

ОСОБЕННОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

**Н.К. Киселев (Нижний Новгород), Л.А. Мартынова, Г.В. Конюхов,
Н.Г. Воронина, А.И. Стариков, Г.А. Подшивалов, Н.И. Горбачев
(Санкт-Петербург)**

Введение. В настоящее время развитие техники и технологий позволяют разработать автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА), способные преодолевать значительные расстояния в широком диапазоне скоростей [1]. Для движения АНПА в течение длительного времени используют гибридную систему энергообеспечения, включающую в свой состав разнородные источники электроэнергии, работающие на различных физических принципах. В электросети, соединяющей потребителей с источниками электроэнергии токопроводами, для формирования электроэнергии с параметрами, соответствующими параметрам потребления, используют дополнительное оборудование: распределительные щиты (РЩ), многоканальные преобразователи напряжения (МПН), ключи. Ключи позволяют оперативно, в зависимости от уровня потребления, подключать/отключать дополнительное оборудование и блоки электросети. Для минимизации потерь электроэнергии в электросети требуется согласованное подключение/отключение оборудования электросети с движением АНПА. Согласованное подключение / отключение обеспечивается алгоритмами управления оборудованием электросети.

Поскольку при длительном движении АНПА в широком диапазоне скоростей заранее предусмотреть все скоростные режимы и переходные процессы невозможно из-за непредвиденных препятствий, отклонений от маршрутной траектории, прохода узкостей и т.д., то имитационное моделирование движения АНПА и синхронной с ним работы электросети является единственным способом формирования и тестирования алгоритмов управления электросетью. В этом заключается первая особенность имитационного моделирования.

Для формирования алгоритмов управления электросетью, тесно связанных с движением АНПА с переменными параметрами – курсом, скоростью, глубиной, необходимо было использовать систему имитационных моделей, воспроизводящих согласованные процессы движения, потребления электроэнергии и работы электросети.

Имеющиеся пакеты имитационного моделирования, предназначенные для имитации движения АНПА (ROS) [2], работы электросетей (AnyLogic) [3], функционирования источников электроэнергии (ANSYS) [4], имитации физических процессов (MatLab [5], SimInTech [6]), не могли быть использованы в полной мере ввиду трудностей при стыковке результатов их работы между собой, несоответствия степени детализации имитируемых процессов, использования алгоритмов, не соответствующих рассматриваемому АНПА и его электросети.

Целью работы явилась разработка системы имитационных моделей движения АНПА и отдельных его подсистем для решения задач разработки алгоритмов управления электросетью, обеспечивающих минимизацию потерь.

1. Постановка задачи

Рассматривается движение АНПА с переменными курсом, скоростью, глубиной. От скорости и направления движения АНПА зависит потребляемая энергия маршевым движительно-рулевым комплексом (основным потребителем) и остальными подсистемами АНПА. В электросети АНПА имеется три распределительных щита, на каждом из которых предусмотрено по 8 ключей, два преобразователя напряжения с

четырьмя каналами в каждом. Алгоритмы управления электросетью обеспечивают подключение потребителей к токопроводам с использованием дополнительного оборудования таким образом, чтобы все потребители были обеспечены электроэнергией с минимальными ее потерями. Для оценки потребления электроэнергии и оценки ее потерь необходимо разработать имитационную систему, включающую в себя имитационную модель движения АНПА, модель изменения положения АНПА под действием сил и моментов, создаваемых исполнительными механизмами - винтами и рулями, модель функционирования исполнительных механизмов, обеспечивающих движение АНПА и являющихся потребителями электроэнергии, имитационную модель работы электросети.

2. Общий подход к решению задачи

Для разработки имитационной системы, руководствуясь идеями академика Н.Н. Моисеева [7] и П. Девиса [8], прежде всего, была определена необходимая степень детализации имитируемых процессов.

Для оценки потерь электроэнергии в процессе движения АНПА необходима имитация следующих различных процессов:

- движение АНПА в морской среде с различными параметрами: курсом, скоростью, глубиной;
- пространственное положение АНПА в воде как тело, погруженное в жидкость;
- функционирование исполнительных механизмов (рулей, винтов), обеспечивающих движение АНПА в морской среде с различными параметрами; оценка потребляемой электроэнергии исполнительными механизмами;
- функционирование электросети АНПА и ее оборудования - распределительных щитов, многоканальных преобразователей, коммутационных ключей.

