

Костюков Владимир Александрович – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: vakostukov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; д.т.н.; в.н.с.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – e-mail: pshichop@rambler.ru; д.т.н.; профессор; директор.

Косенко Евгений Юрьевич – e-mail: ekosenko@sfedu.ru; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Kostjukov Vladimir Aleksandrovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: vakostukov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; cand. of eng. sc.; associated professor; senior researcher.

Medvedev Mikhail Yurjevich – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Pshikhopov Viacheslav Khasanovich – e-mail: pshichop@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor; director.

Kosenko Evgeny Yurevich – e-mail: ekosenko@sfedu.ru; cand. of eng. sc.; associated professor; senior researcher.

УДК 629.5.061

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-189-203

Н.К. Киселев, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич

**ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО
ПОДВОДНОГО АППАРАТА***

Целью исследования является организации электросети гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата, способного двигаться в широком диапазоне скоростей. Необходимость движения автономного подводного аппарата в широком диапазоне скоростей требует применения разнородных источников электроэнергии, работающих на различных физических принципах – аккумуляторных батарей и электрохимических генераторов, использующих реагенты из хранилища реагентов. Кроме того, для обеспечения потребителей электроэнергией с требуемыми параметрами (токами, напряжениями, объемами электроэнергии) необходимо применения дополнительных распределительных щитов, преобразователей напряжения, защитно-коммутационной аппаратуры, ключей. Использование дополнительного оборудования в электросети позволяет гибко конфигурировать электросеть с целью формирования энергии в объеме, согласованном с объемом потребляемой электроэнергии. С другой стороны, дополнительное оборудование вызывает потери электроэнергии в сети, и, соответственно, дополнительной электроэнергии. В связи с этим задача определения варианта организации электросети, при котором потери электроэнергии были бы минимальными, является актуальной. Для решения указанной задачи проанализированы особенности использования дополнительного оборудования в электросети, проанализировано потребление электроэнергии автономным необитаемым подводным аппаратом на различных этапах выполнения аппаратом маршрутного задания, определены минимальные и максимальные объемы потребления при движении автономного необитаемого подводного аппарата в различных скоростных режимах. Это позволило определить степень задействования разнородных источников электроэнергии в процессе выполнения маршрутного задания. По результатам анализа были сформированы альтернативные варианты электросети. Для выбора варианта организации, обеспечивающего минимальные потери электроэнергии, был сформирован целевой граф влияния потерь на отдельных устройствах электросети – на потери всей электросети, и с использованием метода распространения меток получены количественные оценки каждого из альтернативных вариантов. Получение количественных оценок по-

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

звонило определить вариант организации электросети, обеспечивающей минимизацию потерь. Это позволяет, в свою очередь, сформулировать требования к функционированию элементов гибридной системы энергообеспечения, разработать алгоритмы управления. В целом полученный результат позволяет минимизировать расход энергоресурса в процессе движения автономного необитаемого подводного аппарата на всем протяжении выполнения маршрутного задания.

Автономный необитаемый подводный аппарат; гибридная система энергообеспечения; организация электрической сети; движение в широком диапазоне скоростей.

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

ORGANIZATION OF THE ELECTRIC NETWORK OF THE HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

The aim of the study is to organize the power grid of a hybrid power supply system for an autonomous underwater vehicle capable of moving in a wide range of speeds. The need to move the autonomous underwater vehicle in a wide range of speeds requires the use of heterogeneous sources of electricity operating on different physical principles - storage batteries and electrochemical generators using reagents from the reagent storage. In addition, in order to provide consumers with electricity with the required parameters (currents, voltages, volumes of electricity), it is necessary to use additional switchboards, voltage converters, protective switching equipment, keys. The use of additional equipment in the power grid allows you to flexibly configure the power grid in order to generate energy in an amount consistent with the amount of electricity consumed. On the other hand, additional equipment causes losses of electricity in the network, and, accordingly, additional electricity. In this regard, the task of determining the option for organizing the power grid, at which the loss of electricity would be minimal, is relevant. To solve this problem, the features of the use of additional equipment in the power grid were analyzed, the consumption of electricity by an autonomous underwater vehicle at different stages of a route assignment was analyzed, the minimum and maximum volumes of consumption were determined when an autonomous underwater vehicle moved in different speed modes. This made it possible to determine the degree of involvement of heterogeneous sources of electricity in the process of performing a route assignment. Based on the results of the analysis, alternative options for the power grid were formed. To select the option of the organization that ensures the minimum losses of electricity, a target graph of the effect of losses on individual devices of the power grid was formed - on the losses of the entire power grid, and using the method of distributing tags, quantitative estimates of each of the alternative options were obtained. Teaching quantitative assessments made it possible to determine the option of organizing an electrical network that minimizes losses. This allows, in turn, to formulate the requirements for the functioning of the elements of the hybrid power supply system, to develop control algorithms. In general, the result obtained makes it possible to minimize the consumption of energy resources during the movement of an autonomous underwater vehicle throughout the entire duration of the route assignment.

Autonomous underwater vehicle; a hybrid power supply system; the organization of an electrical network; movement in a wide range of speeds.

Введение. Совершенствование технологий создания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) привело к возможности разработки многоскоростного АНПА для преодоления значительных расстояний в несколько тысяч километров [1]. В целях безопасности АНПА он должен иметь возможность двигаться наряду с традиционным экономичным режимом на низкой скорости также и в высокоскоростном режиме. При этом для движения АНПА в широком диапазоне скоростей используют различные источники электроэнергии, каждый из которых наиболее эффективен в одном из скоростных режимов. Вследствие этого, в отличие от традиционно используемой аккумуляторной батареи в качестве источника электроэнергии, обеспечивающей движение АНПА только в режиме экономичного хода, возникла необходимость реализации гибридной системы энергообеспечения (СЭО), допускающей движение АНПА как в режиме экономичного хода, так и в высокоскоростном режиме.

