

Н.К. Киселев, Л.А. Мартынова

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АНПА*

Целью исследований явилось управление электрической сетью гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата, предназначенного для перемещения на сверхдальние расстояния свыше десятка тысяч километров. Для преодоления сверхдальних расстояний остро стоит задача минимизации удельного потребления электроэнергии при условии обеспечения всех потребителей электроэнергией. Актуальность работы определяется новизной использования в автономных необитаемых подводных аппаратах гибридной системы энергообеспечения, состоящей из разнородных источников электроэнергии, работающих на различных физических принципах. Ввиду отсутствия на сегодняшний день исследований, связанных с управлением гибридной системой энергообеспечения, согласованным с режимами движения аппарата в широком диапазоне скоростей, возникла задача разработки алгоритмов управления гибридной системой энергообеспечения. Для решения задачи проанализированы причины изменения токопотребления при движении аппарата, сформированы необходимые условия подключения потребителей к токопроводам, включающие в себя обеспечение всех потребителей электроэнергией в полном объеме, исключение превышения номинальных токов каждого токопровода токами потребления, минимизация потерь электроэнергии при прохождении по токопроводу и через оборудование. В связи с этим были проанализированы возможные конфигурации построения электросети с использованием токопроводов и оборудования, проведены оценки потерь на токопроводах и на используемом оборудовании. По результатам исследований был сформирован граф подключений потребителей к токопроводам, и для определения пути подключения каждого потребителя к источнику энергии посредством электросети был определен путь подключения, обеспечивающий минимизацию потерь. Задача была формализована как поиск кратчайшего пути в графе, и для ее решения в качестве основы был использован алгоритм Дейкстры. По результатам исследований был сформирован алгоритм формирования путей подключения потребителей к источникам электроэнергии посредством электросети и алгоритм управления переключениями ключей в электросети при изменении токов потребления. Разработанные алгоритмы были программно реализованы, и с использованием имитационной модели проведен численный эксперимент. Результаты эксперимента показали правильность разработанных алгоритмов, и могут быть в дальнейшем использованы для реализации в разрабатываемых аппаратах для перемещения на сверхдальние расстояния.

Автономный необитаемый подводный аппарат; электрическая сеть; гибридная система энергообеспечения; источники электрической энергии; токопроводы; распределительные щиты; многоканальные преобразователи напряжения.

N.K. Kiselev, L.A. Martynova

ALGORITHMS OF ELECTRIC NETWORK CONTROL OF A HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM OF AUV

The aim of the research was to control the electrical network of a hybrid power supply system for an autonomous underwater vehicle designed to travel over ultra-long distances over tens of thousands of kilometers. To overcome ultra-long distances, the urgent task is to minimize the specific consumption of electricity, provided that all consumers are provided with electricity. The relevance of the work is determined by the novelty of using a hybrid power supply system in autonomous unmanned underwater vehicles, consisting of heterogeneous sources of electricity operating on different physical principles. Due to the lack of research to date, related to the control of the hybrid power supply system, coordinated with the modes of motion of the vehicle in a wide

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

range of speeds, the problem arose of developing control algorithms for the hybrid power supply system. To solve the problem, the reasons for the change in current consumption during the movement of the device were analyzed, the necessary conditions for connecting consumers to the bus ducts were formed, including providing all consumers with electricity in full, excluding the excess of the rated currents of each bus duct with consumption currents, minimizing electricity losses when passing through the conductor and through the equipment. In this regard, the possible configurations of the construction of the electrical network using conductors and equipment were analyzed, and losses on the current conductors and on the equipment used were estimated. Based on the results of the research, a graph of consumers' connections to the conductors was formed, and to determine the way of connecting each consumer to the energy source through the power grid, a connection path was determined that minimizes losses. The problem was formalized as finding the shortest path in a graph, and Dijkstra's algorithm was used as a basis to solve it. Based on the research results, algorithms were formed for the formation of ways to connect consumers to electricity sources through the power grid and an algorithm for controlling the switching of keys in the power grid when the consumption currents change. The developed algorithms were implemented in software, and a numerical experiment was carried out using a simulation model. The results of the experiment showed the correctness of the developed algorithms, and can be further used for implementation in the devices under development for moving over ultra-long distances.

Autonomous underwater vehicle; electrical network; hybrid power supply system; sources of electrical energy; current-wire.

Введение. В настоящее время совершенствование технологий привело к возможности создания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), способных в ходе выполнения маршрутного задания преодолевать большие расстояния в широком диапазоне скоростей [1]. Для этого первоочередной задачей становится задача минимизации удельного потребления электроэнергии при условии обеспечения всех потребителей электроэнергией. Дело в том, что при движении АНПА в широком диапазоне скоростей потребление электроэнергии происходит также в широком диапазоне. Для этого используют гибридную систему энергообеспечения (СЭО), состоящую из разнородных источников электроэнергии, работающих на различных физических принципах [2]. В связи с этим необходимо постоянно регулировать объемы вырабатываемой электроэнергии в зависимости от скорости движения АНПА, в противном случае произойдет существенный перерасход электроэнергии, его может оказаться недостаточным для преодоления заданного маршрута, что приведет к снижению эффективности функционирования АНПА [3]. Для соединения потребителей с источниками электроэнергии в электросети используют токопроводы [4]. Для приведения в соответствие параметров энергии потребления и параметров вырабатываемой электроэнергии в электросети АНПА используют дополнительное оборудование: распределительные щиты (РЩ), многоканальные преобразователи напряжения (МПН) и ключи [5]. Однако перечисленное оборудование является источником дополнительных потерь электроэнергии. В результате складывается ситуация, при которой удельный расход электроэнергии определяется не только токами потребления, но и потерями, связанными с избыточными номинальными токами токопроводов, и потерями на используемое дополнительное оборудование [6].

В связи со сказанным для управления электросетью синхронно с режимом движения АНПА необходимо разработать такие алгоритмы управления электросетью АНПА при изменении токов потребления, которые обеспечивали бы минимизацию потерь электроэнергии.