Степень детализации воспроизводимых процессов определялась из условий чувствительности результата моделирования к входным параметрам и соответствия результатов моделирования целям моделирования. Выбор степени детализации основывался на использовании теории интегрированного иерархического моделирования с изменяемым разрешением, в соответствии с которой модель $\{M\}$ каждого моделируемого процесса характеризовалась:

- фазовыми величинами, описывающими состояние объекта $\{X\}$;
- вектором компонент управления $\{U\}$;
- вектором внешних величин $\{K\}$.

В общем виде модель может быть представлена выражением: $M = M\{X, U, K\}$.

В этом заключается вторая особенность имитационного моделирования.

При формировании системы имитационных моделей взаимосвязь моделей обеспечивалась тем, что управление U в модели более высокого уровня являлось параметром фазового состояния модели более низкого уровня. Кроме того, особенностью модели самого низкого уровня явилось то, что наряду с параметрами, оказывающими влияние на моделирование движения АНПА, в множество параметров фазового состояния были включены параметры энергопотребления, которые, в свою очередь, являлись параметрами управления оборудованием электросети.

Имитация процессов в имитационной системе осуществлялась путем пересчета положения АНПА, параметров исполнительных механизмов и состояния электросети в каждом такте имитации.

3. Имитационная модель движения АННА

В имитационной модели движения АННА объектом моделирования являлся АНПА, представляемый материальной точкой.

Параметрами фазового состояния АНПА являлись: текущие координаты АНПА ξ, ζ, η и текущее удельное энергопотребление q .

Параметрами управления являлись скорость АНПА v (проекция на оси связанной системы координат v_x, v_y, v_z).

Внешними величинами являлись заданные параметры движения – курс, скорость, глубина.

Имитационная модель основана на определении пространственных координат АНПА в абсолютной системе координат, определяемых математической моделью [9]:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = v_x \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi + v_y \cdot (\sin \theta \cdot \sin \varphi - \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi) + \\ + v_z \cdot (\cos \theta \cdot \sin \varphi + \sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi) \\ \dot{\zeta} = -v_x \cdot \cos \psi \cdot \sin \varphi + v_y \cdot (\cos \varphi \cdot \sin \theta + \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \psi) + \\ + v_z \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \theta - \sin \varphi \cdot \sin \psi \cdot \sin \theta) \\ \dot{\eta} = v_x \sin \psi + v_y \cdot \cos \psi \cdot \cos \theta - v_z \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta \end{cases}$$

где ψ – дифферент, φ – курс, θ – крен, α – угол атаки, β – угол дрейфа, которые определяются с использованием проекций угловых скоростей.

Управление v определялось с использованием имитационной модели более низкого уровня детализации – математической моделью динамического положения АНПА.

4. Имитационная модель динамического положения АНПА

В имитационной модели динамического положения АНПА объектом моделирования являлся корпус АНПА, как тело, погруженное в жидкость, с учетом геометрии АНПА.

Параметрами фазового состояния являются проекции линейных и угловых скоростей.

Параметрами управления являются силы и моменты, оказывающие влияние на корпус АНПА, как тело, погруженное в жидкость.

Имитационная модель основана на математической модели пространственного движения объекта, которая содержит традиционными 6-ю уравнениями Эйлера и имеет вид в нормальной форме Коши:

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

где M – масса аппарата, тс·с²/м; M_{np} – присоединенные массы воды, тс·с²/м; v_i – проекции (составляющие) вектора скорости на оси связанной системы координат, м/с, $i = \{x, y, z\}$; $\sum F_i$ – суммы проекций всех сил, действующих на объект, на оси связанной системы координат, тс;

J_i – моменты инерции массы относительно главных осей, проходящих через центр тяжести полного подводного объема, тс·м·с², $i = \{x, y, z\}$;

J_{np} – моменты инерции, создаваемые присоединенными массами;

$\sum M_i$ – суммы моментов всех сил, действующих на объект относительно осей связанной системы координат, тс·м.

Параметрами управления – силы и моменты – определяются исполнительными механизмами – рулями и винтами – их составом и параметрами. Для винтов маршевого

двигателя и подруливающих устройств параметром является скорость вращения (об/мин). Для рулей параметром является угол перекадки руля (град).

Определение указанных параметров исполнительных механизмов происходит в имитационной модели более низкого уровня с большей степенью детализации - в модели создаваемых сил и моментов.

4. Имитационная модель создаваемых сил и моментов

Объектом моделирования является АНПА – винты и рули.

Параметрами состояния являются текущие силы и моменты, создаваемые используемыми рулями и винтами.

Параметрами управления являются состав исполнительных механизмов и текущие значения скорости вращения винтов и углов перекадки рулей.

Внешними параметрами являются углы атаки, дрейфа, геометрии корпуса.

