

ПОСТРОЕНИЕ СТЕНДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. Шафранюк, В.В. Прокопович (Санкт-Петербург)

Введение

Современные гидроакустические станции (ГАС) и комплексы являются сложными иерархическими системами обработки информации, предназначенными для освещения окружающей обстановки в акустическом диапазоне частот от единиц герц до десятков килогерц. Задача разработки таких комплексов и их совершенствование определяются не только общими тенденциями развития техники, но и появлением таких новых объектов как автономные необитаемые подводные аппараты, для которых подобные системы должны соответствовать более высоким требованиям, чем это было принято ранее.

Для решения этой задачи в ГАС используется значительное число гидроакустических антенн различной формы, работающих в различных диапазонах частот, а также высокопроизводительные средства обработки сигналов с выхода приёмных антенн, на которых располагается программное обеспечение (ПО) многоуровневой системы обработки информации. Обработка сигналов осуществляется в нескольких режимах работы, обусловленных особенностями шумоизлучения морских объектов различных классов.

На рис. 1 представлена схема обработки информации в ГАС на примере шумопеленгации [1, 2]. Данные в ГАС обрабатываются последовательно на нескольких уровнях. Формируемые в фазированной антенной решётке (ФАР) сигналы (временные выборки) с гидрофонов в оцифрованном виде поступают на вход задачи оценки пространственно-частотного спектра (ОПЧС). Оценка спектра производится на определённом периоде спектрального анализа (СА), который определяет периодичность работы ГАС и служит базовой временной единицей при имитации.

На основе пространственно-частотного спектра в задаче первичной обработки информации (ПОИ) формируется пеленгационный рельеф и производится обнаружение отдельных сигналов (отметок). В ряде случаев задачи оценки пеленгационного рельефа и обнаружения сигналов разделяют на задачи прединдикаторной обработки и собственно ПОИ. На уровне ПОИ завершается безинерционная цикловая обработка данных. В задаче вторичной обработки информации (ВОИ) производится межцикловая обработка и отдельные обнаружения связываются по временной координате. Кроме того, в ВОИ производится классификация источников звука.

Расположенными на вершине иерархической обработки являются задачи комплексной обработки информации (КОИ) и задача отображения результатов освещения окружающей и управления ГАС со стороны оператора. Задача КОИ при этом объединяет данные от нескольких каналов обработки данных ГАС или нескольких ГАС.

Основной идеей построения программных имитационных моделей (ПИМ) для отработки ГАС является многоуровневость модели для обеспечения исходными данными (включая обратную связь) всех уровней обработки информации на основе единой модели.

