ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ВМФ

Пыльнев Юрий Васильевич - доктор технических наук, профессор, президент АО «ИК «НЕОТЕК МАРИН».
Кирюхин Илья Алексеевич - кандидат технических наук, главный конструктор АО «ИК «НЕОТЕК МАРИН».
Новожилов Никита Юрьевич - заместитель генерального директора АО «ИК «НЕОТЕК МАРИН».
Смирнов Виктор Александрович - заместитель главного конструктора АО «ИК «НЕОТЕК МАРИН».

Аннотация

Рассмотрены архитектура и технологические решения вычислительно-моделирующего комплекса (ВМК) компьютерных тренажеров для подготовки специалистов ВМФ. Показано, что моделирование состояния объекта, его систем и технических средств в едином вычислительно-моделирующем комплексе позволяет достоверно воспроизводить их поведение в реальном времени с учетом их взаимосвязей. Приведены основная терминология, унифицированная структура цифрового двойника морского объекта и классификация компьютерных имитационных моделей. Описаны принципы организации вычислений в ВМК, обеспечивающие детерминизм, устойчивость и расширяемость моделирования, а также результаты практического применения в проектах создания компьютерных учебно-тренировочных средств (УТС) для современных кораблей ВМФ.

Ключевые слова: *вычислительно-моделирующий комплекс, компьютерный тренажер, цифровой двойник, компьютерная имитационная модель, программный имитатор, подготовка специалистов ВМФ.*

Вопросы подготовки личного состава находились в центре внимания ещё при создании регулярного флота. В «Учреждении к бою по настоящему времени» (1708 г.) Петр I требовал «непрестанно тому обучать, как в бою поступать» [1].

Сегодня эта задача как никогда актуальна. В июле 2025 г. Министр обороны РФ А.Р. Белоусов объявил о запуске системного проекта «Военное образование – на службе Отечеству» до 2035 года, направленного на комплексное изменение системы подготовки военнослужащих. Среди его направлений – адаптация военного образования к технологическим изменениям, развитие материально-технической базы и подготовка специалистов в области информационных технологий [2]. Модернизация военного образования названа приоритетом и на расширенной Коллегии Минобороны [3].

Для ВМФ эта задача имеет особое значение. Современные технологии и вычислительные мощности позволяют воссоздать на компьютерных тренажерах практически любые ситуации, включая аварийные. При этом особую роль играет формирование интеллектуальных навыков: исследования, проведенные специалистами ВМФ, показывают, что время подготовки целесообразно распределять в соотношении 80-90 % на интеллектуальные навыки и 10-20 % – на моторные [4].

Отечественная школа тренажеростроения имеет глубокие корни: еще в 1962 г. был введен в эксплуатацию первый тренажер судовой ядерной энергетической установки ледокола «Ленин». Уже с конца 1960-х годов создавались комплексы, объединявшие модели энергетики, общекорабельных систем, навигации, связи через центральный комплекс приборов. Именно тогда была осознана проблема согласованности данных между имитаторами различных технических средств и систем морского объекта. Сегодня она решается путем создания единого вычислительно-моделирующего комплекса, который обеспечивает взаимосвязь моделей и управление ими в реальном времени. В АО «ИК «НЕОТЕК МАРИН» для этого сформирована и развивается целостная система архитектурных и технологических решений на базе собственной цифровой платформы «НЕО ИНТЕЛЛЕКТ». Кроме этого, в компании разработан и применяется понятийный аппарат в области компьютерных учебно-тренировочных средств, опирающийся на действующую нормативную базу ВМФ.

Вычислительно-моделирующий комплекс определяется как составная часть учебно-тренировочного средства, представляющая собой совокупность программных средств, информационного обеспечения и, при необходимости, средств вычислительной техники, реализующая функции моделирующего устройства и обеспечивающая совместное функционирование составных частей тренажера при проведении учебных мероприятий.

Программный имитатор (ПИ) – программное средство в составе тренажера, имитирующее функционирование образца техники с воспроизведением органов управления и средств отображения информации осваиваемого образца техники.