Уравнения расчета сил Te и моментов Me , определяемых МД и ВПУ, в общем виде имеет вид [10]:

$$Te = 2\pi \frac{K_2 \rho n_{ГВ}^3 D_{ГВ}^5}{V} \quad Me = Te \cdot e$$

где e – расстояние по высоте от ЦТ до плеча силы тяги маршевого движителя МД; $n_{ГВ}$ – числа оборотов гребного винта, V – скорости набегающего потока жидкости, ρ – плотности воды, $D_{ГВ}$ – диаметр гребного винта, K_2 – формирующий коэффициент момента винта.

Сила и моменты, создаваемые рулями, определяется выражениями:

$$\sum F_i = \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \cdot (c_i^{\delta_{НГР}} \cdot \delta_{НГР} + c_i^{\delta_{КР}} \cdot \delta_{КР})$$

$$\sum M_i = \frac{\rho v^2}{2} V \cdot (m_i^{\delta_{НГР}} \cdot \delta_{НГР} + m_i^{\delta_{КР}} \cdot \delta_{КР})$$

где c_i – проекции продольной, нормальной и боковой силы; m_i – коэффициенты момента крена, дифферента и рыскания.

5. Имитационная модель исполнительных механизмов

Объектом моделирования является разность между текущими параметрами движения АНПА и заданными (целевыми).

Параметрами управления является состав исполнительных механизмов, который определяется, исходя с использованием ПИД-регуляторов на основе разностей между текущими значениями и заданными (целевыми) по курсу, скорости, глубине АНПА. В результате вырабатываются требуемые силы и моменты, обеспечивающие целевые параметры движения АНПА. В зависимости от скорости движения АНПА определяется состав исполнительных механизмов и текущие значения скорости вращения винтов и углов перекадки рулей.

По результатам определения состава исполнительных механизмов и текущих значений скорости вращения винтов и углов перекадки рулей определяется удельное энергопотребление электроэнергии q , необходимой на функционирование АНПА и его движение с заданными параметрами с использованием винтов и рулей.

Полученные значения энергопотребления используются в качестве параметров состояния в имитационной модели работы электросети гибридной системы энергообеспечения АНПА.

6. Имитационная модель работы электросети гибридной системы энергообеспечения АНПА

Объектом моделирования является электросеть АНПА.

Параметрами состояния являются потребление электроэнергии q и потери электроэнергии в сети.

Параметрами управления являются состав задействованного оборудования – РЩ, МПН, ключей – и их параметры.

Состав задействованного оборудования – РЩ, МПН, ключей – и их параметры определяются по результатам моделирования РЩ и МПН.

7. Имитационная модель работы РЩ и МПН

Объектами моделирования являются РЩ и МПН.

Пространство состояний секций распределительных опишем вектором:

$$DS_i = [PwrOn, St_{ds}, U1, U2, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8]^T,$$

где

$PwrOn$ – состояние подачи напряжения питания управляющего контроллера (включено/выключено);

$StDS$ – вектор состояния распределительной секции;

$U1$ – значение напряжения по входу 1 (приборное питание В);

$U2$ – значение напряжения по входу 2 (силовое питание), В;

$S1...S8$ – вектор состояния (включен/выключен).

Пространство состояний МПН опишем вектором:

$$CV_i = [CB, CV_{L1}, CV_{L2}, CV_{L3}, CV_{L4}, CV_U, BM, Def]^T,$$

где

CB – вектор состояния субблока управления и общих параметров МПН,

$CV_{L1}, CV_{L2}, CV_{L3}, CV_{L4}$ – вектор состояния субблоков преобразования (СП);

BM – вектор состояния субблока СКБ - коммутации и заряда аварийного и резервного модулей ААБ;

Def – обобщенный вектор неисправностей МПН.

Параметрами управления являются положения ключей РЩ (замыкание/размыкание) и задействованные каналы МПН.

Алгоритмы управления состоянием оборудования гибридной СЭО основаны на формировании такого положения ключей, при котором все потребители были бы обеспечены электроэнергией, и при этом потери электроэнергии были бы минимальными.

Таким образом, третьей особенностью являлось моделирование работы электросети, состоящей из токопроводов, распределительных щитов и многоканальных преобразователей, и имитация работы распределительных щитов и многоканальных преобразователей, обеспечивающая формирование ограничения на управление электросетью.