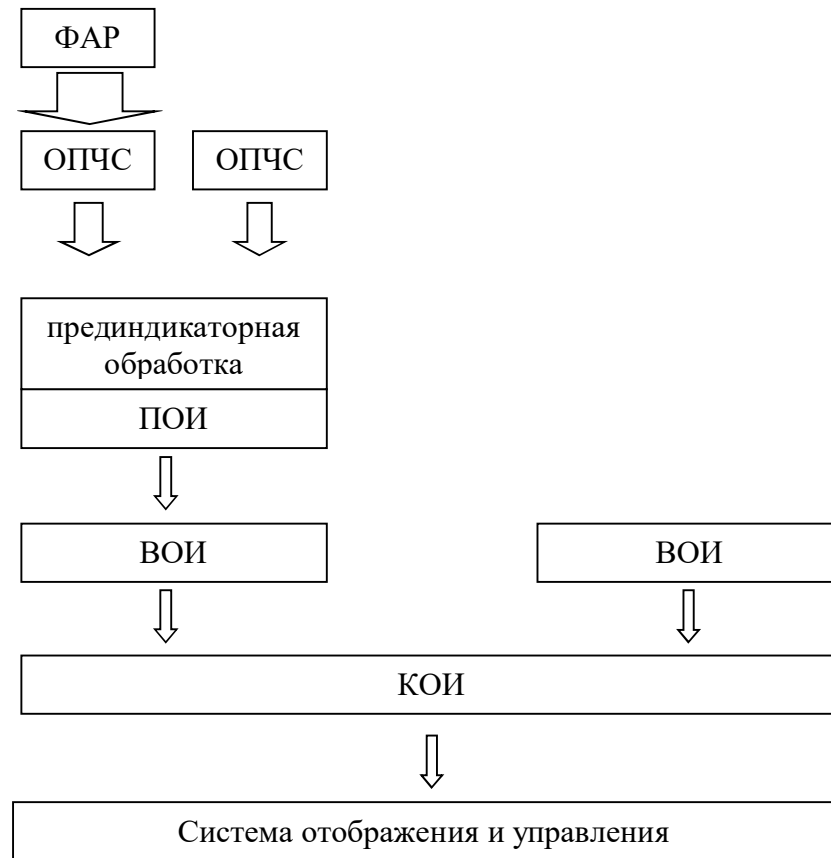


Рис. 1. Структура обработки информации в ГАС

Необходимо отметить, что разработку и особенно отладку алгоритмов функционирования ГАС нельзя представить без всестороннего их моделирования с использованием ПИМ, адекватно воспроизводящих входные данные для обрабатываемого уровня обработки в ГАС. Причём, такой подход имеет существенное экономическое преимущество над морской отработкой, несмотря на то, что в последней используются натурные данные, превосходящие адекватность моделирования.

Также отметим и иное превосходство модельных данных над натурными. Так, натурные данные получаются для конкретной акватории, либо их ограниченного количества, в то время как гидрологические условия и, соответственно, условия работы алгоритмов ГАС, существенно разнятся при изменении акватории. Таким образом обеспечить качественную работу алгоритмов в широком спектре акваторий (как для пространственно удалённых, так и в различные времена года) возможно исключительно при их отладке на ПИМ. В противном случае потребуется длительное время и значительные экономические затраты на сбор соответствующего объёма натурных данных.

Другим недостатком натурных данных является их узкая применимость, ограниченная конкретной ГАС, для которой они формировались, и данные эти будут непригодными для более сложных систем.

Целью настоящей статьи является описание основных подходов, использованных в разработке имитационных моделей и программно-аппаратного обеспечения многоуровневой ПИМ, позволяющей проводить моделирование произвольного числа

ГАС с произвольным набором средств наблюдения и их параметров, для произвольного числа целей и широкого круга акваторий.

Обзор существующих подходов

В настоящее время существует большое количество различных имитационно-моделирующих комплексов, решающих задачи имитационного моделирования применительно к ГАС, однако они имеют свои ограничения, представленные в таблице 1.

Основным недостатком существующих подходов является упрощённость моделей и отсутствие имитации входных данных для всех уровней обработки информации в ГАС.

Таблица 1. Существующие имитационные модели ГАС

ИМК	Ограничения
Задающие компенсаторы, имитирующие аналоговые сигналы на выходе датчиков антенной решетки.	Ограниченные возможности проверки алгоритмов и ПО уровней первичной обработки и выше
	Для проверок требуется большой комплект штатной аппаратуры
Модель интегрированной сетевидной системы освещения обстановки [3] и Онтомап-В2 [4].	Упрощенные модели приемных трактов и функционирования
	Выходные данные только верхних уровней обработки
Автономные тесты [5].	Разрабатываются под конкретный проект
	Отсутствие единых моделей входных воздействий
	Ограниченный перечень моделируемых эффектов
Тренажерные комплексы [6, 7].	Разрабатываются под конкретный проект
	Неполный объем моделируемых данных

Требования многоуровневой имитации входных данных в ГАС является критическим вследствие того, что разработка ГАС обычно производится «сверху-вниз» и, соответственно первой проектируется система отображения (как правило в рамках технического проекта). Соответственно по мере разработки ПО и аппаратуры ГАС требуемые для отладки входные данные «снижают» свой уровень. Таким образом, наличие только высокоуровневой имитации не позволит производить отладку программно-аппаратного обеспечения нижних уровней, а наличие только низкоуровневой имитации не даст возможности обеспечивать имитационную поддержку разработки до наступления последних этапов.

Рассмотрим возможные подходы к разработке ПИМ в рамках принятой классификации имитационных моделей [8-11].

В таблице 2 кратко приведены данные по существующей классификации.

Таблица 2. Существующие подходы к разработке моделей

Парадигмы имитационного моделирования.	Системная динамика
	Динамические системы
	Дискретно-событийное моделирование
	Мультиагентное (агентно-ориентированное) моделирование
	Гибридное моделирование
Подходы к разработке структуры модели.	Объектно-ориентированный подход
	Модельно-ориентированный подход (модельный синтез)
Подходы к синтезу моделей функционирования.	Императивный подход
	Декларативный подход
Подходы к представлению (описанию) модели.	Иерархический подход
	Сетевой подход
	Онтологический (реляционный) подход

В рамках обозначенной цели и существующих подходов к построению моделей можно сделать следующие замечания по построению ПИМ ГАС:

1. В силу пакетной обработки информации в ГАС с периодом СА наиболее подходящей парадигмой является дискретно-событийный подход. В этом случае модели функционирования соответствующих уровней ГАС будут работать по факту внешнего воздействия (таймера имитационного времени).

