

**Комлев Антон Владимирович** – e-mail: kom86@bk.ru; тел.: +79502884801; к.т.н.; с.н.с. лаборатории 07.

**Филоженко Алексей Юрьевич** – e-mail: filozhenko\_a@mail.ru; тел.: +79140678041; к.т.н.; с.н.с. лаборатории 07.

**Gerasimov Vladimir Aleksandrovich** – The Institute of the problems sea technology, Far eastern branch to Russian Academy of the sciences; e-mail: gerasimov@marine.febras.ru; 5a, Suhanova, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +79025223824; cand. of eng. sc.; professor; head of the laboratory 07.

**Komlev Anton Vladimirovich** – e-mail: kom86@bk.ru; phone: +79502884801; cand. of eng. sc.; senior researcher of the laboratory 07.

**Filozhenko Aleksey Jurievich** – e-mail: filozhenko\_a@mail.ru; phone: +79140678041; cand. of eng. sc.; senior researcher of the laboratory 07.

УДК 629.12

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-170-187

**Н.К. Киселев, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич****МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ В СОСТАВЕ СТЕНДА ОТЛАДКИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ АНПА\***

*Целью исследований является разработка комплекса математических моделей, обеспечивающих исходными данными математическую модель работы гибридной системы энергообеспечения для последующего встраивания в стенд отладки и сопровождения. Работа является развитием опубликованной ранее математической модели функционирования гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата. В работе по результатам анализа целей и задач моделирования разработаны математические модели источников электроэнергии – аккумуляторной батареи и электрохимического генератора. Поскольку управления параметрами работы аккумуляторной батареи и электрохимического генератора зависит от параметров движения аппарата, то дополнительно были разработаны математические модели маршевого движителя и интегрированной системы управления аппаратом. Внешние условия функционирования аппарата и маршрутное задание задавались в специально разработанном имитаторе тактической обстановки. На основе теории интегрированного иерархического моделирования с изменяемым разрешением была определена наиболее целесообразная степень детализации разрабатываемых математических моделей. Ввиду необходимости учета неравномерности обдува газами топливных элементов в электрохимическом генераторе математическая модель основана на решении нелинейной системы уравнений, включающей в себя уравнение Навье-Стокса, уравнения сохранения импульса, энергии и заряда. При разработке математической модели аккумуляторной батареи была учтена неравномерность заряда отдельных аккумуляторов; математическая модель учитывала параметры отдельных аккумуляторов по данным их изготовителя. Результатами моделирования явились зарядно-разрядные характеристики аккумуляторной батареи. В математической модели основного потребителя электроэнергии - маршевого движителя - реализована зависимость создаваемой тяги от требуемой скорости движения аппарата, что позволило получать объем электроэнергии, потребляемой маршевым движителем. В математической модели интегрированной системы управления в зависимости от текущего положения аппарата реализованы регуляторы движения для формирования управления элементами движительной системы, обеспечивающие типовые режимы маневрирования аппарата. Кроме того, реализовано управление параметрами функционирования гибридной системой энергообеспечения - переключение источников электроэнергии, переключение процессов заряда аккумуляторной батареи. В математической модели имитатора тактической обстановки реализованы возможности задания маршрута и внешних*

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 19-08-00253, № 20-08-00130.

условий. Кроме того, реализована модель движения аппарата с учетом действующих на аппарат сил и моментов. Разработанный комплекс математических моделей, обеспечивающий данными математическую модель функционирования гибридной системы энергообеспечения, может быть использован в составе стенда отладки и сопровождения автономного необитаемого подводного аппарата.

*Автономный необитаемый подводный аппарат; гибридная система энергообеспечения; математическая модель; степень детализации.*

**N.K. Kiselev, L.A. Martynova, I.V. Pashkevich**

**THE MATHEMATICAL MODEL OF THE FUNCTIONING OF A HYBRID ENERGY SUPPLY SYSTEM AS PART OF A DEBUGGING AND MAINTENANCE STAND AUV**

*The aim of the research is to develop a complex of mathematical models that provide initial data for a mathematical model of the hybrid energy supply system for subsequent integration into the stand for debugging and maintenance. The work is a development of the previously published mathematical model of the functioning of the hybrid energy supply system of an autonomous underwater vehicle. In the work, based on the results of the analysis of the goals and objectives of modeling, mathematical models of electric power sources — a storage battery and an electrochemical generator — are developed. Since control over the operating parameters of the battery and the electrochemical generator depends on the parameters of the vehicle's movement, additional mathematical models of the marching propulsion engine and the integrated control system of the vehicle have been developed. The external conditions for the functioning of the vehicle and the route task were set in a specially developed tactical situation simulator. Based on the theory of integrated hierarchical modeling with variable resolution, the most appropriate degree of detail of the developed mathematical models was determined. In view of the need to take into account the non-uniformity of gas blowing of fuel elements in an electrochemical generator, the mathematical model is based on solving a non-linear system of equations, including the Navier-Stokes equation, equations of conservation of momentum, energy and charge. When developing a mathematical model of the battery, the uneven charge of individual batteries was taken into account; The mathematical model took into account the parameters of individual batteries according to their manufacturer. The simulation results were the charge-discharge characteristics of the battery. In the mathematical model of the main consumer of electricity - the marching propulsion - the dependence of the generated thrust on the required speed of the vehicle is implemented, which allowed to obtain the amount of electricity consumed by the marching propulsion. In the mathematical model of an integrated control system, depending on the current position of the vehicle, motion controllers are implemented to form control elements of the propulsion system, providing typical modes of maneuvering the vehicle. In addition, the control of the functioning parameters of the hybrid energy supply system was implemented - switching of electric power sources, switching of battery charge processes. In the mathematical model of a tactical situation simulator, the possibilities of defining a route and external conditions are realized. In addition, a model of the vehicle movement was implemented taking into account the forces and moments acting on the vehicle. The developed complex of mathematical models, which provides the data with a mathematical model of the functioning of the hybrid energy supply system, can be used as a part of the stand for debugging and maintenance of an autonomous underwater vehicle.*

*Autonomous uninhabited underwater vehicle; hybrid energy supply system; mathematical model; level of detail.*

**Введение.** Разработка тяжелого автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) [1] связана с применением новых технических решений, в числе которых – формирование принципиально новой системы энергообеспечения (СЭО) – гибридной, в которой используются разнородные источники электроэнергии, работающие на различных физических принципах. В связи с этим, а также с тем, что проведение морских испытаний экономически затратно, целесообразно проведение предварительного математического моделирования функциони-

рования АНПА на специальном стенде отладки и сопровождения. Для этого необходима разработка математических моделей подсистем АНПА, в том числе и гибридной СЭО.

