

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Н.К. Киселев (Нижний Новгород), Л.А. Мартынова (Санкт-Петербург)

Введение

В настоящее время появление новых технологий привело к бурному развитию автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА), предназначенных для решения широкого круга задач в морской среде, связанных с преодолением сверхдальних расстояний [1] для океанографических исследований, сейсморазведки [2], обследования кабельных трасс и трубопроводов, поиска затонувших объектов, охраны акватории.

Для обеспечения движения АНПА в различных скоростных режимах в течение длительного времени современные АНПА оснащают гибридной системой энергообеспечения (СЭО) [3], включающей в себя разнородные источники электроэнергии, работающие на различных физических принципах. В процессе движения АНПА синхронно со сменой скоростных режимов меняется источник электроэнергии, состав потребителей и объем потребляемой ими электроэнергии. В результате этого возникают нелинейные переходные процессы расхода энергоресурса и связанные с этим нелинейные процессы в работе гибридной СЭО. Эффективное функционирование гибридной СЭО обеспечивается за счет согласованного с движением управления оборудованием электросети – распределительными щитами (РЩ) и многоканальными преобразователями напряжения (МПН) [4, 5]. Для тестирования алгоритмов управления необходимо проведение специальных исследований, направленных на оценку эффективности гибридной СЭО с целью определения соответствия ее работы требуемым условиям, предъявляемым к энергетическим системам, и с целью получения количественных оценок критерия выбора наиболее эффективной гибридной СЭО. Этим определяется актуальность рассматриваемого направления. Поскольку проведение для этого натуральных экспериментов с прототипом АНПА является чрезмерно затратным мероприятием, связанным с выходом в море, использованием судна сопровождения, ожиданием подходящих погодных условий для безопасного проведения испытаний и т.д., то альтернативным вариантом является использование имитационного моделирования [6, 7, 8] движения АНПА и согласованного с ним управления гибридной СЭО. Ввиду новизны использования гибридной СЭО в морской робототехнике публикации по разработке имитационной модели оценки эффективности гибридной СЭО при движении АНПА в различных скоростных режимах отсутствуют.

Целью работы явилась разработка имитационной модели оценки эффективности гибридной СЭО.

1. Постановка задачи

Пусть для проектируемого АНПА разработано несколько альтернативных вариантов гибридной СЭО, отличающихся оборудованием электросети, их параметрами и алгоритмами управления.

Необходимо разработать имитационную модель оценки эффективности гибридной СЭО для определения соответствия ее требуемым нормам и для выбора эффективного варианта гибридной СЭО, оборудования электросети, его параметров и алгоритмов управления гибридной СЭО [9].

Эффективной будем считать ту гибридную СЭО, которая, по аналогии с двигателями, обеспечивает наибольший коэффициент полезного действия (КПД), представляющий собой отношение потребляемой электроэнергии к вырабатываемой, то есть при работе которой расход энергоресурса на единицу пройденного пути минимальный. Потребляемая электроэнергия определяется энергией, необходимой для функционирования исполнительных механизмов АНПА и энергией, вызванной потерями в электросети при прохождении тока по токопроводам, РЩ, МПН, ключам. Минимизация удельного расхода электроэнергии происходит за счет минимизации потерь в электросети, которые не являются детерминированными из-за ряда случайных факторов, например, течения, скорость которого и время влияния слабо предсказуемы.

Для определения соответствия разрабатываемой гибридной СЭО нормам и требованиям, предъявляемым к энергосистемам, необходимо в результате имитационного моделирования оценить относительные потери электроэнергии как отношение потерь к вырабатываемой электроэнергии. В соответствии с требованиями к энергосистемам максимально допустимые потери не должны превышать 10-12%, и оптимальные потери должны составлять 4-6%. Размер потерь электроэнергии используется при выборе эффективного варианта конструктивных, технических и алгоритмических решений в разрабатываемой гибридной СЭО. Кроме того, оценка потерь электроэнергии дает возможность определить необходимый запас энергоресурса для работы оборудования по мере выполнения маршрутного задания с учетом вынужденных потерь электроэнергии, которые неизбежны. Для этого необходимо в результате моделирования получить абсолютное значение потерь электроэнергии и учитывать его при формировании маршрутного задания для гарантии достаточности энергоресурса на его выполнение.

Оценка эффективности W гибридной СЭО с учетом проектных и тактических параметров возможна только при взаимосвязанном рассмотрении процессов, связывающих ее функционирование с движением АНПА в ходе выполнения маршрутного задания, имитации системной динамики, позволяющей синхронно воспроизводить процесс сложного движения АНПА в морской среде и функционирование гибридной СЭО с переключениями источников электроэнергии, подключении потребителей к токопроводам, которые обеспечиваются специальными алгоритмами функционирования гибридной СЭО.