Гибридная СЭО включает в свой состав разнородные источники электроэнергии, работающие на различных физических принципах – аккумуляторные батареи (АБ) и электрохимические генераторы (ЭХГ), использующие реагенты из хранилища реагентов (ХР). Кроме того, при движении и маневрировании АНПА на различных скоростях используются различные исполнительные устройства, отличающиеся не только принципом действия, но и потребляемым значением тока, меняющимся с течением времени. Вследствие этого для обеспечения потребителей электроэнергией с требуемыми параметрами (значения напряжения и тока) необходимо применение дополнительного оборудования: распределительных щитов (РЩ), многоканальных преобразователей напряжения (МПН), защитно-коммутиционной аппаратуры, ключей. Использование дополнительного оборудования позволяет гибко реконфигурировать электросеть с целью формирования электроэнергии в объеме, согласованном с объемом потребляемой электроэнергии и, тем самым, минимизировать потери электроэнергии в электросети. С другой стороны, использование дополнительного оборудования само по себе вызывает потери электроэнергии в сети. В связи с этим необходимо выбрать такой состав дополнительного оборудования, вариант его размещения в электросети и параметры оборудования, чтобы потери электроэнергии в сети были бы минимальными. От того, насколько удачно удастся осуществить выбор оборудования и организовать электросеть, зависят алгоритмы управления переключениями и подключениями дополнительного оборудования [2]. В результате возникает задача организации электросети так, чтобы при обеспечении всех потребителей электроэнергией дополнительное оборудование электросети позволяло ее оперативно реконфигурировать, с одной стороны, и при этом возникающие потери электроэнергии в электросети были бы минимальными.

Ввиду новизны разработки многоскоростного АНПА и использования гибридной СЭО ранее такая задача не рассматривалась. Применение гибридной СЭО на обитаемом подводном объекте допускает потери на преобразование уровней напряжения и доставку электропитания потребителям, равную половине от полезной мощности. При управлении движением автономного обитаемого подводного аппарата выработка параметров исполнительных механизмов происходила без учета их энергопотребления, полагая, что энергоресурса на борту аппарата достаточно. Ранее практически все разрабатываемые АНПА предусматривали движение в режиме экономичного хода – до 7 уз. Высокоскоростные автономные подводные аппараты одноразового применения также, несмотря на движение в двух режимах – поисковом и маршевом – использовали одни и те же исполнительные механизмы и источник электроэнергии – аккумуляторную батарею, поскольку время жизни таких аппаратов исчислялось минутами. В отечественной и зарубежной литературе публикации по разработке многоскоростного АНПА практически отсутствуют из-за новизны задачи и новизны технического решения, связанного с применением гибридной СЭО на борту АНПА. В зарубежных источниках уделено достаточно внимания особенностям использования гибридных СЭО на борту АНПА, однако в них не раскрываются детали принятых технических и алгоритмических решений. Этим определяется новизна решаемой задачи и предлагаемого решения.

Цель работы – организация электросети АНПА, обеспечивающая при движении АНПА в широком диапазоне скоростей минимальные потери электроэнергии.

Постановка задачи. Пусть имеется гибридная СЭО, представляющая собой совокупность источников электроэнергии (АБ и ЭХГ с КХ) и систему распределения и передачи электрической энергии потребителям. Одним из важнейших элементов гибридной СЭО является электросеть. Под электрической сетью будем по-

нимать участок гибридной СЭО, включающий в себя совокупность РЩ, МПН, защитно-коммутационной аппаратуры, ключей и соединяющих их электрических линий (далее по тексту – шин), а также – потребителей [3, 4].

Под шиной будем понимать электротехническое устройство для передачи электроэнергии между источниками электроэнергии, оборудованием электросети и потребителями. Под многоканальными преобразователями напряжения будем понимать оборудование, предназначенное для понижения или повышения напряжения до значений напряжения, на котором работают потребители. Под распределительными щитами будем понимать электрические щиты, в которых происходит распределение электроэнергии по элементам сети и потребителям, содержат элементы системы защиты при аварийных ситуациях, связанных с перегрузками и короткими замыканиями. Под ключами (коммутационная аппаратура) будем понимать оборудование, предназначенное для подключения/отключения элементов электросети или их частей, а также потребителей к шинам. Под потребителями будем понимать приборы, устройства, механизмы или системы АНПА, для работы которых необходима электроэнергия.

На рис. 1 приведена структурная схема электросети гибридной СЭО АНПА.

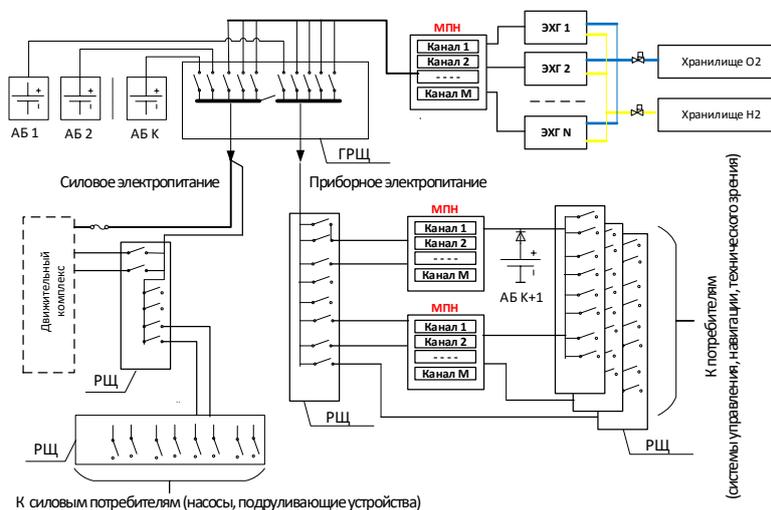


Рис. 1. Структурная электрическая схема гибридной СЭО АНПА

В верхней левой части рис. 1 изображены источники тока – аккумуляторные батареи (АБ 1...АБ К) и электрохимические генераторы (ЭХГ 1...ЭХГ N), использующие в качестве топлива реагенты из системы хранения реагентов (топлива). Между ними условно показан РЩ и две линии шин для приборного и силового электропитания, отличающиеся уровнем потребляемого тока. В нижней части рис.1 по центру схематично показаны МПН, слева – наиболее энергоемкий и основной потребитель энергии – двигательный комплекс, обеспечивающий движение АНПА в морской среде, справа – ключи и шины, к которым происходит подключение потребителей.