Представляемая работа является развитием результатов, изложенных в [2] в части более детального моделирования источников электроэнергии гибридной СЭО и основного потребителя электроэнергии – маршевого двигателя – в различных режимах движения АНПА. Необходимость более детального моделирования вызвана тем, что используемые в гибридной СЭО разнородные источники электроэнергии – литий-ионная аккумуляторная батарея (ЛИАБ), электрохимический генератор (ЭХГ) и используемые в нем реагенты из хранилища реагентов (ХР) – каждая сама по себе представляет собой сложную систему. С другой стороны, внешние условия, определяющие режим функционирования гибридной СЭО, и связанные с этим переходные процессы, требовали взаимодействия модели гибридной СЭО с математическими моделями внешних систем – имитатора тактической обстановки (ИТО) и интегрированной системы управления (ИСУ).

Поскольку на функционирование гибридной СЭО влияние оказывает не только функционирование входящих в нее источников электроэнергии, но и объем потребляемой энергии подсистемами АНПА в различных скоростных режимах его движения, то в математической модели гибридной СЭО также должна быть учтена зависимость расхода электроэнергии от скорости движения АНПА.

В связи с этим возникает задача разработки математических моделей источников электроэнергии гибридной СЭО и математических моделей основных потребителей АНПА для проведения исследований и использования их в составе полномасштабного стенда отладки и сопровождения АНПА.

Целью работы являлась разработка комплекса математических моделей, обеспечивающих данными математическую модель функционирования гибридной СЭО.

**Постановка задачи.** При движении АНПА в соответствии с маршрутным заданием в работе СЭО можно условно выделить четыре этапа, отличающиеся используемыми источниками электроэнергии и режимами их работы:

- ◆ режим экономичного хода;
- ◆ высокоскоростной режим;
- ◆ режим экономичного хода с одновременной подготовкой к высокоскоростному режиму;
- ◆ режим экономичного хода с одновременным восстановлением параметров гибридной СЭО после быстрого режима.

Для формализованного представления перечисленных этапов представим модель функционирования гибридной СЭО в матричном виде:

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, \quad (1)$$

где  $x$  – вектор состояния гибридной СЭО размерности 2;

$u$  – вектор управления гибридной СЭО размерности 4;

$\mathbf{A}$  – матрица динамики гибридной СЭО размерности  $2 \times 1$ ;

$\mathbf{B}$  – матрица эффективности источников электроэнергии гибридной СЭО размерности  $4 \times 2$ .

В выражении (1) состояние гибридной СЭО описывается состояниями двух источников электроэнергии – ХР и ЛИАБ:

$$x = [Q_{\text{ХР}} \quad Q_{\text{ЛИАБ}}]^T.$$

Состояния источников электроэнергии выражаются одним параметром - запасом энергоресурса ХР  $Q_{ХР}$  и запасом электроэнергии ЛИАБ  $Q_{ЛИАБ}$ .

Изменение состояния  $x$  имеет вид:

$$x = [q_{ХР} \quad q_{ЛИАБ}]^T,$$

где  $q_{ХР}$  – удельный расход реагентов в энергетическом эквиваленте;  $q_{ЛИАБ}$  – удельный расход энергии ЛИАБ.

Матрица **A** состоит из элементов  $a_{ij}$ , принимающих значения 0 или 1: 0 в случае отсутствия на борту АНПА источника электроэнергии или нахождения его в нерабочем состоянии, 1 – при работе источника электроэнергии:

$$A = [a_1 \quad a_2].$$

Управление  $u$  определяется удельным расходом электроэнергии на маршевый движитель (МД)  $q_{МД}$ , обеспечивающий поступательное движение АНПА за счет вращения гребного винта, на нужды АНПА  $q_{АНПА}$ , на потери электроэнергии при саморазряде ЛИАБ  $q_{СР}$ , на заряд или разряд ЛИАБ  $q_{ЗР}$ :

$$u = [q_{МД} \quad q_{АНПА} \quad q_{СР} \quad q_{ЗР}]^T.$$

Элементами матрицы **B** являются параметры  $b_{ij}$ , принимающие значения 0, -1 или 1: 0 в случае неиспользования, -1 – в случае расхода, +1 – в случае пополнения энергоресурса:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}.$$

В режиме экономичного хода:

$$A = [1 \quad 1],$$

при саморазряде:

$$B = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

при заряде после саморазряда или после высокоскоростного режима:

$$B = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}.$$

В высокоскоростном режиме:

$$A = [1 \quad 1],$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Результаты моделирования направлены на получение значений входящих в выражение (1) параметров:  $q_{ХР}$  – удельного расхода реагентов в энергетическом эквиваленте;  $q_{ЛИАБ}$  – удельного расхода электроэнергии ЛИАБ;  $q_{МД}$  – удельного расхода электроэнергии на работу МД;  $q_{АНПА}$  – удельного потребления на общие нужды АНПА;  $q_{СР}$  – удельного расхода электроэнергии ЛИАБ при саморазряде;  $q_{ЗР}$  – удельной электроэнергии, приобретаемой ЛИАБ при ее заряде, которой соответствует расход электроэнергии, вырабатываемой ЭХГ с использованием реагентов из ХР.

**Определение состава математических моделей.** Структурная схема взаимодействия математической модели гибридной СЭО и математических моделей остальных подсистем АНПА представлена на рис. 1.

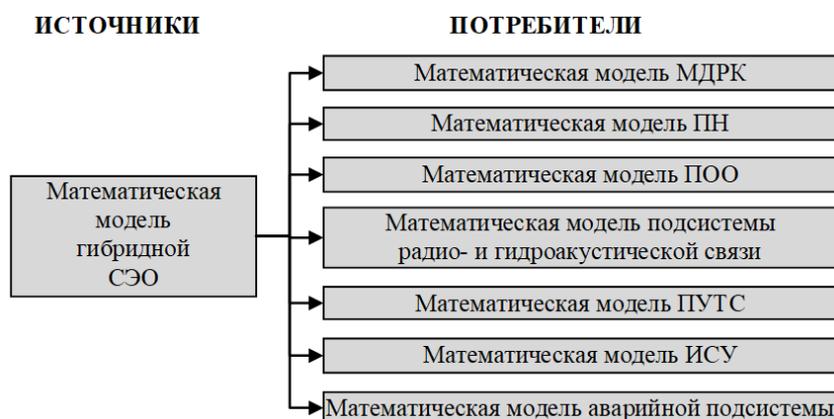


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия математической модели гибридной СЭО и остальных подсистем АНПА (принятые сокращения: МДРК – маршевый движительно-рулевой комплекс, ПН – подсистема навигации, ПОО – подсистема освещения обстановки, ПУТС – подсистема управления техническими средствами, ИСУ – интегрированная система управления)

Структурная схема детализации математической модели МДРК на математические модели составных частей МДРК приведена на рис. 2 (аббревиатура «ММ» означает «математическая модель»).