2. Использованный в ПИМ модельно-ориентированный подход, позволяет (в противовес объектно-ориентированному) формировать произвольные сочетания антенных решёток и способов обработки данных в ГАС, что обеспечивает большую гибкость и универсальность ПИМ.

3. С точки зрения подхода к синтезу собственно моделей ПИМ наиболее привлекательным является императивный подход. Однако он имеет ряд недостатков – узость применения (в виду разнообразия штатных алгоритмов ГАС), как правило высокие требования к производительности, сложность разработки. С другой стороны, декларативный подход имеет недостатком более низкую адекватность в сравнении с императивным. В рассматриваемом ПИМ используется смешанный способ построения моделей. Частично они сформированы декларативным методом, а частично императивным. При этом модели нижних уровней имеют больше императивной составляющей, а более высокого уровня – декларативной.

4. С учётом универсальности построения модели ГАС как набора отдельных моделей предпочтительно использование реляционного способа описания моделей. Именно он и лёг в основу описания моделей в ПИМ ГАС.

Далее описывается структура ПИМ, используемые модели и временная диаграмма работы.

Структура построения и основные модели ПИМ ГАС

Структура рассматриваемого ПИМ представлена на рис. 2.

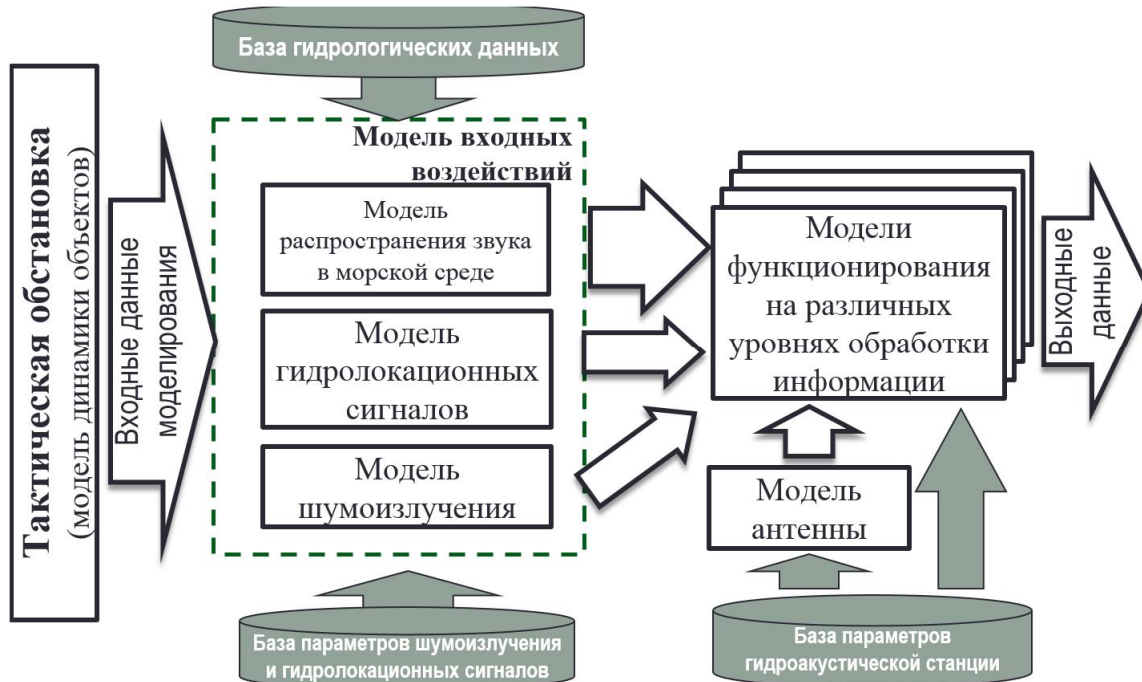


Рис. 2. Структура ПИМ

В основе ПИМ лежит модель гидроакустического волновода, представленная в лучевом приближении. Она отвечает за моделирование информационных для ГАС гидроакустических сигналов. Существует несколько способов расчёта передаточного коэффициента волновода:

- упрощённая модель, построенная в предположении прямолинейного распространения при равномерном распределении скорости звука по глубине;
- лучевая модель, рассчитываемая в двух вариантах:
 - интерполяционном, когда для каждого взаимного расположения источника и приёмника звука проводится приближённый расчёт на основе предварительных вычислений;
 - точная, когда каждый раз лучевая картина рассчитывается с нуля.

