для беспилотных судов цифровой двойник будет уже не СППР, а системой принятия и исполнения решений. Причем в отношении навигации судна наличие этой системы будет не только необходимым условием безопасной навигации, но и достаточным. Однако упомянутое выше соседство станет источником новой проблемы. Лицо, управляющее пилотируемыми судами (что непосредственно, что дистанционно), может принять нестандартное (возможно, ошибочное) и поэтому непредсказуемое для цифрового двойника беспилотного судна решение, которое невозможно было предвидеть заранее (спрогнозировать). Думается, что к моменту начала периода гегемонии МАНС методы и инструменты оценки риска претерпят такое прогрессивное развитие, которое решит эту проблему, и цифровые двойники беспилотных МАНС будут принимать решение с учетом человеческого фактора, влияющего на навигацию встречного судна.

В периоде монополии МАНС эргономические аспекты навигации еще останутся в повестке дня, т. к. сущностным признаком этого периода является совместная эксплуатация беспилотных и дистанционно пилотируемых судов. Однако эти ас-

пекты перестанут быть актуальными с началом периода полной автономности, когда беспилотные суда станут практически единственной основой мирового флота. В течение этого периода или за некоторое время до его начала парадигма цифровых двойников начнет меняться. В итоге цифровой двойник отдельно взятого судна станет вторичен по отношению к цифровому двойнику мирового флота (DTWF). Вся навигация на всех акваториях Мирового океана будет осуществляться по командам единого автономного центра принятия и исполнения решений, основанного на DTWF. Именно этот цифровой двойник будет строить маршруты судов и осуществлять проводку судов по этим маршрутам. При этом количество ситуаций, требующих маневрирования для расхождения судов, будет сведено к минимуму, а само маневрирование судов на виду друг у друга будет предельно согласованным и заранее запланированным. За человеком останутся исключительно контрольно-надзорные функции, при этом с течением времени количество его включений в процесс будет уменьшаться.

Заключение

Концепция цифровых двойников является неотъемлемой частью четвертой промышленной революции, признаком которой является внедрение в производство киберфизических систем. В случае морской индустрии, в частности эксплуатации морских судов, эта концепция обеспечит совершенно новый уровень автоматизации систем и процессов принятия решения на борту судна

вплоть до абсолютного исключения из технологических цепочек человека и окончательного перехода морского флота на полноценные МАНС. Так, в случае дистанционно пилотируемых судов цифровые двойники позволят принимать управлительские решения в отношении судна без необходимости их физического присутствия: это касается как краткосрочных ответных действий, так и долгосрочного планирования.

Очевидно, что реализация концепции цифровых двойников в морской индустрии – это очень ресурсоемкий процесс, в первую очередь – в части, касающейся финансового и кадрового обеспечения. Оцифровка элементов и процессов, навигационного пространства, разработка и подключение датчиков, совершенствование методологии обработки данных потребуют значительных капиталовложений. В свою очередь, для создания цифровых двойников необходимо иметь сложное сочетание экспертов, в число которых должны входить специалисты в предметной области, эксперты по датчикам и интернету вещей, специалисты по машинному обучению и искусственному интеллекту. Однако перспективы и выгоды от развития и внедрения в морскую индустрию цифровых двойников, определяемые среди прочего их значительным влиянием на интенсивность развития МАНС, любые инвестиции в эту сферу делают оправданными. Цифровые двойники позволяют сократить все периоды эволюции МАНС и привести автономные суда в морской флот намного быстрее, чем это может произойти без их участия.

Список источников

1. Lv Z., Lv H., Fridenfalk M. Digital Twins in the Marine Industry // Electronics. 2023. N. 12 (9). P. 2025. DOI 10.3390/electronics12092025.
2. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann J. Experimental Digital Twins-Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0 // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. V. 14. N. 4. P. 1722–1731. DOI 10.1109/TII.2018.2804917.
3. Maritime D. G. Digital Twin Report for DMA: Digital Twins for Blue Denmark. 2018. 25 p.
4. Alam K., Saddik El. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyberphysical systems // IEEE Access. 2017. N. 5. P. 2050–2062.
5. Rosen R., Von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // IFAC Papers On Line. 2015. N. 48 (3). P. 567–572.
6. Vasilev A., Samarin V., Raskind D., Evseev E., Veris V., Peschinski I., Kabesas Tapia D. F., Kurniawan Yo. Designing the built-in micro controller control systems of executive robotic devices using the digital twins technology // Proceedings of 2019 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech). Washington, D. C., USA: IEEE, 2019. P. 256–260.
7. Liu Yawei. Transition of American Aeronautical Equipment Acquisition to Digital Engineering // Aeronautical Science and Technology. 2019. V. 30. N. 211 (06). P. 81–82.
8. Yao Haiyuan, Wang Dachuan, Su Mengchao, Qi Yue. Application of Digital Twins in Port System // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N. 1846. P. 012008. DOI 10.1088/1742-6596/1846/1/012008.
9. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, Cham, 2017. P. 85–113. DOI 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
10. Морозов Р. В. Цифровые двойники технологических процессов // Экономические механизмы стратегического управления развитием промышленности: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. симпозиума III Междунар. Косыгин. форума «Современные задачи инженерных наук» (Москва, 20–21 октября 2021 г.). М.: Изд-во РГУ им. А. Н. Косыгина, 2021. Т. 2. С. 165–171.
11. Ермаков С. В., Мулина Е. В. Базовая терминология теории навигационного поля // Теория и практика обеспечения навигационной безопасности на морских путях и в районах промысла: материалы II Нац. науч.-

практ. конф. (Керчь, 24–25 марта 2023 г.). Керчь: Изд-во КГМТУ, 2023. С. 30–43.