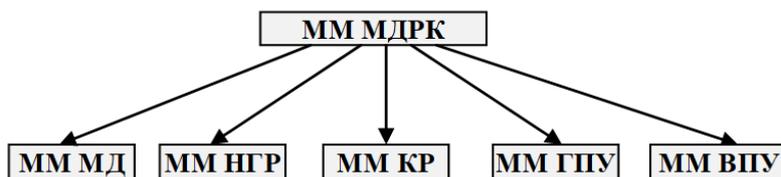


Рис. 2. Структурная схема декомпозиции математической модели МДРК (принятые сокращения: МД – маршевый двигатель, НГР – носовые горизонтальные рули, КР – кормовые рули, ГПУ – горизонтальные подруливающие устройства, ВПУ – вертикальные подруливающие устройства)

Полагаем, что потребление на нужды АНПА постоянно и несоизмеримо меньше потребления МДРК, равно среднестатистическому расходу приборов, механизмов и устройств. Полагаем также, что затраты электроэнергии на НГР, КР, ГПУ и ВПУ несоизмеримо меньше по сравнению с электроэнергией, потребляемой МД.

С учетом принятых допущений структурная схема математических моделей примет вид, представленный на рис. 3.

Проанализируем события, оказывающие влияние на удельный расход электроэнергии, вырабатываемый источниками питания. В выражении (1), описывающем состояние гибридной СЭО, удельный расход реагентов в энергетическом эквиваленте  $q_{ХР}$  определяется удельным потреблением реагентов для вырабатываемой ЭХГ электроэнергии с учетом потерь на преобразование химической энергии

топлива в электрическую и тепловую энергию. Потребление реагентов в ЭХГ определяется объемом потребления, который включает в себя потребление МД  $q_{\text{МД}}$ , потребление на нужды АНПА  $q_{\text{АНПА}}$ , а также потребление на заряд ЛИАБ  $q_{\text{ЗР}}$  – в случае ее разряда ниже определенного порогового уровня.

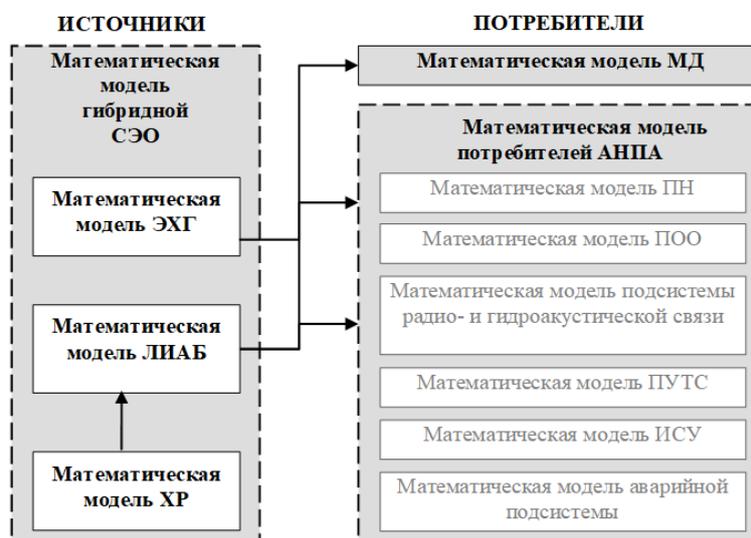


Рис. 3. Структурная схема взаимодействия математических моделей функционирования гибридной СЭО, источников электроэнергии и потребителей АНПА

Поэтому для формирования данных для математической модели функционирования гибридной СЭО целесообразно использовать математические модели, обеспечивающие:

- ◆ формирование электроэнергии при работе ЭХГ;
- ◆ формирование электроэнергии при работе ЛИАБ;
- ◆ потребление электроэнергии при заряде ЛИАБ;
- ◆ формирование зарядно-разрядных характеристик ЛИАБ;
- ◆ потребление электроэнергии МД;
- ◆ потребление электроэнергии на нужды АНПА.

Удельный расход энергии ЛИАБ  $q_{\text{ЛИАБ}}$  определяется особенностями процессов заряда-разряда ЛИАБ и потреблением МД  $q_{\text{МД}}$  в высокоскоростном режиме. Удельный расход на работу МД  $q_{\text{МД}}$  - основного потребителя электроэнергии, определяется скоростью вращения гребного винта  $n_{\text{ГВ}}$ , поэтому в математической модели потребления электроэнергии гребным винтом учтена скорости его вращения.

Характеристики ЛИАБ  $q_{\text{СР}}$  и  $q_{\text{ЗР}}$  определяются путем интегрирования аналогичных характеристик отдельно взятых аккумуляторов, образующих в совокупности аккумуляторную батарею.

Переход гибридной СЭО из одного режима функционирования в другой происходит по командам ИСУ, а команды ИСУ определяются заложенными в нее алгоритмами, маршрутным заданием и текущей обстановкой. При моделировании маршрутное задание и текущая обстановка задаются ИТО.

Таким образом, для функционирования гибридной СЭО в составе стенда отладки и сопровождения целесообразно задействовать математические модели ХР, ЭХГ, ЛИАБ, МД, ИСУ и ИТО.

Следующей задачей, которая требовала своего решения, являлось определение необходимой степени детализации воспроизводимых процессов в каждой из используемых математических моделей.

**Определение степени детализации.** При определении необходимой степени детализации воспроизводимых процессов в используемых математических моделях учитывались основополагающие принципы моделирования [3–5]. В соответствии с указанными принципами модели высокого уровня абстракции недостаточно точно отражают моделируемые процессы, с другой стороны модели низкого уровня с излишней детализацией процессов требует использования большого количества параметров и данных, которые не всегда можно определить или измерить, тем более – с высокой точностью и для рассматриваемых условий моделирования. В соответствии с [3–5] моделирование функционирования рассматриваемых процессов выбиралось 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 [5–13]. В соответствии с этой теорией модель  $\{M\}$  каждого моделируемого элемента характеризуется:

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

В общем виде модель представим в виде:  $M = M\{X, U, K\}$ .

Для модели гибридной СЭО в данной записи  $\{X\}$  и  $\{U\}$  повторяют матричную запись уравнения (1).  $\{K\}$  представляет собой условия перехода гибридной СЭО из одного фазового состояния в другое, определяемое переходом АНПА из одного скоростного режима в другой, выполняемого по командам ИСУ АНПА. Формирование команды со стороны ИСУ может быть вызвано необходимостью повышения управляемости и устойчивости движения АНПА. По окончании такой необходимости по команде со стороны ИСУ после высокоскоростного режима АНПА возвращается в режим экономичного хода.

Рассмотрим подробнее перечисленные характеристики для моделей ХР, ЭХГ, ЛИАБ, МД, ИСУ и ИТО. Поскольку функционирование ХР и ЭХГ неразрывно связаны между собой, то в дальнейшем будем описывать ЭХГ как источник электроэнергии, и при обсуждении расхода реагентов будем рассматривать потребление ЭХГ.

Состояние  $\{X_{\text{ЭХГ}}\}$  определяется тем, включен или выключен ЭХГ, а также оставшимся энергоресурсом в ХР. Управление ЭХГ  $\{U_{\text{ЭХГ}}\}$  определяется параметрами, регулирующими удельную вырабатываемую электроэнергию и включение/выключение ЭХГ. Вектор внешних величин  $\{K_{\text{ЭХГ}}\}$  определяется на входе – командой ИСУ об изменении удельного потребления; на выходе – объемом потребления электроэнергии потребителями. Поэтому при моделировании функционирования ЭХГ воспроизводились процессы, оказывающие влияние на формирование удельной электроэнергии. Влияние оказывает неоднородность обдува газами топливных элементов и равномерный низкоомный токовый ток по всей площади электродов.