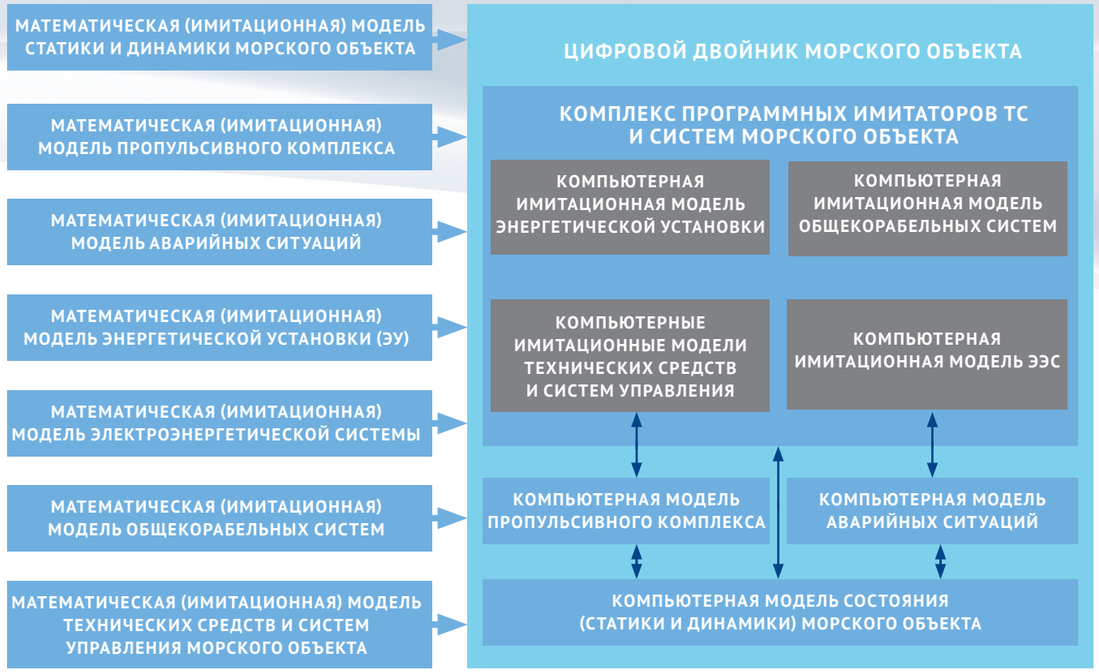


Рисунок 1 – Унифицированная структура учебного цифрового двойника морского объекта

Развивая эти положения, компания рассматривает программный имитатор как единство двух составляющих: дисплейного имитатора (ДИ) – графического отображения имитируемого объекта (органов управления), реализованного в виде интерактивных схем или панелей, с которыми взаимодействует обучающийся, и компьютерной имитационной модели (КИМ), которая обрабатывает поступающие от интерфейса запросы и меняет состояние имитируемого объекта в соответствии с логикой его функционирования.

Опираясь на эти положения, компания развивает и собственные понятия, в частности **учебный цифровой двойник морского объекта** (ЦД-У) – цифровой двойник, предназначенный для применения в процессе обучения, функциональность и характеристики которого определяются конкретными учебными целями, заданными заказчиком. Данное понятие развивает положения ГОСТ Р 57700.37-2021 о цифровых двойниках изделий применительно к учебным задачам [5].

Унифицированная структура учебного цифрового двойника морского объекта (рис. 1) предполагает наличие центрального звена – компьютерной имитационной модели состояния (статики и динамики) морского объекта, которая взаимодействует с моделями пропульсивного комплекса (ПК), главной энергетической установки (ГЭУ), общекорабельных систем (ОКС) и электроэнергетической системы (ЭЭС) через соответствующие программные имитаторы органов и систем управления.

В структуру ЦД-У также включены модели аварийных ситуаций – распространения пожара, поступления воды, задымления и других видов боевых и технических повреждений, связанные с моделью статики и динамики объекта и моделями смежных систем.