Расчёт волновода проводится с использованием параметров гидрологической базы данных.

Для имитации шумовых сигналов (например, от проходящего корабля), а также гидролокационных сигналов как биологического, так и естественного происхождения, используются соответствующие модели. Модели представлены как на императивном уровне (выходные данные: временная выборка), так и на декларативном в виде функционально связанных параметров шумоизлучения, позволяющих определить уровень шума в заданном диапазоне частот. Аналогичным образом построена другая ключевая модель ПИМ – модель шумоотражения, характеризующая поведение имитационных объектов в случае имитации гидролокации по отражённому сигналу. Для описания этих моделей, как впрочем, и параметров собственно имитируемого ГАС, используется реляционная база данных (БД).

Помимо БД параметры ПИМ задаются через конфигурационные файлы, что позволяет оптимизировать её работу для различных вариантов исполнения (способа расчёта гидроакустического волновода, параметров трактов ГАС и т.п.).

К собственно имитаторам различных уровней обработки информации в ГАС относятся следующие имитационные модели:

- модель приёмных каналов ФАР. Является императивной моделью и не может функционировать в режиме реального времени (требуется значительные вычислительные ресурсы); при этом модель является наиболее адекватной из всех существующих ввиду хорошей теоретической проработанности вопросов распространения сигналов в среде и их обнаружения ФАР;

- модели ПОИ, ВОИ и КОИ являются декларативными и могут формировать входные данные для соответствующих уровней обработки в ГАС; они достаточно легко реализуются в реальном времени и могут использоваться в различных комбинациях, работая независимо друг от друга.

Вышеприведённые модели работают в контексте модели антенной решётки, её расположения и частотных диапазонов, а также других специфических параметров обработки данных в тракте ГАС.

Для начала имитации в имитаторе тактической обстановки создаётся эпизод, в котором описывается взаимное движение всех имитируемых объектов (носителя ГАС, кораблей и т.п.). Собственно, в процессе работы имитатора формируются данные, на основе которых функционируют имитаторы выходных данных различных уровней ГАС. Причём, для декларативных имитаторов (начиная от имитатора ОПЧС и выше) возможно динамическое изменение в сценарии эпизода с соответствующей реакцией со стороны имитаторов.

Временная диаграмма работы ПИМ и её сопряжение с обрабатываемым программным обеспечением ГАС

Отметим, что при построении стенда отработки ГАС в части ПИМ требуют решения два вопроса:

- синхронизация имитационного времени и реального (в котором работают вычислители с обрабатываемым штатным программным обеспечением ГАС);
- преобразование данных из универсального формата ПИМ в формат протоколов взаимодействия штатного программного обеспечения ГАС.

Последний вопрос решается достаточно легко путём разработки шлюзов-конвертеров, которые получая по сети некоторые стандартизированные универсальные наборы выходных данных от соответствующих имитаторов ПИМ, преобразуют их в формат протоколов ПО ГАС.

Вопрос синхронизации имитационного и реального времени рассмотрим применительно к двум типам имитационных моделей: императивной модели приёмных каналов ФАР, работающей в камеральном времени, и декларативных моделей ПОИ и выше, работающих в реальном времени.

В случае модели ФАР выходные данные накапливаются в виде файлов на жёстких дисках, и выдача данных в реальном времени ложится на соответствующий шлюз, выход которого тактируется тактами процессора [7].

В результате точность соблюдения временной диаграммы достигает уровня одного пакета данных (см. рис. 3).