ЛИАБ представляет собой сборку из ряда последовательно подключенных батарейных модулей, а модули состоят из параллельно подключенных аккумуляторов. Из-за этого возникает неравномерность емкости и напряжения в аккумуляторах, которая учтена при моделировании. Состояние  $\{X_{\text{ЛИАБ}}\}$  определяется удельным разрядом при подключении к ней потребителей, удельным разрядом при саморазряде, удельным зарядом, проведение которого необходимо после разряда

ЛИАБ, включенным/выключенным состоянием. В математической модели учтено, что удельные зарядные характеристики ЛИАБ определяются не только характеристиками отдельных аккумуляторов, но и их совокупностью, поскольку в процессе заряда-разряда происходит балансировка уровней между аккумуляторами, в связи с чем характеристики батареи в целом не могут быть получены обычным суммированием характеристик отдельных аккумуляторов. Управление  $\{U_{\text{ЛИАБ}}\}$  ЛИАБ заключается в подключении/отключении ЛИАБ от потребителей. Вектор внешних величин  $\{K_{\text{ЛИАБ}}\}$  на входе представляет собой команды ИСУ, на выходе – объем потребления электроэнергии потребителями.

Состояние МД  $\{X_{\text{МД}}\}$  определяется тягой, создаваемой гребным винтом. Управление МД  $\{U_{\text{МД}}\}$  определяется скоростью вращения гребного винта. Вектор внешних величин  $\{K_{\text{МД}}\}$  на входе содержит скорость вращения гребного винта; на выходе – энергию, затрачиваемую на вращение гребного винта с заданной скоростью.

Состояние ИСУ  $\{X_{\text{ИСУ}}\}$  описывается параметрами состояния подсистем АНПА, предшествующего текущему состоянию. Управление  $\{U_{\text{ИСУ}}\}$  содержит параметры текущего состояния подсистем АНПА, текущего положения АНПА на маршрутной траектории и параметры его движения. Управление в виде команд раздается в подсистемы АНПА. Вектор внешних величин  $\{K_{\text{ИСУ}}\}$  на входе определяется требуемыми параметрами движения АНПА-курсом, скоростью, глубиной, текущими внешними условиями выполнения маршрутного задания, задаваемыми в ИТО, на выходе – командами, подаваемыми со стороны ИСУ в ЭХГ, ЛИАБ, ХР, МД.

Состояние ИТО  $\{X_{\text{ИТО}}\}$  определяется внешними условиями и маршрутным заданием, в соответствии с которыми оператор на стенде отладки и сопровождения указывает положение АНПА, закладывает в ИСУ АНПА маршрутное задание и задает параметры внешней среды. Управление  $\{U_{\text{ИТО}}\}$  определяется изменением внешних условий или положения АНПА в пространстве, задаваемыми оператором. Внешние условия отсутствуют.

Исходя из формализованного представления моделей, в работе была определена степень детализации математических моделей источников и потребителей электроэнергии.

Ниже приведено описание разработанных или используемых математических моделей источников электроэнергии, входящих в состав гибридной СЭО, математической модели МД, математической модели ИСУ в части управления гибридной СЭО и движением АНПА, а также математической модели ИТО. Математическая модель гибридной СЭО подробно описана в [2] и в данной работе не приводится.

**Математическая модель ЭХГ.** При разработке математической модели функционирования ЭХГ использован подход, реализованный в [14–15] и учитывающий параметры потоков равномерного постоянного обдува топливных элементов кислородом с катодной стороны и топливом с анодной стороны. Математическая модель функционирования ЭХГ основана на совместном решении уравнений Навье-Стокса, сохранения массы, сохранения импульса, сохранения энергии. В уравнениях используются данные производителя ЭХГ. Решение нелинейной системы уравнений осуществляется численным методом.

Результаты решения этих уравнений позволили получить вольтамперную и мощностную характеристики ЭХГ, оценить влияние локальных концентраций реагентов, влажности, давления и рабочей температуры на ЭДС. Наличие перечисленных данных позволяет, в свою очередь, получить удельные характеристики вырабатываемой ЭХГ электроэнергии.

**Математическая модель ЛИАБ.** К настоящему времени разработано большое количество математических моделей функционирования ЛИАБ [16–21]. Одной из причин необходимости моделирования формирования зарядно-разрядных

характеристик ЛИАБ является то, что в случае зарядки аккумуляторной батареи, состоящей из большого количества аккумуляторов, имеющих разброс параметров, ее практически невозможно заряжать до достижения среднего напряжения на аккумуляторе, как это рекомендуются для единичного аккумулятора. Из-за опасности перезаряда отдельных аккумуляторов заранее прекращают заряд, в результате чего ЛИАБ в целом остается недозаряженной. Часто применяют специализированные методы зарядки, основанные на организации обратной связи между системой управления батареей и зарядным устройством, предполагающих снижение тока зарядки батареи до величины тока балансировки, но это приводит к существенному увеличению времени зарядки. В связи с этим математическая модель ЛИАБ учитывает неравномерность заряда каждого аккумулятора и ориентирована на оценку степени заряженности каждого аккумулятора и получение итоговой оценки заряда по всей ЛИАБ в целом.

Предварительно была проанализирована необходимая степень детализации моделируемых процессов, в результате которой выявлено, что моделирование зарядно-разрядных характеристик отдельно взятого аккумулятора можно заменить результатами экспериментальных измерений отдельных аккумуляторов. Как следовало из описания целей моделирования функционирования ЛИАБ, достаточно использовать математическую модель для получения зарядно-разрядных характеристик с учетом влияния неравномерности заряда/разряда входящих в нее аккумуляторов. Поэтому в работе при оценке уровня заряда каждого аккумулятора реализована математическая модель, учитывающая разброс значений емкости и напряжения аккумуляторов [20]. Математическая модель основана на предварительном получении изменения напряжения на аккумуляторе от степени его заряда. В результате оценивается разброс напряжений на аккумуляторах относительно среднего значения. Определяется среднее значение напряжения на аккумуляторах. Учитывая, что суммарный разброс равен нулю, формируется система линейных уравнений относительно разности напряжений на различных аккумуляторах; количество уравнений совпадает с количеством неизвестных. В результате решения определяются напряжения каждого аккумулятора, что, в свою очередь, позволяет оценить степень заряда ЛИАБ в целом.

**Математическая модель МД.** Математическая модель работы МД предназначена для определения энергопотребления МД. Потребление МД зависит от тяги, создаваемой двигателем. Тяга определяется той скоростью, с которой движется АНПА. Для того чтобы АНПА осуществляло движение с определенной скоростью, к его МД необходимо приложить движущую силу, преодолевающую сопротивление морской среды. Движущая сила создается работающим гребным винтом, который, как и всякий механизм, часть энергии тратит непроизводительно.