Именно через эти связи реализуется развитие аварийного процесса; при этом ключевым является обеспечение единства информационного пространства – изменение параметра в одной системе отражается на всех смежных.

Для формализации требований к глубине моделирования и обоснованной оценки трудоемкости разработки моделей разработана классификация КИМ, в основу которой положены два основных признака: класс математической сложности – тип и структура используемого математического аппарата (от логических условий до систем нелинейных дифференциальных уравнений), и класс масштабной сложности – объем системы по числу элементов, параметров и связей. Итоговый класс модели определяется по максимальному из двух признаков. Сводная характеристика классов приведена в таблице 1. Подобным образом построена классификация программных имитаторов по функциональности (пять классов – от простейшей арматуры до комплексных систем управления).

Наличие классификации позволяет уже на этапе формирования технического задания однозначно определить требуемый состав моделей и имитаторов, а в дальнейшем – разработать основу для

Класс	Математический аппарат	Число параметров	Изменение параметров	Примеры
1	Логические условия, булева алгебра	1-5	Отсутствует (только переключение состояний)	Запорная арматура, выключатели
2	Таблицы, интерполяция, эмпирические полиномы	до 20	Квазистатика (в пределах паспортных характеристик)	Дизель-генератор, насос, компрессор
3	Система линейных алгебраических уравнений, линейные дифференциальные уравнения	до 100	Полная динамика переходных процессов	ОКС, ЭЭС, гидравлические сети
4	Системы нелинейных дифференциальных уравнений	более 100	Полная динамика с учетом случайных воздействий	Модель статики и динамики морского объекта

Таблица 1 – Классификация компьютерных имитационных моделей

обоснованной оценки трудозатрат и определения необходимого финансирования для создания тренажерного комплекса.

Такой подход не является принципиально новым: классификация программных средств по сложности – общий принцип, успешно апробированный, в частности, при создании интерактивных электронных технических руководств (ГОСТ Р 54088-2010, а также стандарты для ИЭТР изделий ВиВТ), где сложность руководства также фиксируется классом.

АРХИТЕКТУРА ВМК

Современные компьютерные тренажеры предъявляют к ВМК высокие требования:

- функционирование в реальном или ускоренном времени – шаг интегрирования должен укладываться в бюджет времени, задаваемый масштабом имитации;
- многопользовательский режим – несколько операторов одновременно взаимодействуют с общим имитируемым объектом через различные дисплейные имитаторы (ДИ) систем управления и оборудования;
- детерминизм – сеанс имитации должен воспроизводиться для разбора действий обучающихся и аттестации;
- устойчивость – сбой или отключение одного рабочего места не должен приводить к рассогласованию общего состояния;
- расширяемость – состав имитационных моделей и ДИ определяется набором подключаемых плагинов, обеспечивающих реализацию как простых имитаторов, так и имитаторов высокого класса.

Традиционно архитектуры ВМК тренажеров строятся на одной из трех схем (таблица 2).

Авторами разработана и апробирована архитектура ВМК, сочетающая преимущества известных схем. Истинное состояние моделируемого объекта и окружающей обстановки поддерживается менеджером моделей в выделенном вычислительном процессе, а каждое рабочее место оперирует собственным подмножеством сущностей под управлением менеджера дисплейных имитаторов. Обмен осуществляется через базу данных реального времени (БДРВ) – общий набор параметров всех моделей и имитаторов тренажера, защищенный механизмом синхронизации (мьютексом), – с передачей только изменений (дельт) параметров относительно номера поколения (рисунок 2).