Необходимо так организовать электрическую сеть, чтобы она гибко реагировала на смену скоростных режимов движения АНПА, с одной стороны, и обеспечивала всех потребителей электроэнергией, с другой стороны. Под организацией электрической сети будем понимать пространственно-распределенное размещение источников электроэнергии, РЩ, МПН и ключей, параметры коммутационной аппаратуры (количество каналов и номинальные токи каждого канала).

Для того, чтобы определить вариант организации электросети, обеспечивающий минимизацию потерь электроэнергии, необходимо, прежде всего, обоснованно сформировать возможные варианты организации электросети, и затем на множестве альтернативных вариантов выбрать тот, который бы обеспечивал минимизацию потерь электроэнергии.

Формирование альтернативных вариантов организации электросети. В гибридной СЭО предлагается сформировать отдельные модули, которые при пониженном токопотреблении могут быть отключены с помощью ключей, а при повышенном – частично или полностью – подключены. При этом, однако, при прохождении тока через шины, соединенные ключами, возникают потери электроэнергии, приводящие к повышению температуры окружающей среды и перерасходу электроэнергии. В результате складывается ситуация, при которой, с одной стороны, поддержание постоянно высокого уровня тока при частичном его использовании приводит к потерям электроэнергии, а, с другой стороны, использование ключей для подключения/отключения необходимого дополнительного оборудования к электросети – также приводит к потерям.

Минимизация потерь в электросети может быть рассмотрена как так называемое нефункциональное требование [5] – в отличие от функционального требования, выраженного доставкой электроэнергии от источников к потребителям в заданном объеме и с заданными параметрами.

Минимизация потерь может быть получена путем:

- ♦ минимизации потребления за счет перекоммутации потребителей между шинами и исключения избыточного генерирования электроэнергии;

- ♦ минимизации потерь на преобразователях энергии;

- ♦ минимизации потерь на коммутационно-защитной аппаратуре (ключах).

Электрическая энергия, затрачиваемая на потребителей, определяется их нуждами.

Минимизация потерь возможна при соблюдении следующих положений:

- ♦ целесообразно использовать ровно такое количество каналов многоканального преобразователя, которое обеспечивало бы максимально близкие токи к токам потребления;

- ♦ целесообразно переключать потребителей так, чтобы номинальные токи шины были максимально приближены к токам потребления;

- ♦ целесообразно использовать каналы в РЩ и в преобразователях для дифференцированного подхода к передаче энергии потребителям и исключения перерасхода энергии;

- ♦ минимизировать, по возможности, дополнительное оборудование, поскольку используемое промежуточное дополнительное оборудование в электросети (дополнительные ключи, РЩ и МПН) приводит к потерям электроэнергии.

Ниже на рис. 2 приведены примеры возможных вариантов соединения дополнительного оборудования в электросети.

Самый экономичный вариант с точки зрения потерь на оборудовании – это его исключение и подключение потребителей к источникам напрямую, как это представлено на рис. 2 слева. Тогда энергия в сети соответствовала бы токам и напряжению потребления, и потери были бы близки к нулю.

Однако такой вариант невозможен для многоскоростных АНПА из-за несоответствия напряжения источников напряжению потребителей, в связи с чем необходимо использовать многоканальные преобразователи постоянного напряжения, обеспечивающие формирование напряжения, соответствующего напряжению потребителей, и вместе с тем – приводящего к потерям в электросети. Поэтому в данном случае минимизация потерь в сети определяется минимизацией потерь на преобразователях.

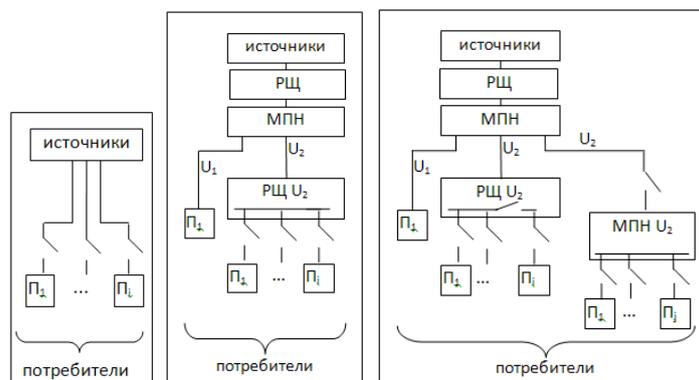


Рис. 2. Варианты соединения дополнительного оборудования электросети

Минимизировать потери на преобразователях можно путем использования перед ними РЩ, в котором оставить постоянно запитываемыми каналы только для постоянно работающих систем АНПА, а каналы под разово используемые приборы и системы замыкать в РЩ ключами.

Далее в результате проведенного анализа потребления выявлено, что приборы и устройства характеризуются двумя вариантами напряжения: U_1 и U_2 , в связи с чем потери надо снижать в электросети для напряжения U_2 (рис. 2, по центру). Для дифференцированного использования шин и снижения потерь целесообразно в сеть дополнительно добавить ключи, замыкающие токопроводы в случае периодического использования потребителей для указанных напряжений (рис. 2, справа). РЩ организован таким образом, что к каждому каналу подключена с использованием ключа шина, номинальный ток которой совпадает с током канала РЩ. Как преобразователи, так и РЩ, могут иметь произвольное количество каналов, характеризуемых напряжением и номинальным током. В результате такую сложную электросеть, включающую дополнительное оборудование, можно организовать по-разному. Количество подключаемых/отключаемых каналов РЩ и МПН, характеризуемых напряжением и номинальным током, зависит от характеристик потребителей: напряжения, потребляемого тока или его диапазона, продолжительности включения, интервалами между включениями.

В связи с этим дальнейший выбор вариантов организации электросети опирается на результаты анализа потребления электроэнергии АНПА на различных этапах выполнения маршрутного задания.