При определении затрачиваемой на вращение гребного винта мощности  $N_3$  с необходимой угловой скоростью учитывалось, что затрачиваемая и полезная мощности связаны между собой пропульсивным коэффициентом  $\eta$  ( $\eta < 1$ ):

$$N_3 = \frac{N_{\Pi}}{\eta}, \quad (2)$$

Полезная мощность, необходимая для преодоления сопротивления морской среды, определяется формулой:

$$N_{\Pi} = R \cdot V, \quad (3)$$

где  $R$  – сила сопротивления.

Для записи в формализованном виде полагаем, что сила сопротивления  $R_i$  равна силе тяги  $Te$  [22], тогда

$$N_{\Pi} = Te \cdot V. \quad (4)$$

Тяга маршевого движительного комплекса  $Te$  зависит от числа оборотов гребного винта  $n_{ГВ}$ , скорости набегающего потока жидкости  $V$ , равного скорости АНПА, плотности воды  $\rho$ , диаметра гребного винта  $D_{ГВ}$ , формирующих коэффициентов момента винта  $K_2$ , а также гидродинамических характеристик конкретного АНПА, и определяется выражением [22]:

$$Te = 2\pi \frac{K_2 \rho n_{ГВ}^3 D_{ГВ}^5}{V}. \quad (5)$$

Для определения пропульсивного коэффициента использована формула Лаппа [23]:

$$\eta = 0.885 - 0.00115 n_{ГВ} \sqrt{L}, \quad (6)$$

где  $n_{ГВ}$  – частота вращения гребного винта МД, 1/с;  $L$  – длина АНПА между перпендикулярами.

Подставляя (3)–(6) в (2), получаем выражение для расчета удельного энергозатраченного на МД.

При расчете изменения скорости вращения МД полагаем, что изменение скорости вращения гребного винта меняется по линейному закону:

$$\frac{dn_{ГВ}}{dt} = C_f \quad (7)$$

где  $C_f$  – скорость изменения оборотов гребного винта; положительное значение соответствует движению вперед, отрицательное значение – движению задним ходом.

**Математическая модель ИСУ.** В ходе моделирования функционирования АНПА периодически происходит оценка параметров движения АНПА. По результатам сопоставления текущих значений параметров АНПА движения с целевыми их значениями в ИСУ происходит определение параметров органов управления: углы перекаладки носовых рулей и кормовых рулей, скорость вращения маршевого движителя, скорость и направление вращения подруливающих устройств – носовых и лаговых. Для определения параметров органов управления движения АНПА используется модель регуляторов движения АНПА. Математическая модель ИСУ в части управления движением АНПА реализует соответствующие регуляторы движения АНПА по курсу, скорости, глубине и дифференту. При управлении гибридной СЭО в ИСУ реализован алгоритм переключения потребителей с одного источника электроэнергии на другой в зависимости от сложившихся внешних условий и состояния гибридной СЭО, которое определяется удельным расходом энергоресурса.

**Математическая модель ИТО.** Оператор в ИТО задает тактический эпизод, характеризуемый положением АНПА на морской электронной карте, возможные препятствия, характеристики гидрологической и гидроакустической обстановки. Кроме того, в ИТО задаются целевые значения курса, скорости, глубины, определение момента перехода АНПА из одного скоростного режима в другой, момент времени начала выполнения маршрутного задания.

В ходе моделирования движения АНПА осуществляется пересчет параметров движения АНПА с использованием системы дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\frac{dv_i}{dt} (M + M_{пр}) = \sum F_i; \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt}(J + J_{\text{пр}}) = \sum M_i, \quad (9)$$

где  $M$  – масса аппарата,  $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{м}$ ;

$M_{\text{пр}}$  – присоединенные массы воды,  $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{м}$ ;

$U_x, U_y, U_z$  – проекции (составляющие) вектора скорости на оси связанной системы координат,  $\text{м/с}$ ;

$\sum F_i$  – суммы проекций всех сил, действующих на объект, на оси связанной системы координат,  $\text{Н}$ ;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекции вектора угловой скорости аппарата,  $\text{с}^{-1}$ ;

$J_x, J_y, J_z$  – моменты инерции массы относительно главных осей, проходящих через центр тяжести полного подводного объема,  $\text{тс} \cdot \text{м}$ ;

$\sum M_i$  – суммы моментов всех сил, действующих на объект относительно осей связанной системы координат,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ .

В результате решения данной системы определяются линейные и угловые ускорения, угловые значения дифферента, курса, крена.

По полученным значениям происходит расчет координат АНПА в неподвижной системе координат с использованием выражений [24]:

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

где  $\psi, \varphi, \theta$  – дифферент, курс, крен АНПА соответственно;  $\xi, \zeta, \eta$  – координаты положения АНПА в неподвижной системе координат.

Математическая модель ИТО является стартовой для начала моделирования функционирования АНПА и его подсистем.

Работа стенда отладки и сопровождения организована следующим образом. Оператор загружает в ИСУ АНПА маршрутное задание, в котором определена маршрутная траектория, по которой должен следовать АНПА. В соответствии с маршрутным заданием в ИТО формируется некоторая тактическая обстановка для АНПА: оператор указывает положение АНПА на морской электронной карте, положение объектов и препятствий, параметры рельефа, течения и гидроакустические условия, задаются параметры траектории движения АНПА. После этого в ИСУ происходит определение значений регуляторов движения АНПА по курсу, крену, дифференту, скорости и глубине. В процессе движения АНПА в соответствии с маршрутным заданием имитаторы исполнительных механизмов (рулей, подруливающих устройств, маршевого движителя, уравнильно-дифферентных систем и т.п.) сообщают об отработке команд в ИСУ. В зависимости от скорости вращения гребного винта МД оценивается его потребление энергоресурса. В зависимости от заданного в маршрутном задании скоростного режима движения АНПА в ИСУ определяется тип источника электроэнергии – либо ЛИАБ, либо ЭХГ, и со стороны ИСУ выдается соответствующая команда в СЭО. Моделируется процесс саморазряда ЛИАБ, и в случае достижения некоторого нижнего порога

ИСУ выдает команду на подключение ЛИАБ для заряда. При достижении верхнего порога процесс заряда ЛИАБ прекращается. При смене скоростного режима ИСУ выдает соответствующую команду на подключение ЛИАБ в качестве источника МД и отключение ЭХГ.

Модель движения АНПА расположена внутри ИТО и интегрирована с моделью внешней среды. С использованием динамической модели АНПА происходит определение изменения текущих координат и параметров движения АНПА с учетом работы органов управления движения АНПА, параметры текущего его состояния, которые передаются в ИСУ и в ИТО. ИТО принимает от модели движения вектор состояния АНПА, отображает его положение на электронной морской карте. В ИСУ происходит оценка соответствия положения АНПА маршрутной траектории. По результатам анализа в ИСУ вырабатываются параметры органов управления движением АНПА, передаются на исполнительные устройства, и т.д. – весь описанный выше процесс – повторяется.

