

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ЕГО СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

Л. А. Мартынова, А. О. Пронин, Г. А. Подшивалов, В. В. Прокопович,
Н. И. Горбачев (Санкт-Петербург)

Введение

Новые современные решения в области морской робототехники [1], как никакой другой, требуют предварительного математического имитационного моделирования, так как проведение натурных испытаний сопряжено с большими трудностями, связанными с экономическими затратами и существенным влиянием условий проведения испытаний и среды на полученные результаты. Поэтому уже на начальных этапах проектирования автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) целесообразно математическое и особенно - имитационное моделирование его функционирования при выполнении маршрутного задания.

Одной из задач, требующих имитационного моделирования, является разработка и тестирование алгоритмов управления техническими средствами АНПА и его системы управления. Наиболее сложными в управлении техническими средствами являются маршевый движительно-рулевой комплекс (МДРК) и подсистема энергообеспечения (ПЭО). Управление техническими средствами осуществляет система управления АНПА, основанная на мультиагентной основе [2], по данным, поступающим от технических средств, от навигационной подсистемы (НП), подсистемы освещения обстановки (ПОО), подсистемы контроля выполнения маршрутного задания. В связи с этим имитационная модель, предназначенная для разработки и тестирования алгоритмов управления, должна обеспечивать возможность имитации работы как отдельных подсистем АНПА, так и системы управления АНПА и функционирования АНПА в целом.

Разработанные ранее математические модели функционирования АНПА, например [3], не учитывали в совокупности детальные алгоритмы управления техническими средствами в сочетании с динамической моделью движения АНПА, особенности МДРК рассматриваемого АНПА и особенности гибридной ПЭО ввиду новизны данного технического решения [1].

В связи с этим целью работы явилась разработка имитационной модели функционирования систем АНПА для отработки алгоритмов управления техническими средствами и алгоритмов системы управления, а также - оценка устойчивости системы управления с учетом конкретных особенностей функционирования разрабатываемого АНПА.

1. Структура имитационной модели

Имитационная модель воспроизводит работы основных подсистем АНПА: навигационной подсистемы, подсистемы освещения обстановки, подсистемы энергообеспечения, работы МДРК. Структура основных систем, имитационные модели которых разработаны, представлена на рисунке 1.

Формируемые в результате имитации данные передаются в имитационную модель работы системы управления, основанную на мультиагентной архитектуре [2].

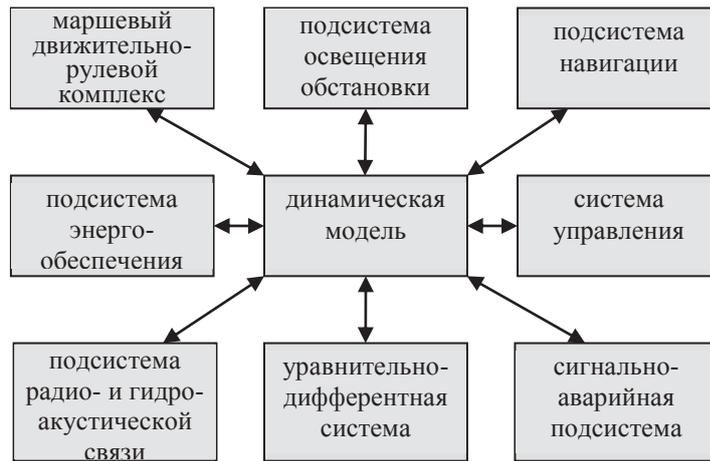


Рис. 1. Структура имитационной модели

Формирование данных подсистемами основано на движении АНПА, которое моделируется с использованием динамической модели движения АНПА.

2. Описание имитационных моделей отдельных подсистем АНПА

Имитационная модель МДРК предназначена для определения задействованных элементов МДРК, обеспечивающих движение АНПА заданными курсом и скоростью. По данным, поступившим от подсистемы выполнения маршрутного задания, навигационной подсистемы или подсистемы освещения обстановки формируются параметры движения АНПА, по которым определяются необходимые элементы МДРК (двигатель, рули, подруливающие устройства) и их параметры (число оборотов вращения, угол перекладки руля).

Имитационная модель работы ПОО основана на формировании зоны обзора веером расходящихся лучей заданной дальности из точки положения антенны ПОО. Такое формирование множества отрезков позволяет оценивать обнаружение объекта с разных направлений и геометрию попадания объекта в зону обзора средства освещения обстановки. Такой подход обеспечивает получение необходимых параметров о препятствии для принятия решения о его обходе (рисунок 2).

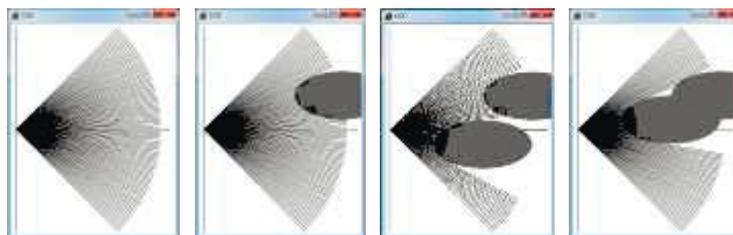


Рис. 2. Положение лучей зоны обзора ПОО при обнаружении препятствий.