Анализ потребления электроэнергии. Все системы, приборы, устройства и механизмы, являющиеся потребителями электроэнергии, разделим условно на постоянно используемые и периодически используемые. И постоянно используемые потребители, и периодически используемые в процессе движения АНПА меняют ток потребления в зависимости от сложившейся ситуации.

В связи с этим при увеличении токопотребления целесообразно с помощью ключей подключать дополнительных потребителей к шинам с учетом тока потребления; соответственно, при уменьшении тока потребления – целесообразно отключать дополнительных потребителей от шины.

Проанализируем возникновение максимального и минимального токов потребления на различных участках маршрутного задания, а также ситуации, в которых они возникают, периодичность и продолжительность пиковых и минимальных значений токов в этих ситуациях. Минимальный ток потребления определяется нуждами постоянно используемого оборудования АНПА на участках установив-

шегося движения АНПА. При изменении параметров движения возникает некоторое повышение расхода энергоресурса, связанное с переходными процессами и затрачиваемое на использование исполнительных механизмов маршевого движительно-рулевого комплекса. Максимальный ток потребления возникает при переходе АНПА в высокоскоростной режим движения. Для оценки максимального токопотребления были проанализированы результаты моделирования, полученные с использованием ранее разработанной математической модели [6]. В [7] описаны результаты численного эксперимента, направленные на оценку энергопотребления на наиболее энергоемких этапах выполнения АНПА маршрутного задания, связанных с набором скорости. Рассматривались различные значения целевой скорости, до которых АНПА должен был разогнаться: от $0,5 V_{ЭК}$ до $V_{ВС}$ (здесь $V_{ЭК}$ и $V_{ВС}$ – некоторые номинальные значения скоростей АНПА в режиме экономичного хода и в высокоскоростном режиме соответственно). Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 3 слева, по горизонтальной оси отложено время в тактах имитации, представляющих собой некоторый постоянный промежуток времени при моделировании, через который происходит оценка изменения состояния рассматриваемых объектов, по вертикальной оси – электроэнергия, кВт·ч.

Полученные результаты позволили получить зависимости времени потребления электроэнергии от уровня потребления на наиболее энергоемком разгонном участке движения АНПА. На рис. 3 справа представлена зависимость длительности потребления от потребляемой электроэнергии. По горизонтальной оси отложена длительность потребления T , измеряемая в тактах имитации, по вертикальной оси – уровень потребления Q , измеряемый в кВт·ч.

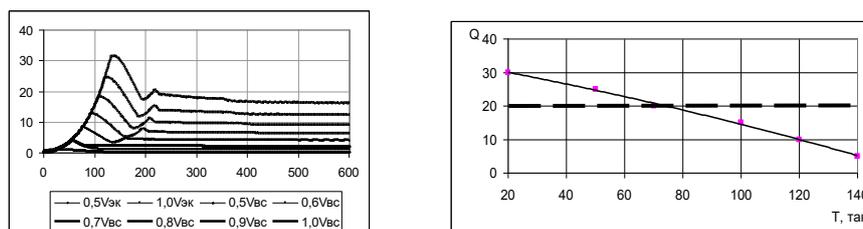


Рис. 3. Изменение потребления энергии с течением времени (слева) и зависимость длительности повышенного потребления от уровня потребления (справа)

Затраты в электросети определяются соотношением потерь на содержание каналов и при прохождении тока через ключи. Выбор между содержанием каналов и ключами определяется по некоторому уровню потребляемой электроэнергии, представленной на рис.4 горизонтальной линией, например, на уровне 20 кВт·ч.

Положение линии определяется следующим: если при использовании ключей затраты энергии – выше, чем на содержание, то линия будет расположена выше, то есть будут происходить с использованием ключей разовые редкие подключения. Если же на содержание каналов энергии требуется больше, чем потери на ключах в случае их подключения, то горизонтальная линия будет расположена ниже. Данные по номинальным потерям потребителей и потреблениям заимствуются из технических условий на приборы, системы, устройства и механизмы.

Положение линии означает следующее: для потребителей с потреблением ниже линии целесообразно поддерживать каналы в резервном состоянии, так как они большую часть времени задействованы. Для потребителей с потреблением выше линии надо использовать ключи, так как потребители редко используются, и потери на ключах – меньше затрат на «холостое» содержание редко используемых каналов.

Периодичность и продолжительность использования режимов с повышенным энергопотреблением определяется периодичностью тактических эпизодов, которые, в свою очередь, определяются маршрутным заданием и текущей ситуацией.

На следующем этапе исследований осуществлялся выбор вариантов организации электросети, обеспечивающей минимизацию потерь электроэнергии.

Полученные результаты минимального и максимального потребления электроэнергии позволяют определить конфигурацию электросети: при минимальном потреблении целесообразно использовать по одному преобразователю напряжения в носовом и кормовом модулях, а РЩ организовать так, чтобы часть каналов и дополнительные РЩ – были отключаемыми с помощью ключей.

Однако при этом возникает вопрос выбора не только конфигурации электросети, но и параметров ее оборудования – количества каналов и их параметров (токи и напряжения) РЩ и МПН, пространственно-распределенное размещение ключей и их подключение.

Для решения указанной задачи выбора параметров были использованы наряду с качественными результатами анализа размещения оборудования электросети – количественные оценки вариантов организации, обеспечивающих минимизацию потерь. Последнее необходимо для того, выявить преимущества одного варианта организации электросети перед другим. Поэтому на следующем этапе исследований были получены количественные оценки каждого из вариантов.

Количественные оценки вариантов организации электросети. Получение количественных оценок потерь каждого из вариантов организации электросети возможно путем проведения натурного эксперимента или путем численного эксперимента с использованием математических моделей функционирования электросети и ее элементов. И в том, и в другом случае необходимо воспроизведение функционирования гибридной СЭО и АНПА в ходе выполнения маршрутного задания. Однако, как отмечалось во введении, организация электросети накладывает определенные требования на реализуемый функционал, связанный с передачей электроэнергии от источников тока к потребителям. И вопрос организации электросети необходимо решать до того, как будут формироваться функциональные требования к работе электросети.