Поэтому после выработки критерия эффективности на следующем этапе исследований разработана имитационная модель функционирования гибридной СЭО синхронно с имитацией движения АНПА.

2. Имитационная модель оценки эффективности гибридной СЭО

Разработка имитационной модели основана на идеях академика Н.Н. Моисеева [6] и П. Девиса [7], следуя которым, 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 тела, погруженного 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 – РЩ, МПН, коммутационных ключей.

Степень детализации воспроизводимых процессов определялась из условий чувствительности результата моделирования к входным параметрам и соответствия результатов моделирования целям моделирования. Выбор степени детализации в имитационной модели 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 каждого процесса может быть представлена выражением:

$$M = M\{X, U, K\} \quad (1)$$

Синтез моделей отдельных процессов обеспечивался 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 модели осуществлялась путем пересчета положения АНПА, параметров исполнительных механизмов и состояния электросети в каждом такте имитации.

Подробное описание моделей воспроизводимых процессов приведено в [12], поэтому ниже ограничимся кратким описанием модели каждого воспроизводимого процесса.

В модели движения АНПА объектом моделирования является АНПА, представляемый материальной точкой. Параметрами фазового состояния АНПА являются: текущие координаты АНПА и текущее удельное энергопотребление. Параметрами управления являются скорость АНПА. Внешними величинами являются заданные параметры движения – курс, скорость, глубина. Имитационная модель основана на определении пространственных координат АНПА в абсолютной системе координат.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_x \cos j \cos y + v_y (\sin q \sin j - \cos q \cos j \sin y) + \\ &+ v_z (\cos q \sin j + \sin q \cos j \sin y) \\ \dot{y} &= -v_x \cos y \sin j + v_y (\cos j \sin q + \cos q \sin j \sin y) + \\ &+ v_z (\cos j \cos q - \sin j \sin y \sin q) \\ \dot{z} &= v_x \sin y + v_y \cos y \cos q - v_z \cos y \sin q \end{aligned} \quad (2)$$

где y – дифферент, j – курс, q – крен, α – угол атаки, β – угол дрейфа, которые определяются с использованием проекций угловых скоростей.

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

В модели динамического положения АНПА объектом моделирования является 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. Модель основана на математической модели пространственного движения объекта, которая содержит шесть уравнений Эйлера.

$$\frac{du_i}{dt}(M + M_{np}) = \dot{a} F_i; \quad \frac{dw_i}{dt}(J + J_{np}) = \dot{a} M_i, \quad (3)$$

где M – масса аппарата, тс·с²/м; M_{np} – присоединенные массы воды, тс·с²/м; u_i – проекции (составляющие) вектора скорости на оси связанной системы координат, м/с, $i=\{x,y,z\}$; $\dot{a} F_i$ – 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;

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

Параметры управления – силы и моменты – определяются задействованными 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 модели более низкого уровня с большей степенью детализации – в модели создаваемых сил и моментов.

В модели создаваемых сил и моментов объектом моделирования являются винты и рули. Параметрами состояния являются текущие силы и моменты, создаваемые используемыми рулями и винтами.

Так, тяга маршевого двигателя определяется выражением:

$$T_e = 2\rho \frac{K_2 \Gamma n_{ГВ}^3 D_{ГВ}^5}{V}, \quad (4)$$

где $n_{ГВ}$ – число оборотов гребного винта, V – скорость набегающего потока жидкости, ρ – плотность воды, $D_{ГВ}$ – диаметр гребного винта, K_2 – коэффициент момента винта.

Параметрами управления являются состав исполнительных механизмов и текущие значения скорости вращения винтов и углов перекадки рулей. Внешними параметрами являются углы атаки, дрейфа, геометрии корпуса.

В модели исполнительных механизмов объектом моделирования являются исполнительные механизмы. Параметрами управления являются скорость вращения двигателей и углы перекадки рулей.

По результатам определения состава исполнительных механизмов и текущих значений скорости вращения винтов и углов перекадки рулей определяется удельное энергопотребление электроэнергии, необходимое для функционирования АНПА и его движения с заданными параметрами с задействованием винтов и рулей. Полученные значения энергопотребления в виде токов потребления используются в качестве параметров состояния в модели работы электросети гибридной системы энергообеспечения АНПА.