Слева направо: при отсутствии препятствий, при обнаружении одиночного препятствия, при обнаружении двух препятствий без затенения и с затенением

Результаты моделирования обнаружения препятствий передаются в систему управления АНПА. По этой информации в системе управления принимается решение о траектории, обеспечивающей обход препятствий.

Имитационная модель навигационной подсистемы формирует три вида координат: заданные координаты маршрутного задания, координаты АНПА с отклонением от маршрутной траектории в связи с уходом точности бортовой

инерциальной навигационной системы с течением времени, координаты фактического положения АНПА.

Имитационная модель гибридной ПЭО основана на разностных уравнениях состояния запаса реагентов криогенного хранилища (КХ) и заряда литий-ионной аккумуляторной батареи (ЛИАБ). Текущее состояние КХ $E_{КХi}$ в i -ом такте имитации длительностью Δt описывается выражением:

$$E_{КХi} = E_{КХi-1} - E_{\text{ЭХГ}1}^1 - E_{\text{ЭХГ}2}^2 \text{ при } E_{КХi} \geq E_{КХ\text{min}},$$

где

$E_{\text{ЭХГ}1}^1$ – ресурс КХ, потребляемый электрохимическим генератором (ЭХГ) 1;

$E_{\text{ЭХГ}2}^2$ – ресурс КХ, потребляемый ЭХГ 2;

$E_{КХ\text{min}}$ – минимально допустимый запас КХ.

В зависимости от зарядно-разрядного характера процесса уравнения состояния ЛИАБ в общем случае имеет вид:

$$E_{\text{ЛИАБ}i} = E_{\text{ЛИАБ}i-1} - \Delta E_{\text{МДРК}i}^{BC} + \Delta E_{\text{ЭХ}i},$$

где $\Delta E_{\text{МДРК}i}^{BC}$ – удельный разряд ЛИАБ при расходе на МДРК;

$\Delta E_{\text{ЭХ}i}$ – удельный заряд ЛИАБ после саморазряда ЛИАБ или разряда ЛИАБ при движении в высокоскоростном режиме.

В ходе движения АНПА в ПЭО постоянно происходит оценка достаточности оставшегося энергоресурса для выполнения маршрутного задания с учетом текущего расхода энергоресурса при текущем скоростном режиме. Если остаток близок к критическому, то происходит снижение энергопотребления АНПА до минимально возможного.

Имитационная модель системы управления АНПА реализует: алгоритм обхода препятствия и расхождения АНПА с подвижными объектами, алгоритм восстановления АНПА на маршрутной траектории, алгоритм принятия решения относительно выбора элементов МДРК для совершения маневров, алгоритм разрешения конфликта между агентами мультиагентной системы управления АНПА, возникающего при необходимости использования энергоресурса, алгоритм рационального распределения энергоресурса между потребителями.

Центральным ядром имитационной модели является динамическая модель пространственного движения АНПА, построенная на базе системы дифференциальных уравнений, имеющих в нормальной форме Коши следующий вид:

$$\frac{dv_i}{dt} (M + M_{np}) = \sum F_i; \quad \frac{d\omega_i}{dt} (J + J_{np}) = \sum M_i,$$

где M – масса АНПА, тс·с²/м;

M_{np} – присоединенные массы воды, тс·с²/м;

v_x, v_y, v_z – проекции (составляющие) вектора скорости АНПА на оси связанной системы координат, м/с;

$\sum F_i$ – сумма всех сил, действующих на АНПА, тс;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора угловой скорости АНПА, с⁻¹;

$\sum M_i$ – сумма моментов всех сил, действующих на АНПА относительно осей связанной системы координат, тс·м;

t – время.

Разработанная имитационная модель объединяет все описанные математические модели отдельных подсистем АНПА и их программные реализации. Обмен данными между программами отдельных подсистем АНПА и его системой управления осуществляется по согласованным протоколам информационно-технического взаимодействия.

Имитационная модель масштабируема, может быть расширена путем добавления имитационных моделей других подсистем АНПА и путем увеличения степени детализации математических моделей отдельных подсистем АНПА.

3. Оценка устойчивости системы управления

Разрабатываемая система управления АНПА должна быть устойчива к возникающим отказам устройств той или иной подсистемы АНПА. Устойчивость в данном случае означает способность системы управления переложить выполнение функционала отказавшего средства на альтернативные средства – либо резервные, либо способные выполнять аналогичный функционал, пусть и со снижением качества. Цель такого перераспределения, называемого реконфигурацией, – как можно дольше поддерживать жизненно важные устройства АНПА в работоспособном состоянии. Устойчивость системы управления определяется ее способностью сохранять работоспособность АНПА в течение всего периода выполнения маршрутного задания и характеризуется показателем устойчивости, в качестве которого выбрана вероятность способности АНПА преодолеть заданный маршрут в пределах заданного периода времени.