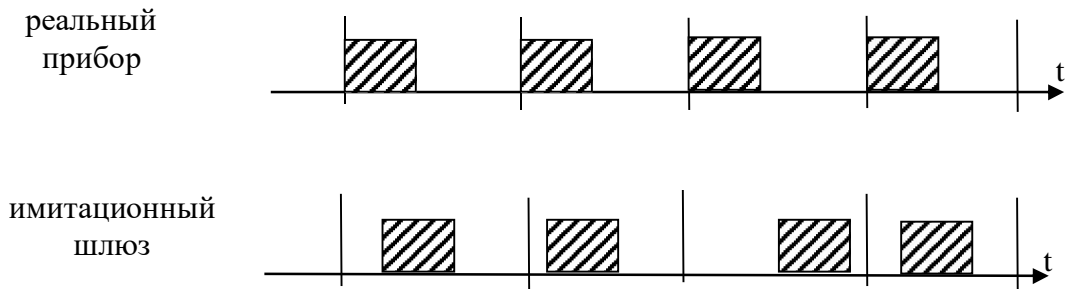


Рис. 3. Временная диаграмма шлюза камеральной имитационной модели
В случае работы имитационных моделей в реальном времени схема синхронизации несколько более сложная (см. рис. 4).

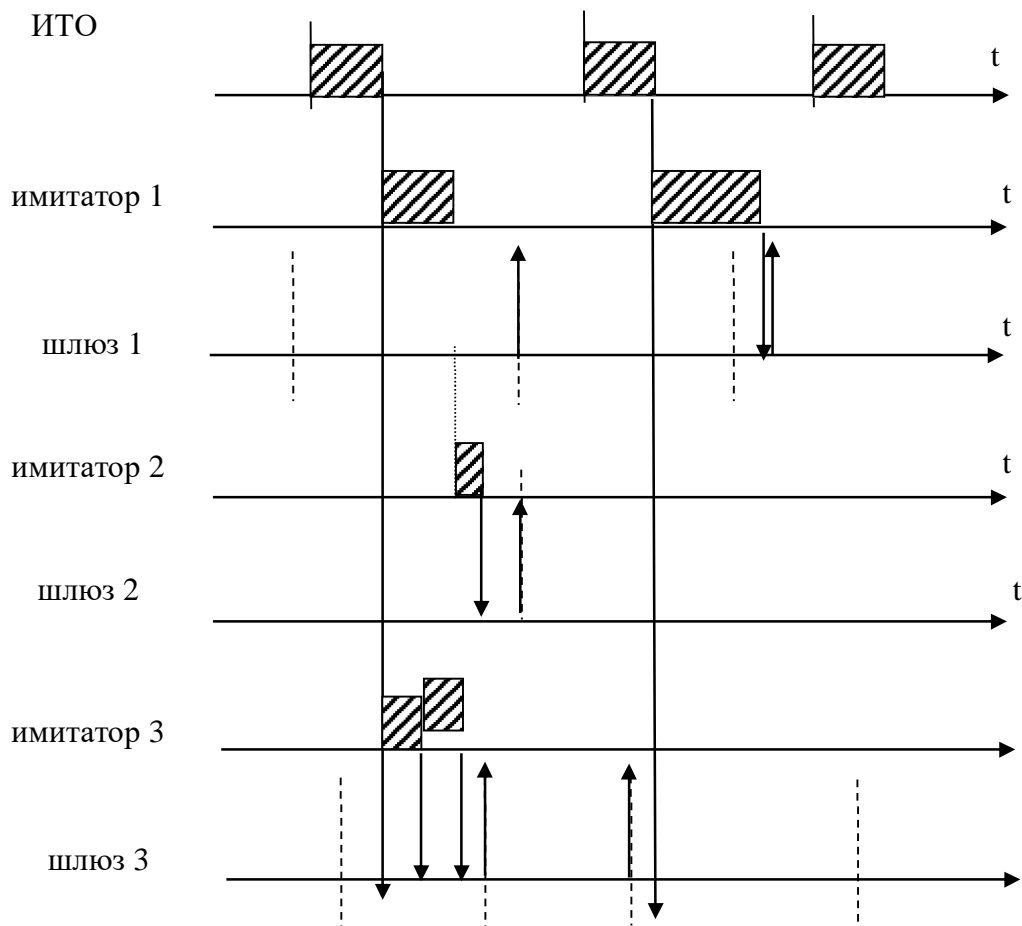


Рис. 4. Временная диаграмма имитационных моделей реального времени

Так, имитатор тактической обстановки работает с фиксированным шагом в 1 секунду, в то время как дискретизация по времени имитационных моделей может быть различной в зависимости от периода СА соответствующего тракта ГАС. В этом случае имитационные модели, работая по событийной схеме и обрабатывая входные воздействия, соблюдают лишь последовательность работы, но не реальное время, выполняя алгоритмы модели с максимально возможной скоростью. Причём, модель на одном периоде имитации тактической обстановки может обрабатывать несколько раз

(имитатор 3 на рис. 1), в случае если её период меньше 1 секунды и ни разу в противном случае.