Ранее разработаны модели и алгоритмы интеллектуального управления параметрами регулирующих устройств в цифровых электросетях применительно к промышленным и бытовым электросетям [7]. Ввиду новизны использования гибридной СЭО в АНПА, предназначенного для выполнения длительной маршрутного задания, задача управления электросетью гибридной СЭО АНПА ранее не рассматривалась и не решалась.

Цель работы: разработка алгоритмов управления электрической сетью гибридной системы энергообеспечения АНПА, способного двигаться в широком диапазоне скоростей по протяженному маршруту.

1. Постановка задачи. Пусть в момент времени t при движении АНПА задействованы источники электроэнергии, которые подключены к токопроводам, и к этим же токопроводам подключены исполнительные устройства – потребители – для обеспечения движения АНПА и его жизнедеятельности. Подключение потребителей к токопроводам осуществляется с использованием ключей. Каждый потребитель характеризуется напряжением и током потребления, который, в общем случае, меняется с течением времени. Полагаем, что диапазоны изменения тока потребления известны.

Все потребители условно делятся на постоянно задействованных потребителей и периодически подключаемых потребителей. Постоянно задействованными потребителями являются устройства, приборы и механизмы, без которых движение и жизнедеятельность АНПА невозможны, и удельное потребление тока которых с течением времени не меняется, например, система управления, вычислительные модули и др. Периодически подключаемыми являются потребители, которые периодически включаются/выключаются: носовые рули, уравнительно-дифференциальная система и др.

Дополнительное оборудование – распределительные щиты (РЩ) и многоканальные преобразователи (МПН) – параллельно-последовательно соединяет токопроводы, в результате чего формируется путь прохождения тока от источника к потребителям. В общем случае номинальные токи токопроводов различны. Таким образом, пути прохождения тока от источника к каждому потребителю характеризуются количеством токопроводов, их номинальными токами, количеством РЩ и МПН, соединяющих используемые токопроводы.

Использование токопроводов с определенными номинальными токами может привести к потерям электроэнергии в случае, если ток потребления значительно меньше номинального тока. Кроме того, к потерям электроэнергии приводит использование дополнительного оборудования в связи с дополнительными мерами защиты РЩ и МПН от превышения допустимых токов. В результате необходимо так подключить потребителей к источникам электроэнергии, чтобы:

- ◆ все потребители были обеспечены электроэнергией в полном объеме;
- ◆ токи потребления не превышали номинальных токов каждого токопровода;
- ◆ потери электроэнергии при прохождении по токопроводу и через оборудование были бы минимальными.

В процессе движения АНПА возможно изменение токопотребления в электросети по следующим причинам.

Первая причина связана с увеличением (уменьшением) потребляемого тока с течением времени у одного или нескольких потребителей, например, у маршевого движителя на разгонном участке траектории движения АНПА, в результате чего происходит увеличение общего потребляемого тока до уровня, превышающего номинальный ток токопровода, к которому подключен потребитель. В этом случае необходимо подключение дополнительных токопроводов, но так, чтобы потери энергии в электросети оставались минимальными.

Вторая причина связана с подключением (отключением) дополнительных исполнительных устройств, например, из-за попадания АНПА в подводное течение, в результате чего для удифференцирования АНПА необходимо дополнительное изменение параметров уравнительно-дифференциальной системы. В этом и подобных случаях к работающим исполнительным устройствам добавляется еще один потребитель – в данном случае уравнительно-дифференциальная система.

Третья причина связана с поступлением команды на изменение параметров движения АНПА для перехода, например, в высокоскоростной режим. Это приведет к изменению состава исполнительных устройств, обеспечивающих движение АНПА с заданными параметрами, и, следовательно, к изменению токопотребления. Причем потребление этими новыми устройствами с течением времени может меняться.

Во всех перечисленных ситуациях в момент времени $t+1$ возникает задача определения алгоритма задействования дополнительных токопроводов (или отключения) и формирования новых путей подключения потребителей к источникам электроэнергии. Алгоритм должен быть направлен на дополнительное подключение к уже сформированным путям прохождения тока от источников к потребителям, либо на полную реконфигурацию электросети с точки зрения пересмотра путей подключения потребителей к электросети – по аналогии с реконфигурацией системы управления движением [8, 9].

И в том, и в другом случае возникает необходимость решения двух задач: первая – формирование путей соединения потребителей с источниками энергии посредством электросети на момент $t+1$ с минимальными потерями электроэнергии; вторая – перевод подключений потребителей к электросети из состояния на момент времени t в состояние на момент времени $t+1$.

Особенность первой задачи заключается в том, что подключение на момент $t+1$ с минимальными потерями электроэнергии возможно тогда, когда токи потребления не превышают номинальные токи, а токопровод рассчитан на токи, близкие к токам потребления. Очевидно, что из-за переменного состава потребителей и потребляемого ими тока такое равновесное состояние практически невыполнимо. Поэтому необходимо выбрать подключение так, чтобы при распределении потребителей по токопроводам разность суммарного номинального тока по токопроводам и суммарного тока потребления была минимальна [10]:

$$\Delta_t = \sum_{i=1}^{B_t} V_i - \sum_{j=1}^{m_t} I_j \rightarrow \min \quad \forall t \in [0, T], \quad (1)$$

где V_i – номинальный ток i -го токопровода; I_j – ток потребления j -м потребителем; B_t – количество задействованных в момент t токопроводов; m_t – количество потребителей, подключенных к токопроводам в момент времени t ; T – длительность выполнения маршрутного задания.

Вторым источником потерь электросети является минимизация потерь на используемом оборудовании (РЩ и ИМПН), зависящая от количества оборудования и потерь на каждом элементе оборудования. В связи этим необходимо строить такой путь, соединяющий каждого потребителя с источниками, при котором потери были бы минимальными.

На рис. 1 представлена электросеть, обеспечивающая подключения потребителей к источникам электроэнергии.

Пусть модель подключений потребителей к токопроводам имеет вид:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (2)$$

где A – матрица размерности $m \times m$ состояния подключений всех потребителей к токопроводам.