В данной работе предлагается принципиально новое решение рассматриваемой задачи, основанное на оценке различных альтернативных вариантов организации системы по степени удовлетворения так называемых нефункциональных требований.

Основным требованием при организации электросети является минимизация потерь электроэнергии, представляющее собой, по сути, так называемое нефункциональное требование, не связанное с обеспечением непосредственной передачи электроэнергии от источников к потребителям.

Размер фактических потерь электрической энергии в электрических сетях определяется разностью между выработанной энергией источниками энергии и потребленной на работу приборов. Таким образом, потери в электросети определяются энергией, затрачиваемой на содержание каналов и на использование дополнительного оборудования.

Проанализируем факторы, оказывающие влияние на минимизацию потерь электроэнергии при использовании дополнительного оборудования: РЩ, МПН, ключах для подключения каналов.

Потери на РЩ определяются затратами энергии на содержание РЩ и его каналов. Аналогичным образом потери определяются на МПН.

Потери на каналах определяются количеством каналов, предназначенных для периодически используемых потребителей, временем использования каждого канала, периодом времени между использованием каждого канала, номинальным током каждого канала.

При использовании ключей для периодического использования каналов также возникают потери.

Пусть в электросети, представленной на рис. 2 по центру и справа, потребитель тока электроэнергии с напряжением U_1 – постоянный. Тогда потери в электросети, представленной в центральной части рис. 2 (назовем его «Вариантом 1»), определяются: потерями на РЩ; потерями на МПН; потерями на РЩ U_2 ; потерями на каналах, замыкаемых периодически ключами $\Pi_1 \dots \Pi_i$.

При рассмотрении электросети, представленной в правой части рис. 2 (назовем его «Вариантом 2»), потери в электросети определяются: потерями на РЩ; потерями на МПН; потерями на РЩ U_2 ; потерями на МПН U_2 ; на каналах, замыкаемых периодически ключами $\Pi_1 \dots \Pi_i$; потерями на каналах, замыкаемых периодически ключами $\Pi_1 \dots \Pi_j$.

Вариант организации электросети, расположенный справа на рис. 2 отличается от электросети, расположенной в центральной части рис. 2, наличием ключа в РЩ U_2 и наличием ключа в МПН U_2 .

При отсутствии ключа прямое подключение модуля электросети, работающего периодически, вызывает потери электроэнергии на поддержание рассматриваемого модуля под напряжением даже в период неиспользования данного модуля. Поэтому потери определяются затратами энергии на поддержание модуля в нерабочем состоянии.

В «Варианте 1» прямое подключение канала при использовании канала – не вызывает возникновения потерь, так как отсутствует ключ; в то же время поддержание канала под напряжением в промежутках между его использованием не способствует минимизации потерь. В «Варианте 2» использование ключа положительно скажется на минимизации потерь, так как при этом происходит отсутствие затрат на поддержание в рабочем состоянии подключаемого канала; в то же время при подключении канала через ключ возникают потери. И в «Варианте 1», и в «Варианте 2» степень влияния на минимизацию потерь определяется: промежутком времени между использованием канала; временем использования канала; электроэнергией, затрачиваемой на содержание канала; номинальным значением тока канала.

По многоканальному дополнительному оборудованию – РЩ и МПН – на минимизацию потерь влияние оказывает количество каналов и их номинальные значения токов.

Таким образом, анализ рассматриваемых вариантов 1 и 2 показал, что есть факторы, позитивно влияющие на минимизацию потерь, а есть факторы, негативно влияющие на минимизацию потерь. Поэтому для того, чтобы осуществить выбор между «Вариантом 1» и «Вариантом 2», необходимо получение количественных оценок каждого из вариантов. Для этого был сформирован целевой граф. Целью в графе является минимизация потерь, а подцелями, оказывающими влияние на степень выполнения цели, является минимизация потерь на отдельных элементах электросети – МПН, РЩ и ключах. Вид целевого графа представлен на рис. 4.

У построенного целевого графа (рис. 4) в нижней части расположены альтернативные варианты организаций электросети: «Вариант 1» и «Вариант 2». Ребра между факторами (показателями) на среднем уровне и нефункциональными требованиями (верхний уровень) характеризуют влияние показателей на выполнение нефункциональных требований, а ребра между нижним и средним уровнями графа характеризуют влияние вариантов организации на показатели. Все ребра характеризуются весовыми коэффициентами w_i переходов от одного узла к другому.

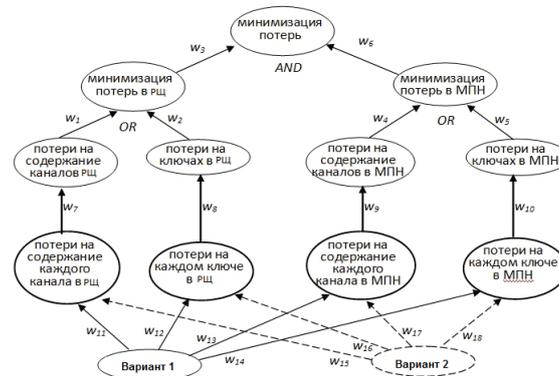


Рис. 4. Вид целевого графа для минимизации потерь электроэнергии в электрической сети гибридной СЭО АНПА

В данном случае потери в каждом канале объединены в один узел графа, который выделен, соответственно, жирной линией, имея в виду, что в одном узле – несколько каналов, а от них идет несколько токопроводов к потребителям, и потери возможны в каждом из каналов. При этом потери в каждом канале известны, токопотребление каждым дополнительным оборудованием электросети – системой, прибором, устройством и исполнительными механизмами – известны, поэтому можно заранее спрогнозировать возможный расход энергии на отдельных участках маршрутной траектории, и потери при использовании преобразователей, РЩ, ключей.