Таким образом, имитационное время растягивается и сдвигается относительно реального для каждой модели индивидуально, по сложной схеме.

В свою очередь шлюзы, получая последовательность данных, обеспечивают периодичность их выдачи путём введения искусственных задержек, накапливая полученные данные во входном буфере. Если очередной блок данных пришёл с большей, чем требуемый период времени выдачи данных, задержкой, то он выдаётся немедленно.

На рис. 4 приведена временная диаграмма работы имитационных моделей в реальном времени, в которой имитатор 2 работает с использованием данных имитатора 1 (то есть по времени запускается после). Выдача данных на рис. 4 обозначена вертикальными стрелками. Вертикальными пунктирными стрелками обозначены требуемые периоды выдачи данных шлюзами.

Таким образом, главным условием корректной работы является выполнение в требуемой последовательности (в т.ч. параллельно) всех моделей необходимое число раз за период выдачи данных имитатором тактической обстановки.

Заключение

Опыт создания ГАС показал, что эффективность разработки, испытаний и использования ГАС по прямому назначению существенно повышается при наличии стенда сопровождения ГАС на предприятии-разработчике. Этот стенд должен включать ПИМ (как программно-аппаратный комплекс) сопрягаемый с обрабатываемым штатным программным и аппаратным обеспечением.

Такой стенд сопровождения ГАС на различных этапах ОКР может использоваться следующим образом:

- на этапе технического проектирования – для проверки закладываемых в проект технических решений;
- на этапе РКД – для разработки и отработки штатного ПО;
- на этапе стендовых испытаний – для подтверждения выполнения требований технического задания;
- на этапе морских испытаний – для приведения результатов испытаний к условиям технического задания;
- на этапе эксплуатации – для выяснения причин выявленной некорректной работы программного обеспечения;
- на этапе модернизации – для оценки эффективности предлагаемых новых технических решений.

На первых двух этапах, когда штатные средства и штатное ПО ГАС ещё не созданы, стенд сопровождения формируется из макета вычислителя и модельного ПО и называется стендом моделирования.

В дальнейшем ПО ПИМ и средства отображения и управления могут совместно использоваться для разработки тренажёра ГАС.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253)

Литература

1. **Брага Ю.А., Машошин А.И., Подшивалов Г.А.** Алгоритм информационной поддержки оператора гидроакустического комплекса подводной лодки // Морская радиоэлектроника, 2018, №3 (65). С. 8-12.

2. **Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В.** Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004.
3. Электронный ресурс: <https://ntbvt.ru/ontomur/#about>.
4. **Шафранюк Ю.В.** Имитатор сигналов на выходе приемных элементов в пассивной гидроакустической станции с гибкой протяженной буксируемой антенной // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012, Т.12, №4.
5. **Шахтарин Б.И., Вельтишев В.В.** Имитационные комплексы для подготовки операторов подводных аппаратов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2014.
6. **Базлов А.Ф., Рисунков В.Б., Соколов А.М.** Опыт разработки учебно-тренировочных средств для военно-морского флота // Программные продукты и системы. 2016.
7. **Бродский Ю.И.** Декларативная и императивная парадигмы программирования в описании поведения сложных распределенных имитационных моделей // Труды Международной суперкомпьютерной конференции. М: МГУ, 2012. С.82-87.
8. **Павлов А.И.** Разработка системы поддержки проектирования имитационных моделей сложных систем на основе декларативного метода описания агентов / А.И. Павлов, А.Б. Столбов // Труды конференции ИММОД–2015.
9. **Бродский Ю.И.** Модельный синтез и модельно-ориентированное программирование // М.: ВЦ РАН, 2013, 142 с.
10. **Паршикова Е.А.** Имитационное моделирование управления в групповой робототехнике на основе многоагентного подхода: Методические указания к практическим занятиям. Сост.: Паршикова Е.А.. М., 2014. 32 с. Под редакцией Карповой И.П.
11. **Шафранюк А.В.** Опыт отработки гидроакустического комплекса на стенде сопровождения изделия // В сборнике: Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. Труды XV Всероссийской конференции. 2020. С. 511-514.