12. Ермаков С. В., Мулина Е. В., Малинин Н. Ж. Ретроспективная и перспективная периодизация развития технологий автоматизации процессов судовождения // Новые стратегии и технологии морского судоходства

и промысла: материалы III Нац. науч.-техн. конф. на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» (Калининград, 28 марта 2024 г.). Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2024. С. 41–45.

References

1. Lv Z., Lv H., Fridenfalk M. Digital Twins in the Marine Industry. *Electronics*, 2023, no. 12 (9), p. 2025. DOI 10.3390/electronics12092025.
2. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann J. Experimentable Digital Twins-Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 1722-1731. DOI 10.1109/TII.2018.2804917.
3. Maritime D. G. *Digital Twin Report for DMA: Digital Twins for Blue Denmark*. 2018. 25 p.
4. Alam K., Saddik El. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyberphysical systems. *IEEE Access*, 2017, no. 5, pp. 2050-2062.
5. Rosen R., Von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC Papers On Line*, 2015, no. 48 (3), pp. 567-572.
6. Vasilev A., Samarin V., Raskind D., Evseev E., Veris V., Peschinski I., Kabesas Tapia D. F., Kurniawan Yo. Designing the built-in micro controller control systems of executive robotic devices using the digital twins technology. *Proceedings of 2019 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)*. Washington, D. C., USA, IEEE, 2019. Pp. 256-260.
7. Liu Yawei. Transition of American Aeronautical Equipment Acquisition to Digital Engineering. *Aeronautical Science and Technology*, 2019, vol. 30, no. 211 (06), pp. 81-82.
8. Yao Haiyuan, Wang Dachuan, Su Mengchao, Qi Yue. Application of Digital Twins in Port System. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1846, p. 012008. DOI 10.1088/1742-6596/1846/1/012008.
9. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Sys-*tems. Springer, Cham, 2017. Pp. 85-113. DOI 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
10. Morozov R. V. Tsifrovye dvoyniki tekhnologicheskikh protsessov. Ekonomicheskie mekhanizmy strategicheskogo upravleniya razvitiem promyshlennosti [Digital counterparts of technological processes. Economic mechanisms of strategic management of industrial development]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo simpoziuma III Mezhdunarodnogo Kosyginskogo foruma «Sovremennye zadachi inzhenernykh nauk» (Moskva, 20–21 oktiabria 2021 g.)*. Moscow, Izd-vo RGU imeni A. N. Kosygina, 2021. Vol. 2. Pp. 165-171.
11. Ermakov S. V., Mulina E. V. Bazovaia terminologija teorii navigatsionnogo polia. Teoriia i praktika obespechenija navigatsionnoi bezopasnosti na morskikh putiakh i v raionakh promysla [The basic terminology of the theory of the navigation field. Theory and practice of ensuring navigation safety-news on sea routes and in fishing areas]. *Materialy II Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Kerch', 24–25 marta 2023 g.)*. Kerch', Izd-vo KGMTU, 2023. Pp. 30-43.
12. Ermakov S. V., Mulina E. V., Malinin N. Zh. Retrospektivnaia i perspektivnaia periodizatsiia razvitiia technologii avtomatizatsii protsessov sudovozhdeniya. Novye strategii i tekhnologii morskogo sudokhodstva i promysla [Retrospective and prospective periodization of the development of technologies for automation of navigation processes. New strategies and technologies for maritime navigation and fishing]. *Materialy III Natsional'noi nauchno-tehnicheskoi konferentsii na baze FGBOU VO «Kalininogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet» (Kalininograd, 28 marта 2024 g.)*. Kaliningrad, Izd-vo BGARF FGBOU VO «KGTU», 2024. Pp. 41-45.

Статья поступила в редакцию 19.02.2025; одобрена после рецензирования 01.04.2025; принятая к публикации 16.04.2025
The article was submitted 19.02.2025; approved after reviewing 01.04.2025; accepted for publication 16.04.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Владимирович Ермаков – кандидат технических наук; директор Морского института; Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»; sv.ermakov@bgarf.ru

Sergey V. Ermakov – Candidate of Technical Sciences; director of the Nautical Institute; Baltic Fishing Fleet State Academy of the FSBEI HE “Kalininograd State Technical University”; sv.ermakov@bgarf.ru

Елена Вадимовна Муллина – аспирант кафедры судовождения и безопасности мореплавания, второй помощник капитана УПС «Седов»; Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»; mulina409@gmail.com

Никита Жанович Малинин – аспирант; преподаватель кафедры судовождения и безопасности мореплавания; Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»; for_informatics@mail.ru

Elena V. Mulina – Postgraduate Student of the Department of Navigation and Maritime Safety, Second Mate of STV “Sedov”; Baltic Fishing Fleet State Academy of the FSBEI HE “Kalininograd State Technical University”; mulina409@gmail.com

Nikita Zh. Malinin – Postgraduate Student; Lecturer of the Department of Navigation and Maritime Safety; Baltic Fishing Fleet State Academy of the FSBEI HE “Kalininograd State Technical University”; for_informatics@mail.ru