Для получения количественных оценок «Варианта 1» и «Варианта 2» организации сети целесообразно использовать метод, базирующийся на зарубежных источниках [8–15] и используемый ранее авторами для выбора архитектуры мультиагентной системы управления АНПА [16–20]. При использовании метода, в отличие от натурального эксперимента или моделирования, не требуется воспроизведение движения АНПА и оценки потерь на отдельных этапах выполнения маршрутного задания.

Каждый узел графа охарактеризуем парой чисел (Sat ; Den), где Sat (Satisfied – удовлетворение) указывает на повышение степени достижения цели, а Den (Denied – отрицание) – на снижение степени достижения цели.

В рассматриваемой задаче варианты организации электросети отличаются степенью снижения потерь. В «Варианте 1» при использовании рассматриваемого канала Sat и Den не меняется. В промежутках между использованием канала Sat не меняется, а вот Den (негативное влияние на снижение помех) – усугубляется, так как в это время происходит расход электроэнергии на поддержание напряжения в канале. При этом возникает вопрос степени влияния на изменение Den. В «Варианте 2» подключение канала не меняет Sat, так как позитивного в плане снижения помех ничего не происходит, а вот на Den оказывается влияние, так как использование ключа вызывает возникновение помех. В промежутках между подключением канала Sat и Den не меняются. И в «Варианте 2» – также возникает вопрос степень влияния на изменение Den.

Степень влияния помех на изменение Den в обоих рассматриваемых вариантах характеризуются теми самыми весовыми коэффициентами w_i , о которых говорилось выше.

Значения весовых коэффициентов w_i определяются: значением потребления энергии периодически включаемыми потребителями; периодичностью использования периодически включаемых потребителей; оценками потерь электроэнергии при прохождении через ключи; оценками потерь электроэнергии в каналах РЩ и МПН при отсутствии подключения к ним потребителей.

Определение значений весовых коэффициентов связано с «вкладом» потерь на содержание резервных каналов или использования ключей – в общие потери электросети.

Вклад в потери электросети определяется: затратами на дополнительное оборудование электросети; периодичностью и продолжительностью использования режимов с повышенным потреблением.

Если имеются априорные данные прогноза возникновения таких ситуаций, то они могут быть учтены при определении значений весовых коэффициентов w_i ; $w_i \in [\text{inf}, \text{sup}]$, где $\text{inf} = 0$, $\text{sup} = 1$.

После того как сформирован целевой граф и определены значения весовых коэффициентов, определялись количественные оценки каждого из рассматриваемых альтернативных вариантов организации электросети.

Для этого использовался алгоритм распространения меток [21], в результате чего формировалась итоговая оценка каждого j -го варианта организации электросети в виде пары вещественных чисел $(\text{Sat}_j; \text{Den}_j)$.

Выбор варианта организации электросети. Для проведения сравнительного анализа на множестве альтернативных вариантов организации электросети и выбора варианта организации, обеспечивающего минимальные потери, использован критерий, описанный и обоснованный в [14], в соответствии с которым сначала отбираются варианты организации, у которых $\text{Sat}_j > \text{Den}_j$, а затем из отобранных вариантов выбирается тот вариант организации, у которого $\text{Sat}^* = \max\{\text{Sat}_j\}$. При равных Sat_j выбирается $\text{Den}^* = \min\{\text{Den}_j\}$. Именно этот вариант и обеспечивает минимизацию потерь электросети гибридной СЭО АНПА.

Пусть при выборе «Варианта 1» и «Варианта 2» используются следующие исходные данные: канал, который в варианте 1 постоянно запитан, а в варианте 2 подключается ключом, рассчитан на 10 А; на содержание канала затрачивается ток 0,2 А; потери при протекании тока через ключ составляют 3 Вт, или 0,012 А; канал используется 30 мин в сутки; каналы в РЩ и каналы в МПН, которыми отличаются альтернативные варианты организации, характеризуются одинаковыми параметрами по времени работы и току.

Для «Варианта 1» весовой коэффициент w_{11} на потери в промежуток времени между использованием канала определяется произведением доли времени использования за сутки – на долю теряемой энергии по отношению к потребляемой в данном канале в случае его использования (составляет 0,98, поскольку канал используется лишь 30 мин в сутки) – на долю энергии по отношению к потребляемой, то есть $0,2/10 = 0,02$. В результате произведения $0,98 * 0,02$ получаем $w_{11} = 0,02$ – влияние на Den. Весовой коэффициент потерь при использовании ключа составляет $w_{12} = 0,0$. Весовой коэффициент потерь на содержание канала в МПН составляет аналогично $w_{13} = 0,02$. Весовой коэффициент потерь на использование ключа в МПН составляет $w_{14} = 0,0$.

Для «Варианта 2» весовой коэффициент на потери в промежуток времени между использованием канала равен 0, то есть $w_{15} = 0,0$ и $w_{17} = 0,0$. Весовой коэффициент w_{16} на потери при подключении канала ключом определяется произведением доли времени подключения (составляет 0,02, поскольку канал используется лишь 30 мин в сутки) – на долю теряемой энергии по отношению к потребляемой в данном подключенном ключом канале, то есть $0,012/10 = 0,0012$. В результате произведения $0,02 * 0,0012$ получаем $w_{16} = 0,000024$ влияния на Den. Этому же значению равен и весовой коэффициент w_{18} .

Поднимаясь выше по графу, получаем следующие значения весовых коэффициентов потерь в РЩ и МПН.

Для «Варианта 1»: весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в РЩ на содержание каналов $w_7 = w_{11} = 0,02$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в РЩ на использование ключа $w_8 = w_{16} = 0,0$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в МПН на содержание каналов $w_9 = w_{13} = 0,02$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в МПН на использование ключа $w_{10} = w_{18} = 0,0$.

Для «Варианта 2»: весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в РЩ на содержание каналов $w_7 = w_{11} = 0,0$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в РЩ на использование ключа $w_8 = w_{16} = 0,000024$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в МПН на содержание каналов $w_9 = w_{13} = 0,0$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в МПН на использование ключа $w_{10} = w_{18} = 0,000024$.