В модели работы электросети гибридной системы энергообеспечения АНПА объектом моделирования является электросеть АНПА. Параметрами состояния являются потребление электроэнергии и потери электроэнергии в сети. Параметрами управления являются состав задействованного оборудования (РЩ, МПН, ключей) и их параметры. Состав задействованного оборудования и их параметры определяются в зависимости от текущего суммарного тока потребления. Кроме того, параметрами

управления являются также подключения потребителей к токопроводам, соединяющим потребителей с источниками электроэнергии.

Модель подключений потребителей к токопроводам имеет вид:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (5)$$

где элементы матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} содержат значения токов всех потребителей и обозначаются a_{ij} , где $i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, n$; i – номер шины, j – номер потребителя, подключенного к i -ой шине, n – количество потребителей, характеризуемых током потребления. При этом подключения потребителей к токопроводам определялись из условия минимизации потерь электроэнергии в электросети.

Все перечисленные модели ввиду специфичности разрабатываемого аппарата и гибридной системы энергообеспечения, не имеющих аналогов, были созданы без использования готовых инструментов моделирования, в среде Qt Creator на языке C++, графическая оболочка была выполнена в среде Delphi.

3. Доказательство эффективности разработанной имитационной модели

Докажем, что разработанная имитационная модель оценки функционирования гибридной СЭО – наиболее эффективная из всех возможных вариантов. Как определено в [8], качество модели – это совокупность свойств и характеристик модели, определяющих способность удовлетворить обусловленные или предполагаемые потребности субъекта, использующего модель.

Потребность определяется необходимостью отклика результата на изменяемые конструкторские решения в гибридной СЭО. Кроме того, потребность заключается также в получении количественного показателя эффективности.

Рассмотрим альтернативные варианты моделей, которые могли бы быть использованы для проведения оценки эффективности. При обратном моделировании (от гибридной СЭО к модели) проблема соответствия (адекватности) решается на каждой стадии приближения модели к свойствам объекта – гибридной СЭО [8]. Рассмотрим следующие стадии приближения:

1) модель движения АНПА – на кинематическом уровне, энергозатраты – линейный с течением времени, работа электросети не учитывается;

2) модель движения АНПА – на кинематическом уровне, энергозатраты – с учетом нелинейных зарядно-зарядных характеристик без детализации процесса переключения с одного источника электроэнергии на другой, работа электросети не учитывается;

3) модель движения АНПА – на кинематическом уровне, энергозатраты – с учетом нелинейных зарядно-зарядных характеристик и учета параллельно-последовательного использования источников электроэнергии; работа электросети не учитывается;

4) модель движения АНПА – на динамическом уровне, энергозатраты – с учетом нелинейных зарядно-зарядных характеристик и учета параллельно-последовательного использования источников электроэнергии; учет алгоритмов работы электросети;

5) модель движения АНПА – на динамическом уровне, энергозатраты – с учетом неравномерности заряда/разряда источников электроэнергии, вызванного модульностью их конструкции; учета параллельно-последовательного использования источников электроэнергии; учет алгоритмов работы электросети;

6) модель движения АНПА – на динамическом уровне, учет потребления не только МД, но и каждой системы АНПА, энергозатраты – с учетом заряда/разряда каждого модуля и учета параллельно-последовательного их соединения в единый источник электроэнергии, с учетом потерь из-за перегрева модулей и всего источника в

целом; учет параллельно-последовательного использования источников электроэнергии; учет алгоритмов работы электросети.

При оценке эффективности разработанной имитационной модели учитываем, что общими требованиями, предъявляемыми к качеству модели, являются [8]: соответствие (адекватность) объекту моделирования либо целям моделирования, сложность, результативность, адаптивность, обоснованность (подсистема объяснения), понятность (удобство восприятия).

Каждый из перечисленных выше шести вариантов реализации технологии комплексного (системного) моделирования характеризуется затратами времени на проведение моделирования, расходом вычислительных и временных ресурсов на сбор, обработку и подготовку данных, тестирование и т.д., и конечными результатами (эффектами).

Оценивание и выбор наилучшего варианта моделирования определяется обобщенным свойством, всесторонне характеризующим достижение поставленных целей моделирования. В рассматриваемой задаче целью моделирования являлось получение количественного значения показателя эффективности.

При анализе результативности, то есть способности моделирования давать конкретный целевой эффект, выясняется, что варианты 1) – 3) не способны дать целевой эффект. Это обусловлено тем, что рассмотрение движения АНПА на кинематическом уровне, отсутствие данных о количестве и составе задействованных в настоящий момент источников электроэнергии и особенности работы электросети не позволяют рассмотреть альтернативные конструкторские решения в гибридной СЭО.