8. Результаты применения системы имитационных моделей

Применение разработанной системы имитационных моделей было направлено на оценку работы электросети на наиболее энергоемком разгонном участке движения АНПА с одновременным заглублением. При разгоне резко возрастает расход электроэнергии, потребляемой маршевым двигателем. Для этого задавалась скорость, до которой должен был разогнаться АНПА, и анализировалось текущее состояние электросети – положение переключателей, подключение распределительных щитов и многоканальных преобразователей. Значения целевой скорости, до которой АНПА должен был разогнаться, принимались от $0,5 V_{ЭК}$ до $V_{ВС}$ (здесь $V_{ЭК}$ и $V_{ВС}$ – некоторые номинальные значения скоростей АНПА в режиме экономичного хода и в высокоскоростном режиме).

Результаты численного эксперимента представлены на рисунке 1.

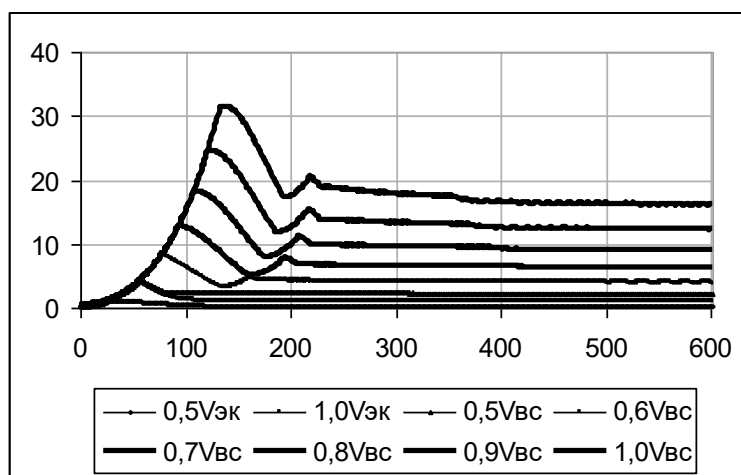


Рис. 1 – Изменение расхода электроэнергии на разгонном участке траектории

Анализ результатов показал зависимость изменения потребляемой электроэнергии с увеличением скорости, до которой происходил разгон. Это привело к необходимости реконфигурирования сети и по мере увеличения потребляемой электроэнергии - подключению дополнительных каналов МПН, блоков электросети, второго МПН.

По результатам моделирования выявлено следующее.

При ускорении до незначительных скоростей – в пределах скорости экономичного хода, как видно из рисунка 1, потребляемая мощность составила 0,6 нормированных единиц (далее – н.е.), конфигурация сети имела вид 1 РЩ, 1 МПН. Вырабатываемая энергия при этом составила 40 н.е., потери составили 0,04 н.е.

С увеличением скорости до половины форсажной, как видно из рисунка 1, потребляемая мощность составила 12 н.е., в результате чего используемого в электросети оборудования оказалось недостаточно, в связи с чем потребовалось задействование дополнительного РЩ. В результате оказалось, что вырабатываемая мощность составила 70 нормированных единиц, а потери – 2 н.е.

С увеличением до форсажной – энергопотребление составило 90 н.е., поэтому потребовалось н.е., а потери – 10 н.е.

Заключение

Результаты исследований показали правильность выбора стратегии имитационного моделирования и правильность выбора степени детализации имитируемых процессов, позволили оценить энергопотребление в переходные периоды смены параметров движения, оценить правильность работы алгоритмов управления электросетью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-08-00130.

Литература

1. **Апполонов Е.М., Бачурин А.А., Горохов А.И., Пономарев Л.О.** О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата // Сб. материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Ростов-на-Дону – Таганрог: ЮФУ, 2018. С. 34-42.
2. ROS. Официальный сайт. Электронный ресурс / <https://www.ros.org/> (Дата обращения 07.05.2021).
3. AnyLogic Официальный сайт. Электронный ресурс <https://www.anylogic.com/> (Дата обращения 07.05.2021).

4. ANSYS официальный сайт. Электронный ресурс <https://www.ansys.com/products/electronics>. (Дата обращения 07.05.2021).
5. MatLab официальный сайт. Электронный ресурс <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (Дата обращения 07.05.2021).
6. SimInTech официальный сайт. Электронный ресурс <https://simintech.ru/>(Дата обращения 07.05.2021).
7. **Моисеев Н.Н.** Алгоритмы развития. 1987. М.: Наука. 350 с.
8. **Davis P.K.** Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling // Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. P. 293-302.
9. **Васильев К.К., Гурман Д.А.** Моделирование алгоритмов навигации и управления для автономных необитаемых подводных аппаратов // Автоматизация процессов управления. 2013. № 3 (33). С. 27-31.
10. **Войткунский Я.И.** Справочник по теории корабля. Л.: Судостроение. 1985. Т. 1. 764 с.