Потери в РЩ и МПН определяются коэффициентами, зависящими от количества РЩ и МПН соответственно. В рассматриваемом примере альтернативные варианты организации содержат по одному РЩ и МПН, в котором альтернативные подключения, поэтому весовые коэффициенты принимают следующие значения.

Для «Варианта 1»: $w_1 = w_7 = 0,02$; $w_2 = w_8 = 0,0$; $w_4 = w_9 = 0,02$; $w_5 = w_{10} = 0,0$.

Для «Варианта 2»: $w_1 = w_7 = 0,0$; $w_2 = w_8 = 0,000024$; $w_4 = w_9 = 0,0$; $w_5 = w_{10} = 0,000024$.

Степень влияния потерь в РЩ и МПН на общие потери определяется коэффициентами w_3 и w_6 , которые равны соответственно w_1 для «Варианта 1» и w_5 , то есть $0,02$ и $0,000024$ соответственно.

Таким образом, задавая начальные значения потерь на содержание каждого i -го канала МПН и РЩ $Sat_i = 1,0$, $Den_i = 1,0$, и на использование каждого j -го ключа МПН и РЩ $Sat_j = 1,0$, $Den_j = 1,0$, проводим расчет потерь, которым соответствует переменная Den . В результате получаем: для «Варианта 1» $(Sat_1, Den_1) = (1,0; 0,98)$; для «Варианта 2»: $(Sat_2, Den_2) = (1,0; 0,999976)$.

Правило выбора варианта организации электросети, приведенное выше по тексту, имеет вид: $Sat_k > Den_k$, $k=1,2$; $Sat^* = \max \{Sat_1, Sat_2\}$. В случае равенства Sat_1 и Sat_2 принимается, что $Den^* = \min \{Den_1, Den_2\}$. Поскольку в рассматриваемом примере оказалось, что $Sat_1 = Sat_2$, то выбор между «Вариантом 1» и «Вариантом 2» осуществляется из условия: $Den = \min \{Den_1, Den_2\}$, и вариантом, обеспечивающим минимальные потери, является вариант организации электросети «Вариант 2» с использованием ключа для подключения каналов в РЩ и в МПН.

Заключение. Для выбора варианта организации электросети гибридной системы энергообеспечения АНПА проанализированы объемы потребления электроэнергии АНПА на различных этапах выполнения маршрутного задания, потери от использования дополнительного оборудования – многоканальных преобразователей, распределительных щитов, ключей, что позволило сформировать альтернативные варианты организации электросети гибридной системы энергообеспечения АНПА. Для выбора варианта организации электросети, обеспечивающего минимальные потери, использован принципиально новый подход, основанный на оценке степени достижения так называемых нефункциональных требований. Для этого в работе разработан целевой граф и сформированы подцели, оказывающие влияние на потери электроэнергии АНПА. По специальному алгоритму распространения меток были получены итоговые оценки каждого из вариантов организации электросети, по которым была выбрана организация электросети, обеспечивающая минимальные потери по сравнению с другими вариантами организации электросети. Такой выбор позволяет экономно расходовать энергоресурс АНПА в процессе преодоления заданного маршрута.

Полученные результаты позволяют, в свою очередь, сформулировать требования к функционированию элементов гибридной системы энергообеспечения и разработать алгоритмы управления. В целом полученный результат позволяет минимизировать расход энергоресурса в процессе движения АНПА на всем протяжении выполнения маршрутного задания.

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., 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.
3. *Идельчик В.И.* Электрические системы и сети: учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 952 с.
4. *Мартынюк М.В.* Модели и алгоритмы интеллектуального управления параметрами регулирующих устройств в цифровых электросетях: дисс. ... канд. тех. наук. – Нижний Новгород, 2019. – 190 с.
5. *Chung L., Nixon B.A., Yu E., Mylopoulos J.* Non-Functional Requirements in Software Engineering. – URL: <https://www.springer.com/gp/book/9780792386667> (дата обращения: 25.01.2021).
6. *Мартынова Л.А.* Математическая модель гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата большой дальности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 223-238.
7. *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.
8. *Innocenti Badano B.M.* A multi-agent architecture with distribution for an autonomous robot. – URL: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7749/Tb1de1.pdf;sequence=1> (дата обращения 25.01.2021).
9. *Buzun N., Korshunov A.* Innovative methods and measures in overlapping community detection. – URL: http://ceur-ws.org/Vol-870/paper_3.pdf (дата обращения 25.01.2021).
10. *Malewicz G., Austern M.H., C Bik A. J., Dehnert J. C., Horn I., Leiser N., Czajkowski G.* Pregel: a system for large-scale graph processing // In Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of data (SIGMOD '10). ACM: New York, NY, USA, 2010. – P. 135-146.
11. *Giorgini P., Mylopoulos J., Nicchiarelli E., Sebastiani R.* Reasoning with goal models // In Proceedings of the 21st International Conference on Conceptual Modeling (ER 2002). Tampere, Finland, 2002. – P. 1-15. – <http://disi.unitn.it/~pgiorgio/papers/er02.pdf>.
12. *Kolp M., Giorgini P., Mylopoulos J.* Multi-agent Architectures as Organizational Structures. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10458-006-5717-6> (дата обращения 25.01.2021).
13. *Kolp M., Giorgini P., Mylopoulos J.* A Goal-Based Organizational Perspective on Multi-Agents Architectures // In Proceedings of the 8th international workshop on intelligent agents: Agent theories architectures and languages, ATAL'01, Seattle, USA, 2001. – <http://www.troposproject.eu/files/atalfinal.pdf>.
14. *Chung L., Cesar J. do Prado Leite.* On Non-Functional Requirements in Software Engineering. In book: Conceptual Modeling: Foundations and Applications. – Publisher: Springer Berlin. Heidelberg. – P. 363-379. – Doi: 10.1007/978-3-642-02463-4_19. – <http://www-di.inf.puc-rio.br/~julio/nfr-chung-leite.pdf>.
15. *Giorgini P., Kolp M., Mylopoulos J.* Multi-agent architectures as organizational structures // Autonomous Agent and Multi-Agent Systems. – 2006. – 13:1-2. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s10458-006-5717-6>.
16. *Мартынова Л.А.* Мультиагентные технологии в морской робототехнике // International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia. – P. 278-291.