Начиная с варианта 4) и далее такая возможность появляется. Однако следует считать варианты 5) и 6) избыточными с точки зрения информативности, приводящей к неоправданному перерасходу вычислительных и временных ресурсов, так как появившиеся возможности более детального учета процесса функционирования источников электроэнергии в целом не оказывают существенного влияния на результат. Повышение точности конечного результата, которое может быть достигнуто благодаря их использованию, будет нивелировано незапланированными затратами энергоресурса, вызванными случайностью перехода АНПА из одного скоростного режима в другой и обратно. Кроме того, избыточность моделируемых процессов приводит к необходимости задействования большого количества параметров, которые не всегда могут соответствовать условиям моделирования, и, тем самым, приводить к ошибочности получаемого в ходе моделирования результатам.

Такие показатели как адаптивность, обоснованность и понятность для рассматриваемых шести вариантов моделей практически не отличаются, поэтому в дальнейшем анализе эти показатели не используются.

Расчет асимптотической сложности моделирования определяется числом операций [8]. При переходе от одной модели к другой на каждой стадии приближения модели к свойствам объекта – гибридной СЭО, количество операций возрастает практически по степенной функции, так как при детализации каждого слагаемого или сомножителя модели текущей стадии приближения количество операций возрастает в геометрической прогрессии.

В связи с этим принимаем, что для определения удельного расхода энергоресурса нет необходимости детально моделировать работу СЭО (стадии 5) и 6)), и нет необходимости детально моделировать потребление на нужды АНПА, достаточно взять усредненную характеристику. В то же время важны пиковые значения энергопотребления МД. Отсюда следует, что наиболее эффективной является модель варианта 4), разработанная в настоящей работе. Разработанную имитационную модель можно рассматривать в качестве, по словам академика Н.Н. Моисеева [6],

«минимальной» модели, в максимальной степени удовлетворяющей потребности исследователя, ее использующего. Именно в модели 4) использована разумная степень детализации моделируемых процессов [7], необходимая и достаточная для получения конечного результата.

Более строгое доказательство того, что разработанная модель является наиболее эффективной на множестве альтернативных моделей 1) – 6), требует отдельного рассмотрения и глубокого анализа с формированием шкалы признаков, использованием экспертных оценок [8], выработки правил свертки оценок как по функциональным, так и по нефункциональным [13] требованиям.

С использованием разработанной имитационной модели были проведены численные эксперименты по выявлению эффективного варианта конструкторских и алгоритмических решений в гибридной СЭО, связанных с выбором количества токопроводов и их номинальных токов.

4. Проведение численного эксперимента

Рассматривается гибридная СЭО, в электросети которой по мере изменения токопотребления при выполнении АНПА маршрутного задания предусмотрено подключение/отключение токопроводов. Функционирование гибридной СЭО моделировалось в условиях наиболее энергоемкого тактического эпизода, связанного с разгоном АНПА в течение 6000 тактов имитации. При разгоне АНПА происходило повышение токопотребления по нелинейному закону, и по мере повышения токопотребления происходило постепенное подключение дополнительных токопроводов в соответствии с алгоритмом управления гибридной СЭО. При этом рассматривалось несколько вариантов скорости течения, затрудняющего достижение заданной скорости движения АНПА, и несколько вариантов номинальных токов токопроводов, характеризующих альтернативные варианты гибридной СЭО. При этом в каждой серии испытаний для определенного варианта номинальных токов токопроводов случайным образом равновероятно разыгрывалась скорость встречного течения в диапазоне от 0 до 4 узлов, которая затем на протяжении всего эксперимента принималась постоянной. В ходе имитации оценивались относительные и абсолютные потери электроэнергии. Результаты исследований приведены на рис. 1.