Действия операторов передаются в обратном направлении и обрабатываются потоком моделей перед шагом интегрирования. Детерминизм обе-

№	Архитектурная схема ВМК	Особенности и ограничения
1	Единый цикл имитации статических и динамических процессов с синхронными вызовами дисплейных имитаторов	Простота, но жесткая связность: задержка обновления одного рабочего места задерживает весь цикл
2	Распределенная симуляция (опираясь на форматы HLA/DIS [6])	Стандартизованный обмен сообщениями, но возникают проблемы с высокой сложностью инфраструктуры и расходами на сериализацию передаваемых данных
3	Репликация состояния с детерминированной симуляцией	Требует детерминизма всех моделей и одинакового порядка событий на всех узлах

Таблица 2 – Особенности типовых архитектурных схем ВМК

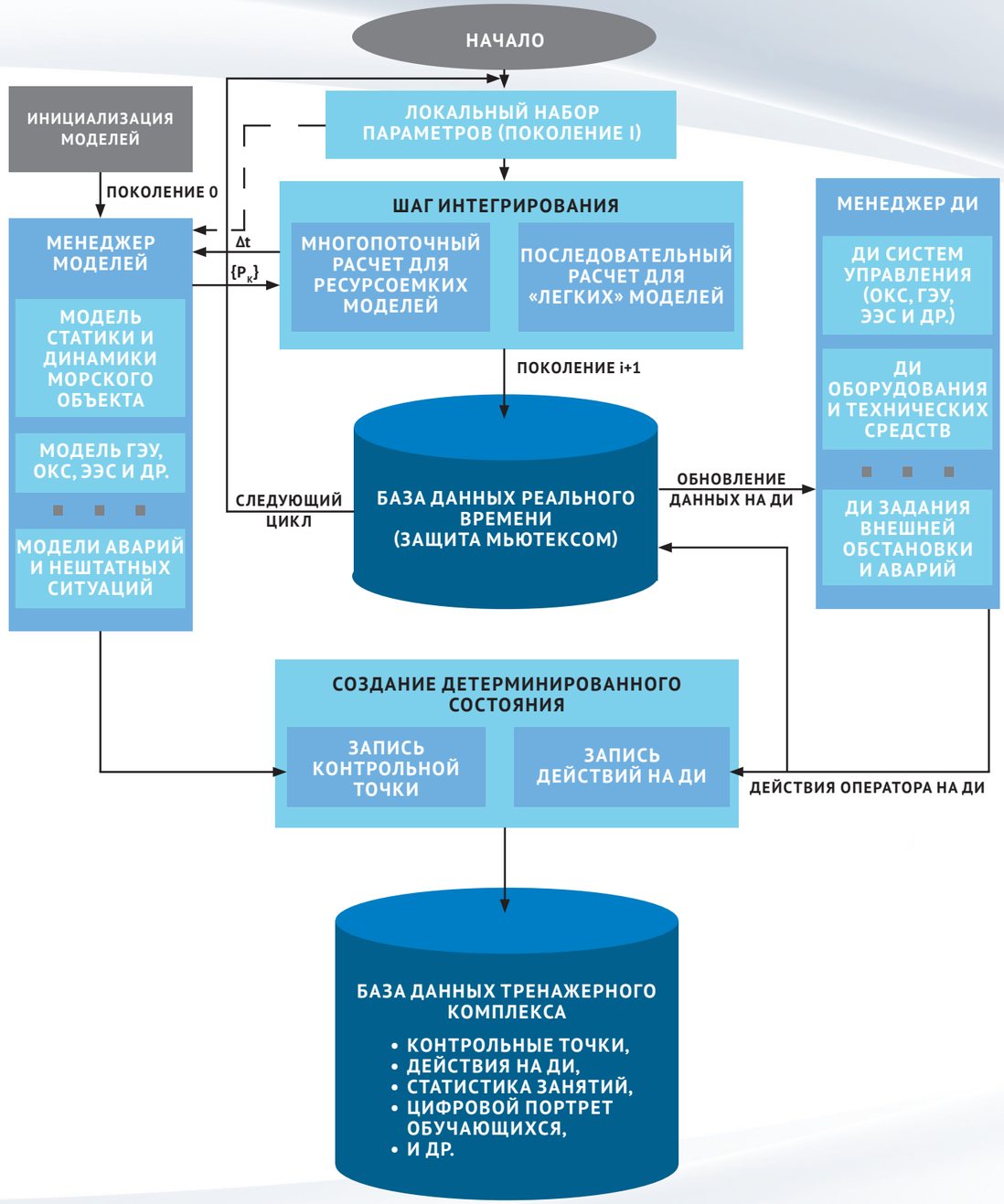


Рисунок 2 – Алгоритмическая схема функционирования ВМК

спечивается самодостаточной записью сеанса: контрольной точкой (состоянием всех имитационных моделей тренажера в определенный момент времени), журналом действий обучающихся и журналом изменений шага интегрирования. Такое построение обеспечивает асинхронный обмен изменениями, явное разделение вычислительных потоков моделей и обработки данных с ДИ и детерминированную запись имитации, не требующую детерминизма на стороне ДИ. Встроенное профилирование позволяет отслеживать долю времени на интегрирование, обработку действий, синхронизацию БД и простои.

На каждом цикле интегрирования ВМК выполняет следующие операции:

- обработку и журналирование накопленных действий оператора;
- расчет параметров моделей (шаг интегрирования);
- синхронизацию базы данных реального времени.

Для ресурсоемких моделей (например, решение сложных нелинейных дифференциальных уравнений в задачах гидродинамики) предусмотрен многопоточный шаг интегрирования: сначала выполняется копирование значений параметров в локальную копию, затем запускаются асинхронные задачи в пуле задач, и по их завершении результаты сохраняются в БДРВ. Это позволяет распараллелить вычисления, не нарушая потокобезопасности всего множества моделей. Преимущества разработанной архитектуры ВМК представлены в таблице 3.

Вместе с тем существуют и ограничения, обусловленные принятыми техническими решениями:

- опрос вместо push-уведомлений; период опроса должен быть не меньше времени обработки предыдущей порции, что ограничивает минимальную задержку обновления ДИ;