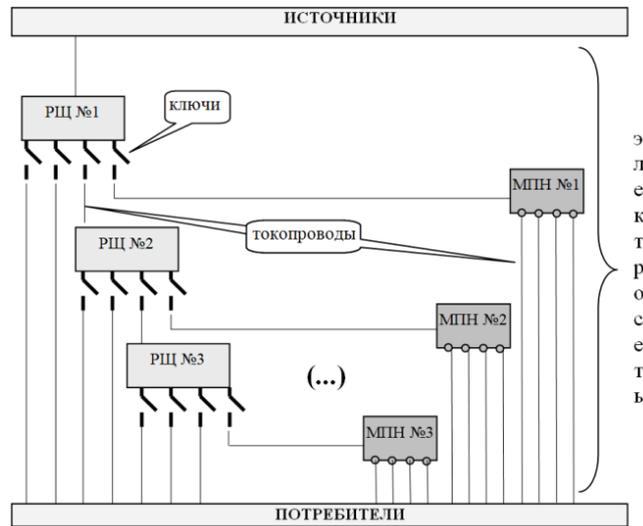


Рис. 1. Электрическая сеть, включающая в себя РЦ, МПН, ключи и токопроводы

Представим матрицу \mathbf{A} в виде:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_c \quad \mathbf{A}_v],$$

где \mathbf{A}_c – матрица постоянных потребителей размерности $m \times j$, $0 < m < j$; \mathbf{A}_v – матрица переменных потребителей размерности $(j-m) \times j$.

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{m1} \\ a_{12} & \dots & a_{m2} \\ a_{1\dots} & \dots & a_{m\dots} \\ a_{1j} & \dots & a_{mj} \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_v = \begin{bmatrix} a_{m+11} & \dots & a_{n1} \\ a_{m+12} & \dots & a_{n2} \\ a_{m+1\dots} & \dots & a_{n\dots} \\ a_{m+1j} & \dots & a_{nj} \end{bmatrix}$$

Матрица \mathbf{A} по горизонтали (по столбцам) содержит значения токов всех постоянных потребителей. Значения токов переменных потребителей равно 0. Матрица \mathbf{B} по структуре полностью совпадает с матрицей \mathbf{A} , однако значения элементов матрицы \mathbf{B} отличаются: на местах постоянных потребителей стоят 0, а на местах переменных потребителей – значения потребляемых ими токов.

Обозначим элементы матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} через a_{ij} , $i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, n$; i – номер токопровода, j – номер потребителя, подключенного к i -ому токопроводу, n – количество потребителей, характеризуемых током потребления и напряжением.

Состояние x_t характеризуется таким подключением потребителей к токопроводам в момент времени t , при котором целое число токопроводов B_t минимально, и разбиение множества $\{1, \dots, n\}$ на B_t подмножеств $S_1 \cup \dots \cup S_{B_t}$ такое, что $\sum a_{ij} \leq V_i$, V_i обозначает различные номинальные значения тока i -го токопровода, ограничивающие ток потребления данного токопровода.

Состояние x_t в момент времени t таково, что:

$$B_t = \sum_{i=1}^n y_i \rightarrow \min \quad (3)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \leq V_i y_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\} \quad (5)$$

$$y_i \in \{0;1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0;1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}, \quad (7)$$

где $y_i = 1$, если потребитель подключен к i -ому токопроводу, $y_i = 0$ – если не подключен; $x_{ij} = 1$, если потребитель j подключен к токопроводу i и $x_{ij} = 0$ – если не подключен.

Особенность второй задачи по управлению электросетью заключается в том, что в некоторый момент времени $t+1$ может оказаться, что часть потребителей больше не нуждается в электропитании, а другая часть, наоборот, требует подключения к токопроводам.

Обозначим текущее состояние подключения потребителей к токопроводам в момент времени $t+1$ через x_{t+1} .

Необходимо найти такое управление u_t , которое переводило бы подключения потребителей к источникам электроэнергии из одного состояния x_t в другое состояние x_{t+1} , обеспечивающее минимизацию потерь электроэнергии в электросети.

Таким образом, для определения алгоритмов управления гибридной СЭО необходимо разработать:

- ♦ алгоритм определения подключения потребителей к источникам посредством электросети в момент времени $t+1$, обеспечивающий минимизацию потерь электроэнергии в электросети;

- ♦ алгоритм управления гибридной СЭО, переводящей ее из состояния в момент времени t в состояние на момент времени $t+1$ такое, которое бы обеспечивало минимальные потери электроэнергии.

2. Алгоритм подключения потребителей к источникам. Прохождение тока от источника до потребителя, включающее в себя прохождение тока по последовательно соединенным токопроводам и соединяющим их оборудованию может быть разными путями. На рис. 2 приведены 3 возможных пути подключения потребителя к источнику, отличающиеся используемыми токопроводами и дополнительным оборудованием: в пути 1 использован 1 токопровод и 1 РЩ, в пути 2 – 2 токопровода и 2 РЩ, в пути 3 – 3 токопровода и 3 РЩ.

Из возможных вариантов необходимо выбрать такой вариант, представляющий собой путь от источника до потребителя, который бы обеспечивал минимальные потери электроэнергии.

Представим все возможные варианты подключения потребителей в виде связного ориентированного взвешенного графа G , в котором узлами являются элементы оборудования (РЩ и МПН), а ребрами - токопроводы. На рис. 3 каждому токопроводу присвоен номер: первая цифра номера является номером узла, из которого вышел токопровод, вторая цифра показывает порядковый номер узла, из которого выходит токопровод.