Адекватность разработанных математических моделей подтверждена отражением физических процессов, происходящих в источниках электроэнергии из состава гибридной СЭО, при расходе энергоресурса, использованию в качестве модели АНПА и МД близкого аналога с соответствующими тактико-техническими характеристиками и коэффициентами динамической модели регуляторов движения.

**Численный эксперимент.** Разработанные математические модели функционирования гибридной СЭО и смежных с ней систем АНПА были программно реализованы в виде единого работающего имитационного комплекса моделей и использованы для проведения исследований, направленных на оценку способности источников электроэнергии обеспечить потребности АНПА при движении с заданной скоростью.

При проведении численного эксперимента рассматривались наиболее энергоемкие этапы движения АНПА, связанные с набором скорости. Такие этапы возникают как на старте выполнения маршрутного задания, так и при переходе из режима экономичного хода в высокоскоростной режим движения. И в том, и в другом случае основным потребителем электроэнергии является МД.

Рассматривались различные значения целевой скорости, до которых АНПА должен был разогнаться. Выбор целевой скорости движения АНПА связан с внешними условиями: при движении в зоне отсутствия опасности для повышения устойчивости целесообразна скорость  $V_{ЭК}$ , при движении в зоне повышенной опасности, связанной с вероятным возникновением препятствий, целесообразна более медленная скорость  $V_{ЭК} / 2$ . При ускорении АНПА для перехода из режима экономичного хода в высокоскоростной режим рассмотрены несколько вариантов целевой скорости: от  $0,5 V_{ВС}$  до  $V_{ВС}$  (здесь  $V_{ЭК}$  и  $V_{ВС}$  – некоторые номинальные значения скоростей АНПА в режиме экономичного хода и в высокоскоростном режиме соответственно).

Как показали предварительные исследования, при разгоне АНПА требуется большой объем электроэнергии. Изменение потребления электроэнергии с течением времени приведено на рис. 4 для различных вариантов разгона, отличающихся целевой скоростью. По горизонтальной оси отложено время в тактах, представляющих собой некоторый постоянный промежуток времени при моделировании, через который происходит оценка изменения состояния рассматриваемых объектов, по вертикальной оси – электроэнергия, кВт·с. Результаты численного эксперимента показали, что зависимости увеличения объема потребляемой энергии с возрастанием целевой скорости носят нелинейный характер и имеют ярко выраженный максимум на начальном участке разгона.

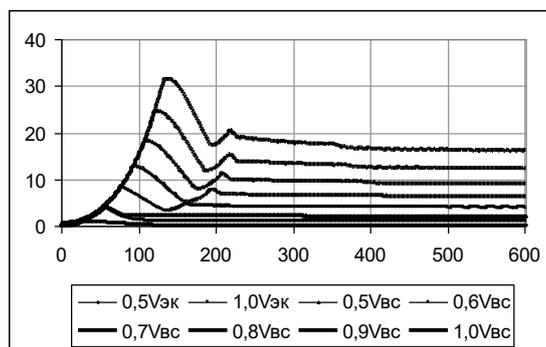


Рис. 4. Изменение потребляемой энергии с течением времени

Результаты, приведенные на рис. 4, позволили определить уровни энергопотребления, которые должны быть обеспечены источниками энергии, чтобы произошел разгон АНПА до заданной скорости. Поэтому на следующем этапе исследований анализировались возможности источников электроэнергии по обеспечению АНПА требуемым объемом.

В случае использования ЭХГ учитывались особенности его работы, связанные с некоторым снижением КПД при повышенном использовании топлива из-за нарушения равномерности температуры обдува топливных элементов в рабочей камере. Рассматривался вариант, при котором ЭХГ способен был выдавать до 5 кВт·с. Результаты моделирования приведены на рис. 5 пунктирной линией в виде допустимых пределов работы ЭХГ (варианты 1,2) и ЛИАБ (варианты 3–8). На этом же рис. 5 приведены сплошной линией пиковые значения потребления энергии при разгоне. Рассмотрены варианты увеличения скорости АНПА из состояния покоя: в варианте 1 – до 0,5  $V_{ЭК}$ , в варианте 2 – до  $V_{ЭК}$ .

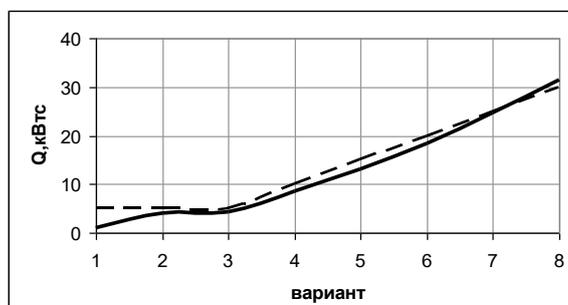


Рис. 5. Зависимость максимального энергопотребления от скорости движения

Из результатов, приведенных на рис. 5, следует, что для вариантов 1-2 возможностей ЭХГ оказалось достаточно. Что касается возможностей ЛИАБ по обеспечению АНПА, то энергоресурс АНПА зависел от количества аккумуляторов, соединенных в единую батарею. Использование чрезмерного количества аккумуляторов приводит к существенному перегрузу АНПА, недостаточное количество может не обеспечить потребности АНПА. При проведении исследований рассмотрены 6 вариантов ЛИАБ, отличающихся количеством аккумуляторов, соединенных в батарею. Каждый из вариантов характеризовался объемом выдаваемой энергии. Рассматривались варианты, обеспечивающие возможность выдачи 5, 10, 15, 20, 25 и 30 кВт·с соответственно (варианты приведены на рис. 5 пунктирной линией).

По результатам проведенных исследований оказалось, что при использовании ЛИАБ варианты 3-7 обеспечивают достижение скорости  $0,5 V_{BC} - 0,9 V_{BC}$ , а вот последний вариант 8 – лишь до 30 кВт·с, в то время как требуется свыше 30 кВт·с. Выходом из положения при имеющейся ЛИАБ может стать поэтапный разгон, исключающий необходимость резкого увеличения потребляемой энергии.

При разгоне АНПА для движения в высокоскоростном режиме также оценивалась достаточность имеющегося у ЛИАБ объема запасенной энергии. Для этого при моделировании оценивался объем энергии, необходимый для разгона и стабильного движения АНПА с целевой скоростью в течение 600 тактов. Результаты моделирования приведены на рис. 6 (варианты 3-8). По горизонтальной оси отложены варианты изменения скорости, по вертикальной – полный затраченный объем энергии  $Q$ , кВт·с.