- единый мьютекс БДРВ; при очень большом числе рабочих мест возможна конкуренция при записи параметров, передаваемых с ДИ;
- размерность счетчика поколений ограничивает длительность непрерывной имитации; при необходимости предусмотрен переход на счетчик большей разрядности;
- отсутствие распределенного консенсуса; архитектура ВМК рассчитана на единый набор имитационных моделей с вычислением на одном сервере; распределенная имитация потребовала бы дополнительных механизмов.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Описанные технические решения и архитектура ВМК успешно реализованы в ряде проектов, выполненных АО «ИК «НЕОТЕК МАРИН» для Военно-Морского Флота в период 2018-2026 гг.

Наиболее полным воплощением разработанной архитектуры и технологических решений является комплекс унифицированных рабочих мест «КУРМ 06363» для неатомных подводных лодок проекта 636.3, обеспечивающий подготовку экипажей по управлению подводной лодкой, эксплуатации основного оборудования и борьбе за живучесть. Программной основой является цифровой двойник типовой подводной лодки; разработка и верификация компьютерных имитационных моделей выполнены на основе данных АО «ЦКБ МТ «Рубин» и результатов натурных испытаний. Комплексы эксплуатируются на Тихоокеанском и Черноморском флотах; принято решение о поставке пяти комплектов в военные институты ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» до 2029 года. КУРМ 06363 стал основой для развития технологических решений применительно к другим проектам подводных лодок, включая проект 677 «Лада», а также надводных кораблей [7].

С 2020 по 2025 год в ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» на базе платформы «НЕО ИНТЕЛЛЕКТ» модернизированы тренажеры «Гвоздика», «Молния», «Овод», «УТК ПЛ», «Альпинист-55» и «Мажара-ДПЛ»; в 2026 году планируется модернизация тренажеров «Нептун» и «Мажара-НК». Все они работают на общей платформе и используют единые коммуникационные протоколы, что позволяет интегрировать их в единое информационное пространство и отрабатывать междисциплинарные сценарии. Унификация аппаратных и программных решений обеспечила сокращение затрат на закупку и обслуживание на 50–60 %, а на реализацию проектов модернизации – на 80-90 % по сравнению с созданием аналогичных систем с нуля. [8]