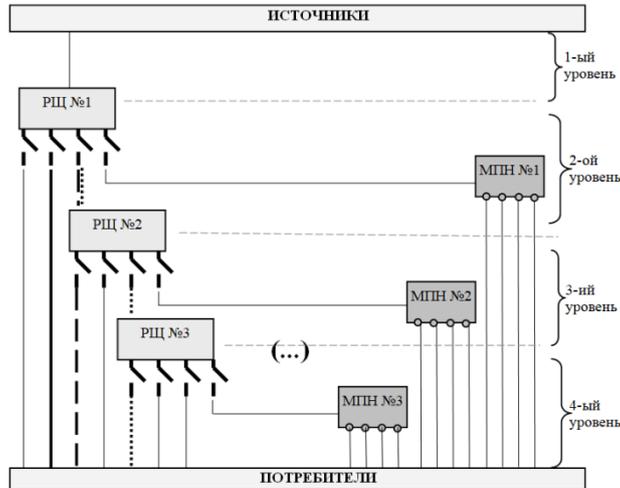


Рис. 2. Альтернативные варианты путей прохождения тока: путь 1 – сплошная линия, путь 2 – пунктирная линия, путь 3 – точечная линия

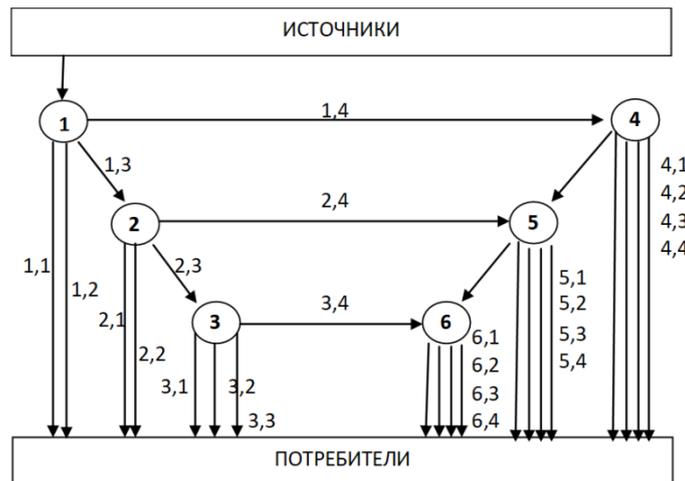


Рис. 3. Вид связанного взвешенного графа электросети, представленной на рис. 2

Количественно узлы графа характеризуются весами, равными потерям электроэнергии при прохождении тока через оборудование данного узла.

Путь тока от источника до потребителя представляет собой в графе G последовательный переход по токопроводам от одного узла к другому.

Количественно узлы графа характеризуются потерями электроэнергии при прохождении тока через оборудование данного узла, ребра графа характеризуются потерями, возникающими в токопроводах из-за несоответствия токов потребления номинальным токам токопроводов.

Потери Δ_t^i электроэнергии в i -м токопроводе в момент времени t при подключении потребителя с током I_j определяются выражением:

$$\Delta_t^i = V_i - I_j, \tag{8}$$

Пусть в некотором j -м пути, соединяющем j -го потребителя с источниками электроэнергии, используются K токопроводов и, соответственно, $K-1$ единиц оборудования – РЩ и МПН.

Тогда при использовании K последовательно соединенных токопроводов потери Δ_t в пути определяются выражением:

$$\Delta_t = \sum_{k=1}^K \Delta_t^i, \quad (9)$$

Суммарные потери на токопроводах и соединяющем оборудовании в рамках пути тока от источника к потребителю определяются выражением:

$$\Delta_t^i = \sum_{k=1}^K \left((V_k - I_j) + P_k^R + P_k^T \right) \quad (10)$$

где P_k^R – потери на РЩ k -го токопровода; P_k^T – потери на МПН k -го токопровода.

При формировании пути соединения потребителя с источником электроэнергии разделим путь условно на уровни, где уровень определяется токопроводом и узлом, в который он входит. На первом уровне токопровод исходит от источника и входит в РЩ или МПН, на втором уровне путь исходит из РЩ или МПН, в который пришел путь первого уровня, и входит в РЩ или МПН второго уровня, и т.д. до тех пор, пока путь не дойдет до токопровода, соединяющего непосредственно с потребителем. В общем случае количество уровней находится в диапазоне от 1 до количества используемых РЩ и МПН в электросети АНПА. Так, на рис. 2 представлена электросеть, в которой 4 уровня.

В связи с этим необходимо выбрать такие пути подключения потребителей к источникам электроэнергии, чтобы потери Δ_t^i в токопроводах каждого пути, соединяющего потребителя с источником, были минимальными:

$$\Delta_t = \sum_{j=1}^{m_t} \sum_{i=1}^{B_t} \Delta_t^i \rightarrow \min \quad \forall t \in [0, T], \quad (11)$$

Тогда задача поиска пути подключения потребителя к источнику может быть формализована как задача поиска кратчайшего пути в графе по критерию минимизации потерь.

Задача поиска кратчайшего пути в графе широко известна [11], и одним из решений задачи является алгоритм Дейкстры [12–20]. При использовании алгоритма Дейкстры последовательно, начиная с самого первого узла, в каждом узле оценивается расстояние до смежных узлов, и следующим в пути выбирается тот узел, расстояние до которого оказалось наименьшим. На каждой итерации какие-то узлы будут помечены, а какие-то нет. Для каждого узла будет храниться длина кратчайшего пути, проходящего только по помеченным узлам в качестве «пересадочных». На каждой итерации определяется узел с наименьшим значением в d среди помеченных; пусть, например, это узел v . Тогда значение $d[v]$ является ответом для v . Количество операций определяется тем, что выбор пути определен за n итераций по n итераций (на поиск узла v), итого порядка n^2 операций.

Применительно к рассматриваемой задаче алгоритм Дейкстры был доработан, а именно в алгоритме Дейкстры был учтен тот факт, что путь до смежного узла определяется не только весом ребра, но и весом узла, в который это ребро пришло. На результат выбора пути это не оказывает влияния, поскольку узел однозначно соответствует ребру-токопроводу, который входит в этот узел.

В результате доработки алгоритма Дейкстры был разработан следующий алгоритм определения пути подключения потребителя к источнику.

В момент времени $t+1$ после увеличения тока потребления (например, в результате поступления нового потребителя):

Шаг 1. Сортируем потребителей в порядке убывания токов потребления;

Шаг 2. Берем первого потребителя с максимальным током потребления;

Шаг 3. Сортируем токопроводы каждого из уровней в порядке убывания номинального тока, причем ранжируем при равных номинальных токах так, чтобы в первую очередь использовать прямое подключение, во вторую – через один узел, в третью – через два узла и т.д.

Начинаем с первого уровня.