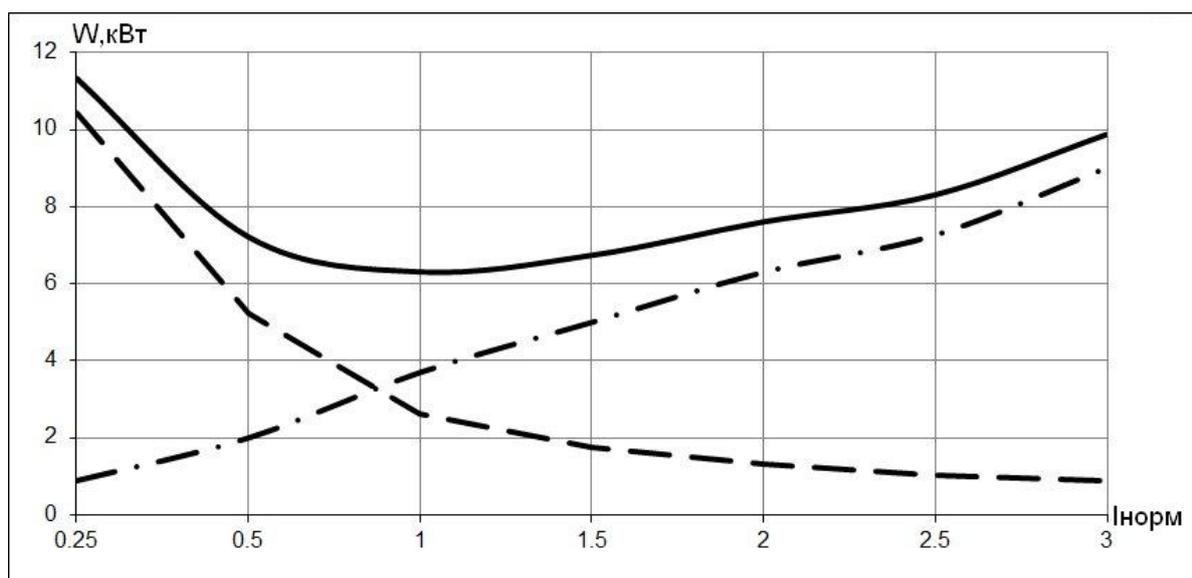


Рис. 1. Зависимость потерь электроэнергии от условий выполнения маршрутного задания

По горизонтальной оси отложены номинальные токи токопроводов в нормированных единицах относительно некоторого заданного значения, по вертикальной оси отложены потери в кВт. Пунктирная линия характеризует относительные потери на содержание ключей (на единицу мощности), подключающих/отключающих токопроводы, штрих-пунктирная линия отражает потери в токопроводах, определяемых произведением $I^2 R$ (I – ток в А, R – сопротивление в Ом), сплошная линия отражает суммарные потери.

Из рис. 1 видно, что при малых номинальных токах увеличивается количество задействованных токопроводов, в результате чего возрастают потери на содержание ключей. С увеличением номинальных токов токопроводов уменьшается их количество, и вместе с ними уменьшаются потери на содержание ключей, однако возрастают потери в самих токопроводах, пропорциональные сопротивлению R .

Таким образом, имитационное моделирование позволило по результатам исследований выявить на множестве альтернативных вариантов те варианты эффективной работы гибридной СЭО, при которых уровень потерь электроэнергии наименьший: это варианты с номинальными токами 0,5; 1,0 и 1,5.

Выводы

Результаты исследований показали правильность выбора стратегии имитационного моделирования и правильность выбора степени детализации имитируемых процессов. Разработанная имитационная модель позволяет проводить исследования, направленные на оценку эффективности гибридной СЭО для определения степени ее соответствия требованиям и условиям и для выбора эффективного варианта конструкторских, технических и алгоритмических решений.

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. **Безрук Г.Г., Мартынова Л.А., Саенко И.Б.** Динамический метод поиска антропогенных объектов в морском дне с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Труды СПИИРАН. 2018. № 3 (58). С. 203-226.
3. **Бакуменко Л.Г., Дядик А.Н., Сурин С.Н.** Использование электрохимических генераторов на автономных необитаемых подводных аппаратах // Системы управления и обработки информации. СПб. 2018. Вып 1(40). С. 61-68.
4. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.** Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА. – Известия ЮФУ. Технические науки, 2015, № 1. С.50-58.
5. **Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Результаты разработки алгоритмов, реализуемых в системе управления автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28, №3(110). С.109-121.
6. **Моисеев Н.Н.** Алгоритмы развития. 1987. М. Наука. 350с.
7. **Davis P. K.** Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. P. 293-302.
8. **Микони С.В., Соколов Б.В. Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография С.В. Микони, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. М.: РАН, 2018. 314 с.

9. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2016) 4–6 октября 2016 г., СПб, АО «Концерн «Электроприбор», 2016. С.205 – 209.
10. **Ильичев А.В., Грущанский В.А.** Эффективность адаптивных систем. – М. Машиностроение. 1987. 232 с.
11. **Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.** Подход к реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. Том 28. №2 (109), 2020. С.131-146.
12. **Киселев Н.К., Мартынова Л.А., Конюхов Г.В., Воронина Н.Г., Стариков А.И., Подшивалов Г.А., Горбачев Н.И.** Особенности имитационного моделирования функционирования гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата // Шестая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2021). Труды конференции. М. Издательство «Перо», 2021. С.79-85.
13. **Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А.** Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. 2020. №4. С.31-41.