Свойство архитектуры	Преимущество
Слабая связность моделей и ДИ – прямые связи между подсистемами отсутствуют, взаимодействие идет только через общую БДРВ и механизм сопоставления идентификаторов	Упрощает разработку, модификацию и замену отдельных моделей и имитаторов без перестройки всего комплекса
Инкрементальный обмен – передаются только изменения параметров относительно поколения, полный набор требуется только при инициализации	Снижает нагрузку на сеть и вычислительные ресурсы, повышает быстродействие при большом числе рабочих мест
Устойчивость к разрывам – потеря действий не приводит к рассогласованию, потеря изменений компенсируется при следующем запросе	Сохраняет целостность моделирования при сбоях связи, повышает надежность тренажера
Детерминизм записи – самодостаточная запись слепок параметров, логирование действий, учет изменения шага) позволяет воспроизвести сеанс без участия ДИ	Обеспечивает объективный разбор (дебрифинг) занятий и аттестацию обучаемых
Расширяемость – плагинная архитектура для моделей и ДИ	Позволяет дополнять и расширять функциональность цифровых двойников без переработки ядра

Таблица 3 – Преимущества разработанной архитектуры ВМК



Рисунок 3 – Процесс отладки компьютерных учебно-тренировочных средств в АО «ИК «НЕОТЕК МАРИН»

Представленные технические решения также применяются в рамках опытно-конструкторских работ по созданию программного обеспечения учебно-тренировочных средств для 11 современных проектов кораблей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное развитие информационных технологий и вычислительных мощностей позволяет реализовать взаимосвязанное моделирование всех систем морского объекта в реальном времени. В АО «ИК «НЕОТЕК МАРИН» для этого сформирована целостная система понятий и решений – терминология, структура учебного цифрового двойника морского объекта, классификация моделей и архитектура вычислительно-моделирующего комплекса. Компанией создана и активно применяется технология производства компьютерных тренажеров морских объектов на базе платформы «НЕО ИНТЕЛЛЕКТ». Накопленный отечественной школой тренажеростроения задел и сформированная технологическая база служат основой для модернизации материально-технической базы подготовки специалистов ВМФ – задачи, поставленной Министром обороны Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Учреждение к бою по настоящему времени. 1708 г. // Воинские уставы Петра Великого / под ред. Н.Л. Рубинштейна; вступ. ст. и коммент. П.П. Епифанова. – М.: Тип. Библиотеки им. В.И. Ленина, 1946. – С. 60-63.

2. Выступление Министра обороны РФ на заседании экспертного совета по вопросам модернизации системы военного образования и подготовки офицерских кадров / пресс-служба Минобороны РФ// Вести.Ру.-2025.-8 июля. URL: https://www.vesti.ru/article/4584658 (дата обращения: 22.10.2026).

3. Выступление Министра обороны РФ на расширенном заседании коллегии Минобороны/ URL:http://kremlin.ru/events/president/news/78801 (дата обращения: 22.10.2026).

4. Захаров В.Л., Ильин В.А. Тренажеры военно-морского флота: создание и использование: монография. - Санкт-Петербург; Тверь: Центрпрограммсистем, 2019. – С. 247.

5. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. - М.: Российский институт стандартизации, 2021. – С. 10.

6. IEEE 1516-2025. IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) — Framework and Rules. – New York: IEEE, 2025.

7. Шигапов И.И., Пыльнев Ю.В., Бушуев В.В. Современные аспекты формирования интеллектуальных навыков офицеров по управлению борьбой за живучесть корабля и эксплуатацией технических средств // Морской сборник. 2025. № 7. – С. 49-57.

8. Пыльнев Ю.В., Кирюхин И.А., Новожилов Н.Ю. Цифровая трансформация тренажеров Военно-морского флота. Опыт практического применения современных информационных технологий // Морская наука и техника. Сборник «Итоги судостроения 2025». - 2025. – С. 58-61.