Шаг 4. Берем токопровод текущего уровня с номинальным током, наиболее близким к току потребления рассматриваемого потребителя, и прослеживаем возможность его подключения до потребителя с учетом ограничений на номинальные токи. Если такой возможности не обеспечивается, берем следующий токопровод текущего уровня и повторяем процедуру шага 4.

Если такая возможность обеспечивается, то считаем, что полученный путь и является искомым путем, рассчитываем потери в построенном для текущего потребителя пути с учетом потерь оборудования, соединяющего токопроводы смежных уровней. Кроме того, фиксируем оставшийся после подключения потребителя свободный ресурс токопровода по номинальному току за вычетом тока потребления уже подключенного потребителя, чтобы при рассмотрении следующего потребителя сохранить возможность использования данного токопровода для его подключения.

Шаг 5. Берем следующего потребителя и переходим к шагу 3.

Если текущий потребитель последний – выходим из алгоритма и считаем, что процесс подключения потребителей к электросети – завершен, и все потребители оказались в состоянии подключения к электросети.

В результате применения разработанного алгоритма подключение потребителей к источникам электроэнергии средствами электросети обеспечивает минимальные потери электроэнергии в сети.

Получение распределения потребителей по токопроводам позволяет перейти к решению задачи разработки алгоритма управления гибридной СЭО для перевода ее из одного состояния в другое.

3. Алгоритм управления гибридной СЭО. Управление электросетью в формализованном виде представим следующим образом.

Пусть в момент t решение по приведенному выше алгоритму имеет вид B_t , а вектор y_i имеет вид [6]:

$$y_i(t) = [y_1(t) \quad \dots \quad y_n(t)].$$

Пусть в процессе функционирования АНПА известно, что в момент $t+1$ необходимо отключить одних потребителей и подключить других. Тогда, следуя выражению (2) на момент $t+1$, в результате применения предложенного алгоритма получим решение $y_i(t+1) = [y_1(t+1) \quad \dots \quad y_n(t+1)]$ такое, при котором:

$$B_{t+1} \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $B_{t+1} = \sum_{i=1}^n y_i(t+1)$. Тогда искомое управление u_t определяется выражением $u(t) = y(t+1) - y(t)$.

Продемонстрируем на примере применение предложенного эвристического алгоритма управления гибридной СЭО.

4. Проведение численного эксперимента. Проведение численного эксперимента было направлено на оценку изменения потерь электроэнергии с увеличением тока потребления. Такие исследования необходимы для оценки удельного расхода электроэнергии в зависимости от тока потребления и задействованного в электросети оборудования, определяемого режимом движения АНПА.

Для проведения численного эксперимента описанные алгоритмы были встроены в математические модели функционирования гибридной системы энергообеспечения [21–24]. При приведении численного эксперимента была использована электросеть, вид которой приведен на рисунке 1.

Для проведения численного эксперимента:

- ◆ задаемся номинальными токами каждого токопровода;
- ◆ задаемся потерями каждого РЩ и каждого МПН;
- ◆ задаемся стартовым значением тока потребления, соответствующего минимальному.

Из графа, приведенного на рис. 3, видно, что при подключении потребителя к электросети, в первую очередь будет задействован токопровод, приходящий в узел 1. При дальнейшем построении пути подключения потребителя к токопроводам возможны 7 альтернативных вариантов:

- (1,1);
- (1,2);
- (1,3) → (2,1);
- (1,3) → (2,2);
- (1,3) → (2,3) → (3,1);
- (1,3) → (2,3) → (3,2);
- (1,3) → (2,3) → (3,2);

при условии, что номинальные токи токопроводах в перечисленных вариантах не превышают ток потребления первого потребителя.

Пусть для подключения первого потребителя выбран вариант номер 1. При подключении второго потребителя остаются те же, за исключением уже выбранного (1,1), и т.д.

Аналогичная ситуация происходит в случае, когда необходимо понизить напряжение и использовать для этого МПН. Как следует из рис. 1, для подключения потребителя через МПН существует $3 \times 4 = 12$ вариантов.

В ходе численного эксперимента были рассмотрены три алгоритма построения пути в графе:

- ◆ полный перебор всех возможных вариантов подключения после отключения потребителя;
- ◆ добавление на первый подходящий токопровод;
- ◆ пересмотр всей сети с учетом описанных выше алгоритмов.

Главное окно программы, реализующей разработанные алгоритмы, представлено на рис. 4.

При проведении численного эксперимента запускался таймер, и с течением времени происходило изменение тока потребления. По мере увеличения тока потребления задействованных токопроводов оказывалось недостаточно, в связи с чем происходил анализ еще не задействованных токопроводов, и по описанному выше алгоритму определялся путь подключения потребителей к источникам, обеспечивающий минимальные потери. На экране в главном окне программы отображались результаты пошагового подключения токопроводов по критерию минимизации потерь и постепенное подключение соответствующего оборудования. Расчеты потерь в электросети осуществлялись с использованием выражений (8) – (10).

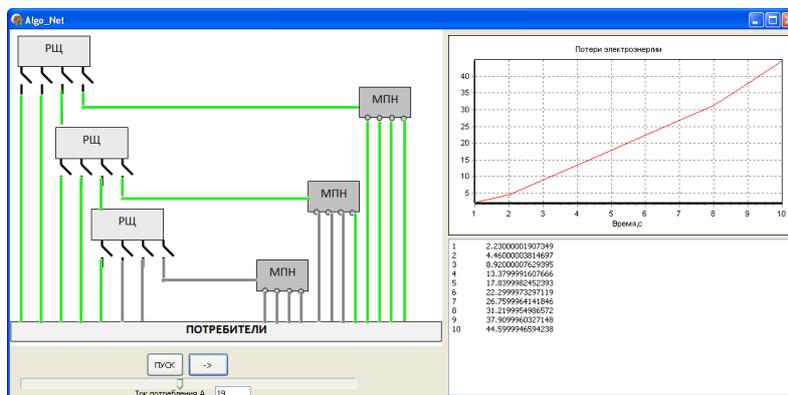


Рис. 4. Вид главного окна программы Algo_Net

Численный эксперимент проводился в два этапа.