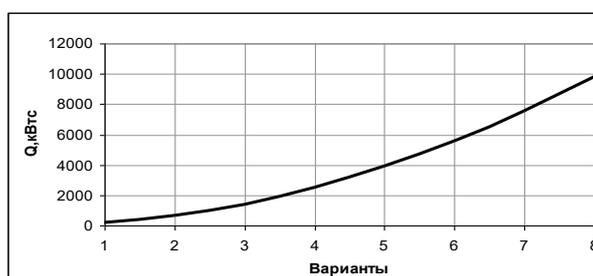


Рис. 6. Зависимость общего расхода энергоресурса от целевой скорости

Из результатов, приведенных на рис. 6 видно, что при запасе ЛИАБ, например, 4 кВт·с, энергии ЛИАБ хватит лишь для разгона до  $0,7V_{BC}$  (вариант 5), для разгона на большие скорости энергии окажется недостаточно. Детальный анализ показал, что при этом наиболее энергоемким является период нарастания энергопотребления до максимального значения. На рис. 7 приведены результаты длительности нарастания энергопотребления до максимального значения – для тех же вариантов 3-8 ускорения в высокоскоростном режиме.

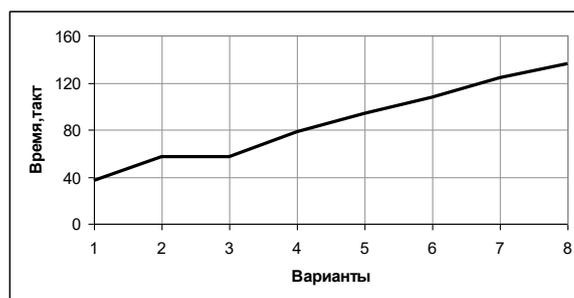


Рис. 7. Зависимость длительности нарастания энергопотребления от целевой скорости

Результаты численного эксперимента показали, что, например, для варианта 5, по крайней мере, после 100-го такта наступит спад расходимого энергоресурса. Однако при этом скорость к 100-му такту достигнет лишь 50 % от своего целевого значения.

**Заключение.** Разработан комплекс имитационных моделей, обеспечивающих формирование исходных данных для функционирования разработанной ранее математической модели работы гибридной системы энергообеспечения и составляющих ее элементов – электрохимического генератора, хранилища реагентов, литий-ионной аккумуляторной батареи, а также – математической модели движительно-рулевого комплекса, интегрированной системы управления и имитатора тактической обстановки.

Используемая в работе теория интегрированного иерархического моделирования с изменяемым разрешением, а также анализ математических моделей отдельных элементов гибридной системы обеспечения, позволили выбрать наиболее целесообразную степень детализации разрабатываемых моделей, и с учетом выбора – сформировать адекватные математические модели.

Разработанный имитационный комплекс математических моделей позволил во взаимосвязи проанализировать возможности источников электроэнергии гибридной системы энергообеспечения и потребности потребителей автономного необитаемого подводного аппарата, обеспечивающих его движение с заданными целевыми параметрами.

Разработанный комплекс математических моделей и математическую модель гибридной системы энергообеспечения планируется использовать в составе стенда отладки и сопровождения АНПА.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аполонов 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. *Мартынова Л.А.* Математическая модель работы гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата большой дальности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 212-227.
3. *Моисеев Н.Н.* Алгоритмы развития. 1987. – М.: Наука. – 350 с.
4. *Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М.: РАН, 2018. – 314 с.
5. *Davis P.K.* Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling // Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. – P. 293-302.
6. *Modeling and simulation: Technology for the United States Navy and Marine Corps*, Washington, D.C.:National Academy Press, 1997. – Vol. 9. – P. 2000-2035.
7. *Morgan G., Henrion M.* Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis. Cambridge MA: Cambridge University Press. National Research Council. 1992. – 346 p.
8. *McEver J., Davis P.K., Bigelow J.H.* Implementing multiresolution models and families of models: from entity level simulation to personal-computer stochastic models and simple repro models // Proceedings of the SPIE. – 2000. – Vol. 4026. – <https://doi.org/10.1117/12.389372>.
9. *Davis P.K.* Multiresolution multiperspective modeling (MRMPM) as an enabler of exploratory analysis. – <https://doi.org/10.1117/12.389362>.
10. *Bigelow J.H., Davis P.K., McEver J.* Case history of using entity-level simulation as imperfect experimental data for informing and calibrating simpler analytical models for interdiction. Proc. SPIE 4026, Enabling Technology for Simulation Science IV, (23 June 2000). – <https://doi.org/10.1117/12.389380>.
11. *Bankes S.C.* Exploratory modeling for policy analysis // Operations Research. – 1993. – Vol. 41, No. 3. – <https://doi.org/10.1287/opre.41.3.435>.
12. *Lempert R., Schlesinger M.E., Bankes S.C.* When we don't know the costs or the benefits: adaptive strategies for abating climate change // Climatic Change. – 1996. – Vol. 33, No. 2. – P. 235-274.

13. Lucas T. The stochastic versus deterministic argument for combat simulations: tales of when the average won't do // *Military Operations Research*. – 2000. – Vol. 5, No. 3. – DOI: 10.5711/morj.5.3.9.
14. Янченко В.С. Моделирование энергетической системы мобильной техники с топливными элементами // *Транспорт на альтернативном топливе*. – 2012. – № 3 (27). – С. 56-57.
15. Смирнов Д.Б. Моделирование распределения токов в твердооксидных топливных элементах планарной геометрии методом конечных элементов. – ИФФТ РАН, 2014. – 18 с.
16. Plett G.L. *Battery Management Systems*. Vol. 1. *Battery Modeling*. Artech House. Boston-London. 2015. – 343 p.
17. Plett G. L. *Battery Management Systems*. Vol. 2. *Equivalent-Circuit Methods*. Artech House. Boston-London. 2016. – 329 p.
18. Брянецев А.А., Букреев В.Г. Методика и алгоритм определения параметров модели Шеффа для описания нелинейной вольт-амперной характеристики заряда литий-ионного аккумулятора // *Доклады ТУСУР*. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 95-99.
19. Хандорин М. М. Метод, алгоритмы и микропроцессорное устройство оценивания параметров литий-ионной аккумуляторной батареи космического аппарата: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. – Томск, 2018. – 21 с.
20. Моделирование режима зарядки литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи с учетом разброса параметров отдельных аккумуляторов. – <http://estorsys.ru/publikatsii/116-modelirovanie-rezhima-zaryadki-litij-zhelezo-fosfatnoj-akkumulyatornoj-batarei-s-uchetom-razbrosa-parametrov-otdelnykh-akkumulyatorov> (дата обращения 06.02.2020).
21. Проценко Н.А., Лапшин В.Ю., Бледнова Ж.М. Расчетно-экспериментальная оценка распределения температур в случае технологических сбоев в работе литий-ионного аккумулятора космического назначения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2010. – Т. 12, № 4 (3). – С. 596-600.
22. Войткунский Я. И. *Справочник по теории корабля*. – Л.: Судостроение. 1985. Т. 1. – 764 с.
23. Теоретические основы управления судном. – <http://sea-library.ru/upravlenie-sudnom/359-teoreticheskie-osnovy-upravleniya-sudnom.html> (дата обращения 05.11.2019).
24. 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.