Для оценки устойчивости системы управления определены наиболее значимые средства АНПА, требующие в случае их отказа замены на альтернативные, определены возможные отказы в устройствах АНПА и проведена оценка возможности компенсирования их функционала другими средствами путем реконфигурации для того, чтобы снизить возможность возникновения аварийной ситуации.

Во время функционирования АНПА отказ устройства разыгрывался равновероятно среди активно задействованных устройств. Кроме того, случайным образом разыгрывались режимы движения АНПА по скорости, в том числе и при переходе в высокоскоростной режим и обратно, маневр по глубине, маневр по курсу.

С использованием разработанной имитационной модели и ее программной реализации проведены исследования, которые включали в себя два этапа.

На первом этапе рассматривались варианты различной степени реконфигурации подсистем АНПА в случае отказа одного из устройств. Рассмотрено три варианта реконфигурации: отсутствие реконфигурации, частичная реконфигурация и полная реконфигурация. Численный эксперимент проводился для различных значений времени выполнения маршрутного задания; время выполнения маршрутного задания изменялось от 20 до 80 тактов имитации с интервалом 20 тактов. Под тактом имитации в данном случае понимается временной интервал между моментами времени, в которые происходит оценка состояния устройств и подсистем АНПА, анализ ситуации, принятие решения и выдача управляющих команд.

На втором этапе исследований оценивалось влияние безотказности работы устройств АНПА на успешность выполнения маршрутного задания. Для этого рассматривались варианты отказов, характеризуемых пороговым значением, которое определялось надежностью каждого устройства.

Результаты исследований, приведенные на рисунке 3, показали, что:

1) С увеличением времени выполнения маршрутного задания вероятность его выполнения снижается - для любой степени безотказности. В то же время при более высокой степени безотказности снижение вероятности близко к линейной зависимости, в то время, как при низкой безотказности снижение носит ярко выраженный

нелинейный характер, резко снижаясь уже на начальных этапах выполнения маршрутного задания (рисунок 3 слева).

2) Безотказность отдельных устройств оказывает влияние на вероятность преодоления заданного маршрута. Так, например, если принять, что допустимая вероятность преодоления заданного маршрута равна 0,5, то из приведенных на рисунке 3 результатов видно, что эта вероятность обеспечивается при безотказности 0,5 лишь в течение 50 тактов, а при безотказности 0,7 - в течение 70 тактов (рисунок 3 справа).

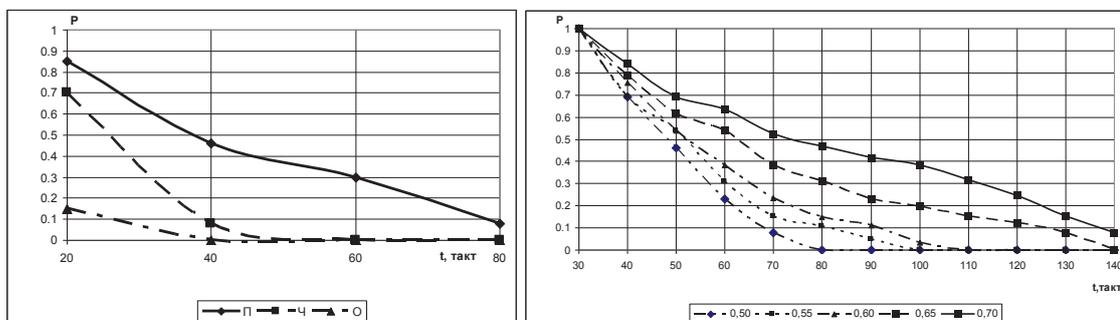


Рис. 3. Результаты численного эксперимента
(П – полная реконфигурация, Ч – частичная реконфигурация только в ПЭО,
О – отсутствие реконфигурации)

Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке и проектировании АНПА в качестве основы для формирования требований к безотказности работы отдельных устройств, а также для тестирования алгоритмов реконфигурации используемых устройств, расширения спектра реконфигурируемых устройств.

Разработанная имитационная модель может быть использована на предварительных этапах исследований для выявления причинно-следственных связей, координации функционирования отдельных подсистем. Результаты моделирования позволяют разработать рекомендации разработчикам АНПА по выбору алгоритмов управления техническими средствами.

Литература

1. **Апполонов Е.М., Бачурин А.А., Горохов А.И., Пономарев Л.О.** О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата // Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону – Таганрог, ЮФУ. 2018. С.34-42.
2. **Мартынова Л.А., Машошин А.И.** Построение системы управления автономных необитаемых подводных аппаратов на базе мультиагентной технологии // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2 (175). С. 38-48.
3. **Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В.** Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017), 18-20 октября 2017 г., Санкт-Петербург.