На первом этапе численного эксперимента исследовалось влияние потерь в каждом токопроводе на потери во всей электросети. Это необходимо для учета при выборе параметров токопровода (номинальный ток) на этапе проектирования электросети.

Для проведения численного эксперимента принимались следующие исходные данные: номинальный ток токопровода – 1 нормированная единица (далее – н.е.), потери на каждом МПН и РЩ – 0,1 н.е.

В ходе проведения численного эксперимента ток потребления менялся от 1 н.е. (идеальный вариант, при котором потери токопровода равны нулю) до 0,55 н.е., поскольку если ниже 0,5 н.е., то можно по два потребителя на один токопровод подключить.

Полученные результаты представлены на рис. 5.

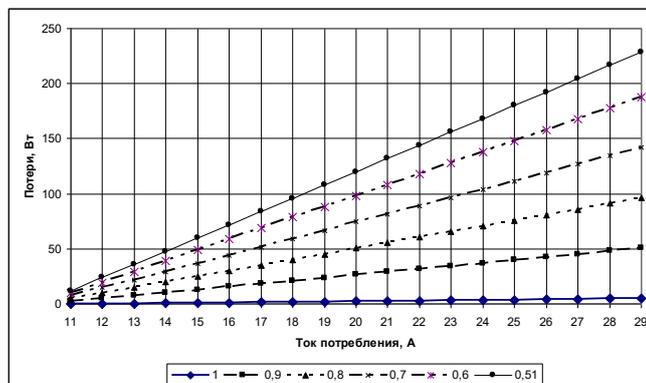


Рис. 5. Зависимость потерь электроэнергии в сети от потерь в токопроводе

Из результатов, представленных на рис. 5 видно, что:

1) с уменьшением тока потребления на каждом токопроводе потери на токопроводе увеличивались, в результате чего общие потери в электросети – также увеличивались. Так, при уменьшении тока потребления с 1,0 до 0,51 потери в электросети возросли на 250 Вт.

2) в связи с тем, что потери в токопроводах были намного больше потерь на РЩ и МПН, далее целесообразно было рассмотреть вариант, при котором потери на токопроводах и дополнительном оборудовании близки по своим значениям.

На втором этапе численного эксперимента целью эксперимента являлось проанализировать работу алгоритмов при различных токах потребления и оценить влияние потерь на токопроводах и оборудовании – на потери в электросети, в частности, с какого момента эти потери начнут превышать потери на оборудовании, то есть характер графика изменится. Эти результаты необходимы для того, чтобы оценить ожидаемый удельный расход для прогнозирования при планировании маршрутного задания и объема запасов электроэнергии. Кроме того, эксперимент был необходим для тестирования разработанных алгоритмов управления электросетью гибридной СЭО. Цель исследований – оценить взаимозависимость потерь на токопроводе и на оборудовании, чтобы оно было сбалансировано, то есть при проектировании, важно понять, сколько оборудования можно использовать, какие потери при этом будут, как они будут сочетаться с потерями на токопроводах и под какие номинальные токи проектировать токопроводы.

В ходе проведения исследований были рассмотрены варианты:

- ◆ вариант 1 – (0,9/1) 10 % потерь на токопроводах и единичные потери на оборудовании;
- ◆ вариант 2 – (0/2) нулевые потери на токопроводе и двойные потери на оборудовании;
- ◆ вариант 3 – (0/2,3) нулевые потери на токопроводе и превышающие двукратные потери на оборудовании.

Результаты исследований приведены на рис. 6.

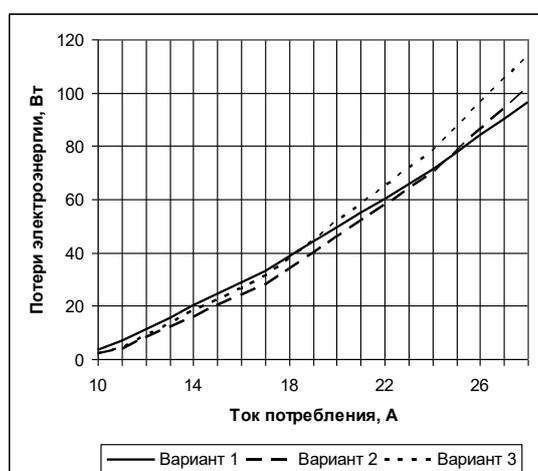


Рис. 6. Зависимость потерь электроэнергии от потерь в токопроводах и потерь на оборудовании (РЩ и МПН)

Результаты исследований показали, что все зависимости носят нелинейный характер, и наклон кривой зависит от количества используемого оборудования и потерь на нем – при нулевых потерях на токопроводах, и от потерь на токопроводе, если они не нулевые. Так, при отсутствии потерь на токопроводах (вариант 2 и вариант 3) характер кривой имеет больший наклон в связи с тем, что возросли потери на оборудовании по сравнению с вариантом 1. В то же время в варианте 1 были потери как на токопроводах, так и на оборудовании.

Из результатов, приведенных на рисунке 5, видно, что при незначительных токах потребления потери больше в варианте 1 с ненулевыми потерями в токопроводе. Причинами этого является то, что еще нет необходимости подключать оборудование, поэтому потери определяются в большинстве своем потерями токопроводов.

По мере увеличения тока потребления происходит подключение дополнительного оборудования и, как следствие, возникает изменение соотношения между потерями на оборудование и потерями в токопроводах.

Таким образом, при малых токах потребления требуется незначительное количество дополнительного оборудования, поэтому потери в большей степени связаны с потерями на токопроводах. С увеличением тока потребления происходит подключение дополнительного оборудования, и возникающие на них потери постепенно увеличиваются и перекрывают потери токопроводов. В результате получается, что:

- ♦ в Варианте 1 основные потери возникают в токопроводах, поэтому потери плавно нарастают;

- ♦ в Варианте 2 потери на токопроводах – нулевые, поэтому потери возникают от использования оборудования, и с подключением оборудования они резко возрастают.