17. Мартынова Л.А. Выбор мультиагентной архитектуры при разработке системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Матер. XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019), Дивноморское Геленджик, 23-28 сентября 2019 г. В 4 т. Т. 2. – Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 86-88.
18. Мартынова Л.А. Выбор мультиагентной архитектуры при разработке системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 7 (209). – С. 18-35.
19. 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.
20. Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. – 2020. – № 4 (107). – С. 31-41.
21. Zhu X., Ghahramani Z. Learning from labeled and unlabeled data with label propagation. Technical report, Technical Report CMU-CALD-02-107, Carnegie Mellon University, 2002. –<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.14.3864&rep=rep1&type=pdf>.

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 unmanned underwater vehicle], *Sb. materialov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Sb. materials of the XIII All-Russian scientific-practical conference "Perspective systems and management tasks"]. Rostov-on-Don – Taganrog: YuFU, 2018, pp. 34-42.
2. 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.
3. Idel'chik V.I. Elektricheskie sistemy i seti: uchebnik dlya VUZov [Electrical systems and networks. Uch. for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 952 p.
4. 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 the parameters of regulating devices in digital power grids: cand. of eng. sc. diss.]. Nizhniy Novgorod, 2019, 190 p.
5. Chung L., Nixon B.A., Yu E., Mylopoulos J. Non-Functional Requirements in Software Engineering. Available at: <https://www.springer.com/gp/book/9780792386667> (accessed 25 January 2021).
6. Martynova L.A. Matematicheskaya model' gibridnoy sistemoy energoobespecheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata bol'shoy dal'nosti [Mathematical model of a hybrid power supply system for a long-range autonomous unmanned underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 223-238.
7. Kiselev N.K., Martynova L.A., Pashkevich I.V. Matematicheskaya model' funktsionirovaniya gibridnoy sistemoy energoobespecheniya v sostave stenda otladki i soprovozhdeniya ANPA // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 1 (211), pp. 170-187.
8. Innocenti Badano B.M. A multi-agent architecture with distribution for an autonomous robot. Available at: URL: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7749/Tbi1de1.pdf;sequence=1> (accessed 25 January 2021).
9. Buzun N., Korshunov A. Innovative methods and measures in overlapping community detection. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-870/paper_3.pdf (accessed 25 January 2021).
10. Malewicz G., Austern M. H., C Bik A. J., Dehnert J. C., Horn I., Leiser N., Czajkowski G. Pregel: a system for large-scale graph processing, *In Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of data (SIGMOD '10)*. ACM: New York, NY, USA, 2010, pp. 135-146.
11. Giorgini P., Mylopoulos J., Nicchiarelli E., Sebastiani R. Reasoning with goal models, *In Proceedings of the 21st International Conference on Conceptual Modeling (ER 2002)*. Tampere, Finland. 2002, pp. 1-15. Available at: <http://disi.unitn.it/~pgiorgio/papers/er02.pdf>.

12. Kolp M., Giorgini P., Mylopoulos J. Multi-agent Architectures as Organizational Structures. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10458-006-5717-6> (accessed 25 January 2021).
13. Kolp M., Giorgini P., Mylopoulos J. A Goal-Based Organizational Perspective on Multi-Agents Architectures, *In Proceedings of the 8th international workshop on intelligent agents: Agent theories architectures and languages, ATAL'01, Seattle, USA. 2001*. Available at: <http://www.troposproject.eu/files/atalfinal.pdf>.
14. Chung L., Cesar J. do Prado Leite. On Non-Functional Requirements in Software Engineering. In book: *Conceptual Modeling: Foundations and Applications*. Publisher: Springer Berlin Heidelberg, pp. 363-379. Doi: 10.1007/978-3-642-02463-4_19. Available at: <http://www-di.inf.puc-rio.br/~julio/nfr-chung-leite.pdf>.
15. Giorgini P., Kolp M., Mylopoulos J. Multi-agent architectures as organizational structures, *Autonomous Agent and Multi-Agent Systems*, 2006, 13:1-2. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10458-006-5717-6>.
16. Martynova L.A. Mul'tiagentnye tekhnologii v morskoy robototekhnike [Multiagent technologies in marine robotics], *International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia*, pp. 278-291.
17. Martynova L.A. Vybora mul'tiagentnoy arkhitektury pri razrabotke sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [The choice of multi-agent architecture in the development of a control system for an autonomous unmanned underwater vehicle], *Mater. XII mul'tikonferentsii po problemam upravleniya (MKPU-2019), Divnomorskoe Gelendzhik, 23-28 sentyabrya 2019 g.* [Materials of the XII multiconference on control problems (MKPU-2019), Divnomorskoe Gelendzhik, September 23-28, 2019]]. In 4 vol. Vol. 2. Rostov-on-Don, Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 86-88.
18. Martynova L.A. Vybora mul'tiagentnoy arkhitektury pri razrabotke sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [The choice of multi-agent architecture in the development of a control system for an autonomous unmanned underwater vehicle] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 7 (209), pp. 18-35.
19. 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, uninhabited underwater vehicle], *Mater. konferentsii «Upravlenie v morskikh sistemakh» (UMS-2020)* [Materials of the conference "Management in marine systems" (UMS-2020)], pp. 53-56.
20. Martynova L.A., Kiselev N.K., Myslivyy A.A. Metod vybora arkhitektury mul'tiagentnoy sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [A method for choosing the architecture of a multi-agent control system for an autonomous unmanned underwater vehicle], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2020, No. 4 (107), pp. 31-41.
21. Zhu X., Ghahramani Z. Learning from labeled and unlabeled data with label propagation. Technical report, Technical Report CMU-CALD-02-107, Carnegie Mellon University, 2002. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.14.3864&rep=rep1&type=pdf>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.И. Машошин.

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; Санкт-Петербург, Россия; 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; Nizhniy Novgorod, Russia; phone: +779200218810; 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.

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