#### REFERENCES

1. Appolonov E.M., Bachurin A.A., Gorokhov A.I., Ponomarev L.O. О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата [On the possibility and necessity of creating an extra-large uninhabited underwater vehicle], *Sbornik materialov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective Systems and Control Problems"]. Rostov-on-Don – Taganrog: YuFU, 2018, pp. 34-42.
2. Martynova L.A. Matematicheskaya model' raboty gibridnoy sistemy energo-obespecheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata bol'shoi dal'nosti [A mathematical model of the hybrid energy supply system of an autonomous uninhabited underwater vehicle of long range], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203). pp. 212-227.
3. Moiseev N.N. *Algoritmy razvitiya* [Development Algorithms]. Moscow: Science, 1987, 350 p.
4. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov. [Qualimetry of models and polymodel complexes]. Moscow: RAN, 2018, 314 p.
5. Davis P.K. Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, pp. 293-302.
6. *Modeling and simulation: Technology for the United States Navy and Marine Corps*, Washington, D.C. National Academy Press, 1997, Vol. 9, pp. 2000-2035.
7. Morgan G., Henrion M. *Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. Cambridge MA: Cambridge University Press. National Research Council, 1992, 346 p.
8. McEver J., Davis P.K., Bigelow J.H. Implementing multiresolution models and families of models: from entity level simulation to personal-computer stochastic models and simple repro models, *Proceedings of the SPIE*, 2000, Vol. 4026. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.389372>.

9. *Davis P.K.* Multiresolution multiperspective modeling (MRMPM) as an enabler of exploratory analysis. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.389362>.
10. *Bigelow J.H., Davis P.K., McEver J.* Case history of using entity-level simulation as imperfect experimental data for informing and calibrating simpler analytical models for interdiction. Proc. SPIE 4026, Enabling Technology for Simulation Science IV, (23 June 2000). Available at: <https://doi.org/10.1117/12.389380>.
11. *Bankes S.C.* Exploratory modeling for policy analysis, *Operations Research*, 1993, Vol. 41, No. 3. Available at: <https://doi.org/10.1287/opre.41.3.435>.
12. *Lempert R., Schlesinger M.E., Bankes S.C.* When we don't know the costs or the benefits: adaptive strategies for abating climate change, *Climatic Change*, 1996, Vol. 33, No. 2, pp. 235-274.
13. *Lucas T.* The stochastic versus deterministic argument for combat simulations: tales of when the average won't do, *Military Operations Research*, 2000, Vol. 5, No. 3. Doi: 10.5711/morj.5.3.9.
14. *Yanchenko V.S.* Modelirovanie energeticheskoy sistemy mobil'noy tekhniki s toplivnymi elementami [Modeling the energy system of mobile equipment with fuel cells], *Transport na alternativnom toplive* [Transport on alternative fuel], 2012, No. 3 (27). pp. 56-57.
15. *Smirnov D.B.* Modelirovanie raspredeleniya tokov v tverdotsidnykh toplivnykh elementakh planarnoy geometrii metodom konechnykh elementov [Modeling the distribution of currents in solid oxide fuel cells of planar geometry by the finite element method]. IFFT RAS, 2014, 18 p.
16. *Plett G. L.* Battery Management Systems. vol. 1. Battery Modeling. Artech House. Boston-London, 2015, 334 p.
17. *Plett G. L.* Battery Management Systems. Vol. 2. Equivalent-Circuit Methods. Artech House. Boston-London, 2016, 332 p.
18. *Bryantsev A.A., Bukreev V.G.* Metodika i algoritm opredeleniya parametrov modeli Sheferda dlya opisaniya nelineynoy vol't-ampernoy harakteristiki zaryada litiy-ionnogo akkumulyatora [Methods and algorithm for determining the parameters of the Shepherd's model to describe the non-linear current-voltage characteristics of the charge of a lithium-ion battery], *Doklady TUSUR* [Doklady TUSUR], 2019, Vol. 22, No. 1. pp. 95-99.
19. *Handorin M.M.* Metod, algoritmy i mikroprocessornoe ustroystvo otsenivaniya parametrov litiy-ionnoy akkumulyatornoy baterei kosmicheskogo apparata: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Method, algorithms and microprocessor-based device for evaluating the parameters of a lithium-ion battery of a spacecraft: abstract cand. of eng. sc. diss.]. Tomsk 2018, 21 p.
20. Modelirovanie rezhima zaryadki litiy-zhelezo-fosfatnoy akkumulyatornoy baterei s uchedom razbrosa parametrov otdel'nykh akkumulyatorov [Modeling the charging mode of a lithium-iron-phosphate battery, taking into account the variation in the parameters of individual batteries]. Available at: <http://estorsys.ru/publikatsii/116-modelirovanie-rezhima-zaryadki-litii-zhelezo-fosfatnoj-akkumulyatornoj-batarei-s-uchetom-razbrosa-parametrov-otdelnykh-akkumulyatorov> (accessed 06 February 2020).
21. *Protosenko N.A., Lapshin V.Yu., Blednova Zh.M.* Raschetno-eksperimental'naya otsenka raspredeleniya temperatur v sluchae tekhnologicheskikh sboev v rabote litiy-ionnogo akkumulyatora kosmicheskogo naznacheniya [Calculation and experimental estimation of temperature distribution in the event of technological failures in the operation of a lithium-ion battery for space purposes], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2010, Vol. 12, No. 4 (3). pp. 596-600.
22. *Voitkunsky Ya. I.* Spravochnik po teorii korablya [Handbook of ship theory]. Leningrad Shipbuilding, 1985, Vol. 1, 764 p.
23. Teoreticheskie osnovy upravleniya sudnom [The theoretical basis of the management of the vessel]. Available at: <http://sea-library.ru/upravlenie-sudnom/359-teoreticheskie-osnovy-upravleniya-sudnom.html> (accessed 05 November 2019).
24. *Vasiliev K.K., Gourmet D.A.* Modelirovanie algoritmov navigatsii i upravleniya dlya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Modeling of navigation and control algorithms for autonomous uninhabited underwater vehicles], *Avtomatizatsiya processov upravleniya* [Automation of control processes], 2013, No. 3 (33), pp. 27-31.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник.

**Киселев Николай Константинович** – АО «ЦКБ «Лазурит»; e-mail: [kiselevu@gmail.com](mailto:kiselevu@gmail.com); 603951, г. Нижний Новгород, ул. Свободы, 57; тел.: 89200218810; зам. главного конструктора.

**Мартынова Любовь Александровна** – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

**Пашкевич Иван Владимирович** – e-mail: iv@bk.ru; тел.: 89119330006; главный специалист.

**Kiselev Nikolay Konstantinovith** – JSC Central Design Bureau Lazurit; e-mail: kiselevu@gmail.com; 57, Svobody av., Nizhniy Novgorod, 603951, Russia; phone: 879200218810; post-graduate student; deputy chief designer.

**Martynova Liubov Alexandrovna** – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; 30, Malaya Posadskaya av, Sankt-Peterburg, 197046, Russia; phone: +79219411395; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

**Pashkevich Ivan Vladimirovich** – e-mail: iv@bk.ru; phone: +79119330006; chief specialist.