Результаты исследований позволили определить, при каких номинальных токах необходимо стремиться к минимизации потерь на токопроводах, а когда выбирать номинальные токи токопроводов так, чтобы потери были согласованы с потерями на оборудовании.

Заключение. Рассмотрена задача управления гибридной системой энергообеспечения, работающей синхронно с системой управления движением многоскоростного автономного необитаемого подводного аппарата.

Разработан алгоритм подключения потребителей к источникам электроэнергии посредством электросети. В основу выбора варианта подключения положен алгоритм поиска кратчайшего пути в графе, доработанный с учетом особенностей источников потерь в электросети.

Разработан алгоритм управления электросетью при изменении токов потребления, основанный на переходе электросети из одного состояния в другое с сохранением условия минимизации потерь электроэнергии в электросети.

Разработанные алгоритмы встроены в модель функционирования гибридной системы энергообеспечения и АНПА в целом. С использованием программной реализации получены результаты, позволяющие учесть особенности формирования потерь при проектировании электросети АНПА, ее токопроводов, выбора количества и параметров дополнительного оборудования – распределительных щитов и многоканальных преобразователей напряжения.

Результаты исследований в дальнейшем планируется использовать для реализации алгоритмов управления электрической сетью гибридной системы энергообеспечения в разрабатываемых АНПА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. *Боженков Ю.А., Зайцев А.Д.* Гибридные энергоустановки автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводное морское оружие. – 2018. – № 3 (40). – С. 49-59.
3. *Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.* Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016). – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 205-209.

4. Бакуменко Л.Г., Дядик А.Н., Сурин С.Н. Использование электрохимических генераторов на автономных необитаемых подводных аппаратах // Системы управления и обработки информации. – 2018. – Вып. 1 (40). – С. 61-68.
5. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 952 с.
6. Киселев Н.К., Мартынова Л.А. Разработка эффективной гибридной системы генерации и распределения электроэнергии автономного необитаемого подводного аппарата // Матер. конференции «Управление в морских системах» (УМС-2020). – С. 53-56.
7. Мартынюк М.В. Модели и алгоритмы интеллектуального управления параметрами регулирующих устройств в цифровых электросетях: дисс. ... канд. тех. наук. – Н. Новгород, 2019. – 190 с.
8. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Подход к реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Гирокоспия и навигация. – 2020. – Т. 28, № 2 (109). – С. 131-146.
9. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 50-58.
10. Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Безрук Г.Г. Эффективное управление гибридной системой генерации и распределения электроэнергии при движении автономного необитаемого подводного аппарата // Проблемы управления. – 2020. – № 4. – С. 70-80.
11. Томас Кормен, Чарльз Лейзерсон, Рональд Ривест, Клиффорд Штайн. Алгоритмы. Построение и анализ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2013. – 1328 с.
12. Dijkstra E.W. A Discipline of Programming. – Prentice-Hall, 1976. – 217 с.
13. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs (англ.) // Numer. Math. – 1959. – Vol. 1, Issue 1. – P. 269-271. – ISSN 0029-599X;0945-3245. – DOI: 10.1007/BF01386390.
14. Anderson J.A. Discrete Mathematics with Combinatorics. – 2nd ed. – Prentice Hall, 2003.
15. Levitin A. Introduction to the design & analysis of algorithms. – 3rd ed. – Addison-Wesley, 2012.
16. Dial Robert B. Algorithm 360: Shortest-path forest with topological ordering [H] // Communications of the ACM. – 1969. – No. 12 (11). – P. 632-633. – DOI: 10.1145/363269.363610. S2CID 6754003.
17. Fredman Michael Lawrence, Tarjan Robert E. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms // 25th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE. 1984. – P. 338-346. – DOI: 10.1109/SFCS.1984.715934.
18. Fredman Michael Lawrence, Tarjan Robert E. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms // Journal of the Association for Computing Machinery. – 1987. – Vol. 34 (3). – P. 596-615. – DOI: 10.1145/28869.28874. S2CID 7904683.
19. Zhan F. Benjamin, Noon Charles E. Shortest Path Algorithms: An Evaluation Using Real Road Networks // Transportation Science. – 1998. – Vol. 32 (1). – P. 65-73. – DOI: 10.1287/trsc.32.1.65. S2CID 14986297.
20. Leyzorek M., Gray R.S., Johnson A.A., Ladew W.C., Meaker Jr., S.R., Petry R.M., Seitz R.N. Investigation of Model Techniques – First Annual Report – 6 June 1956 – 1 July 1957. – A Study of Model Techniques for Communication Systems. 1957. Cleveland, Ohio: Case Institute of Technology.
21. Мартынова Л.А. Математическая модель гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата большой дальности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 223-238.
22. Киселев Н.К., Мартынова Л.А., Пашкевич И.В. Математическая модель функционирования гибридной системы энергообеспечения в составе стенда отладки и сопровождения АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 170-187.
23. Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В. Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Тр. Восьмой Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017). – СПб.: Изд-во ВВМ, 2017. – С. 474-479.
24. Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Диспетчер мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: структура, алгоритмы, результаты моделирования // Гирокоспия и навигация. – 2020. – Т. 28, № 3 (110). – С. 109-121.

REFERENCES

1. *Appolonov E.M., Bachurin A.A., Gorokhov A.I., Ponomarev L.O.* O vozmozhnosti i neobkhodimosti sozdaniya sverkhbol'shogo neobitaemogo podvodnogo apparata [On the possibility and necessity of creating an extra-large uninhabited underwater vehicle], *Sb. 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. *Bozhenov Yu.A., Zaytsev A.D.* Gibridnye energoustanovki avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Hybrid power plants of autonomous non-manned underwater vehicles], *Podvodnoe morskoe oruzhie* [Underwater sea weapons], 2018, No. 3 (40), pp. 49-59.
3. *Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V.* Podkhody k otsenke effektivnosti avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Approaches to assessing the effectiveness of an autonomous unmanned underwater vehicle], *Upravlenie v morskikh i aerokosmicheskikh sistemakh (UMAS-2016)* [Management in marine and aerospace systems (UMAS-2016)]. Saint Petersburg: AO «Kontsern «TSNII «Elektroprigor»», 2016, pp. 205-209.
4. *Bakumenko L.G., Dyadik A.N., Surin S.N.* Spol'zovanie elektrokhimicheskikh generatorov na avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatakh [The use of electrochemical generators on autonomous unmanned underwater vehicles], *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* [Control systems and information processing], 2018, Issue 1 (40), pp. 61-68.
5. *Idel'chik V.I.* Elektricheskie sistemy i seti: uchebnyy dlya VUZov [Electrical systems and networks: textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 952 p.
6. *Kiselev N.K., Martynova L.A.* Razrabotka effektivnoy gibridnoy sistemy generatsii i raspredeleniya elektroenergii avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Development of an effective hybrid system for the generation and distribution of electricity for an autonomous unmanned underwater vehicle], *Mater. konferentsii «Upravlenie v morskikh sistemakh» (UMS-2020)* [Proceedings of the conference "Management in marine systems" (UMS-2020)], pp. 53-56.
7. *Martynyuk M.V.* Modeli i algoritmy intellektual'nogo upravleniya parametrami reguliruyushchikh ustroystv v tsifrovyykh elektrosetyakh: diss. ... kand. tekhn. nauk [Models and algorithms for intelligent control of parameters of regulating devices in digital power grids: cand. of eng. sc. diss.]. Nizhny Novgorod, 2019, 190 p.
8. *Martynova L.A., Rozengauz M.B.* Podkhod k rekonfiguratsii sistemy upravleniya dvizheniem avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Approach to the reconfiguration of the motion control system of an autonomous unmanned underwater vehicle], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2020, Vol. 28, No. 2 (109), pp. 131-146.
9. *Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V., Sokolov A.I.* Algoritmy, realizuemye integrirovannoy sistemoy upravleniya ANPA [Algorithms implemented by the integrated control system of AUV], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 50-58.
10. *Martynova L.A., Kiselev N.K., Bezruk G.G.* Effektivnoe upravlenie gibridnoy sistemoy generatsii i raspredeleniya elektroenergii pri dvizhenii avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Effective control of a hybrid system of generation and distribution of electricity during the movement of an autonomous unmanned underwater vehicle], *Problemy upravleniya* [Control problems], 2020, No. 4, pp. 70-80.
11. *Tomas Kormen, Charl'z Leyzerson, Ronal'd Rivest, Klifford Shtayn.* Algoritmy. Postroenie i analiz [Algorithms. Construction and analysis]. Moscow: OOO «I.D. Vil'yams», 2013, 1328 p.
12. *Dijkstra E.W.* A Discipline of Programming. Prentice-Hall, 1976, 217 p.
13. *Dijkstra E.W.* A note on two problems in connexion with graphs (eng.), *Numer. Math.*, 1959, Vol. 1, Iss. 1, pp. 269-271. ISSN 0029-599X;0945-3245. DOI:10.1007/BF01386390.
14. *Anderson J.A.* Discrete Mathematics with Combinatorics. 2nd ed. Prentice Hall, 2003.
15. *Levitin A.* Introduction to the design & analysis of algorithms. 3rd ed. Addison-Wesley, 2012.
16. *Dial Robert B.* Algorithm 360: Shortest-path forest with topological ordering [H], *Communications of the ACM*, 1969, No. 12 (11), pp. 632-633. DOI: 10.1145/363269.363610. S2CID 6754003.
17. *Fredman Michael Lawrence, Tarjan Robert E.* Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms, *25th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE*, 1984, pp. 338-346. DOI: 10.1109/SFCS.1984.715934.

18. *Fredman Michael Lawrence, Tarjan Robert E.* Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms, *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1987, Vol. 34 (3), pp. 596-615. DOI: 10.1145/28869.28874. S2CID 7904683.
19. *Zhan F. Benjamin, Noon Charles E.* Shortest Path Algorithms: An Evaluation Using Real Road Networks, *Transportation Science*, 1998, Vol. 32 (1), pp. 65-73. DOI: 10.1287/trsc.32.1.65. S2CID 14986297.
20. *Leyzorek M., Gray R.S., Johnson A.A., Ladew W.C., Meaker Jr., S.R., Petry R.M., Seitz R.N.* Investigation of Model Techniques – First Annual Report – 6 June 1956 – 1 July 1957. – A Study of Model Techniques for Communication Systems. 1957. Cleveland, Ohio: Case Institute of Technology.
21. *Martynova L.A.* Matematicheskaya model' gibridnoy sistemy energoobespecheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata bol'shoy dal'nosti [Mathematical model of a hybrid system of energy supply of an autonomous unmanned long-range underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 223-238.
22. *Kiselev N.K., Martynova L.A., Pashkevich I.V.* Matematicheskaya model' funktsionirovaniya gibridnoy sistemy energoobespecheniya v sostave stenda otladki i soprovozhdeniya ANPA [Mathematical model of the functioning of the hybrid power supply system as part of the AUV debugging and maintenance stand], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 1, pp. 170-187.
23. *Martynova L.A., Grinenkov A.V., Pronin A.O., Kulikovskikh Yu.V.* Imitatsionnoe modelirovanie funktsionirovaniya mul'tiagentnoy sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Simulation modeling of the functioning of a multi-agent control system of an autonomous unmanned underwater vehicle], *Tr. Vos'moy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2017)* [Proceedings of the Eighth All-Russian Scientific and Practical Conference “Simulation. Theory and Practice ”(IMMOD-2017)]. Saint Petersburg: Izd-vo VVM, 2017, pp. 474-479.
24. *Bykova V.S., Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V.* Dispetcher mul'tiagentnoy sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata: struktura, algoritmy, rezultaty modelirovaniya [Dispatcher of a multi-agent control system of an autonomous uninhabited underwater vehicle: structure, algorithms, simulation results], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2020, Vol. 28, No. 3 (110), pp. 109-121.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.С. Мальшкин.

Киселев Николай Константинович – АО «ЦКБ «Лазурит»; e-mail: kiselevu@gmail.com; г. Нижний Новгород, Россия; тел.: 89200218810; зам. главного конструктора.

Мартынова Любовь Александровна – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

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

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