

УДК 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.47

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ ГРУППЫ АНПА В СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

Л. А. Мартынова<sup>а</sup>, доктор техн. наук, старший научный сотрудник

М. Б. Розенгауз<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

<sup>а</sup>АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** актуальная в настоящее время сетевая система освещения подводной обстановки включает в себя группу автономных необитаемых подводных аппаратов, обеспечивающих освещение подводной обстановки и мониторинг морской среды, и стационарные станции дозаправки, принимающие данные от аппарата и пополняющие его энергоресурс. При проектировании сетевая система возникает задача принятия решения относительно дозаправки автономных необитаемых подводных аппаратов так, чтобы, с одной стороны, ресурса оказалось достаточно для перехода до следующей станции дозаправки, а с другой стороны, общее время осмотра района не превысило заданное. **Цель исследований:** разработка метода принятия решения относительно дозаправки автономных необитаемых подводных аппаратов, обеспечивающего эффективное функционирование группы автономных необитаемых подводных аппаратов в сетевая система освещения подводной обстановки. **Результаты:** предложен новый метод принятия решения, основанный на использовании дополнительного фактора — энергоресурса, необходимого для преодоления расстояния между ближайшей и последующей станциями дозаправки. Проведено математическое моделирование и с его помощью численные эксперименты, направленные на определение количественных показателей использования традиционных критериев принятия решения и предложенного метода. Полученные методом статистических испытаний результаты показали преимущество использования предложенного в работе метода принятия решения относительно дозаправки автономных необитаемых подводных аппаратов. **Практическая значимость:** при проектировании сетевая система освещения подводной обстановки оценка возможностей автономных необитаемых подводных аппаратов и станций дозаправки позволяет решать задачи топологии их размещения, ресурсоемкости, временных характеристик.

**Ключевые слова** — автономный необитаемый подводный аппарат, математическое моделирование, метод принятия решения, станция дозаправки, сетевая система.

### Введение

В настоящее время перспективным направлением развития системы безопасности обширных акваторий является создание сетевая система защиты [1]. В силу сложных геофизических условий создание сетевая система связано с преимущественным использованием подводных роботов [2, 3]. Например, основным приоритетом ВМС США является развертывание в арктических морях мультиагентной системы сбора разведывательной и обеспечивающей ее (метеорологической, гидрологической, океанографической, геологической) информации [4, 5]. Элементами мультиагентной системы являются, в том числе, автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) и донные станции дозаправки и приема от АНПА информации [6].

Несколько АНПА, объединенных в группу, предназначены для освещения подводной обстановки по результатам методического осмотра при обходе района по заданному маршруту. Во время осмотра собирается информация об обнаруженных объектах и состоянии морской среды. Эта информация периодически передается потребителю через станции, предназначенные для сбора

информации и дозаправки АНПА для пополнения его энергоресурса.

Очевидно, что построение столь сложной сетевая система связано, прежде всего, с решением вопросов эффективности ее функционирования как в целом, так и отдельных составных частей, в частности — группы АНПА.

На эффективность функционирования группы АНПА влияние оказывают как техническое состояние АНПА, так и выполнение группой АНПА предписанных функций.

В настоящей работе эффективность технических средств будем считать достаточной для решения поставленных задач и будем рассматривать вопросы выполнения группой АНПА предписанной ей функции — осмотра заданного района в течение заданного промежутка времени.

Ограничение на время осмотра предъявляет, в свою очередь, определенные требования:

— постоянно иметь своевременно запрошенные АНПА, в противном случае выход из строя АНПА увеличивает нагрузку на другие АНПА, что приводит к снижению эффективности функционирования группы АНПА;

— время отвлечения на дозаправку должно быть минимизировано, поскольку отвлечение

связано с прохождением пути до станции дозаправки, затратами времени собственно на дозаправку, прохождением пути обратно на маршрут. Кроме того, дозаправка влечет за собой также дополнительный расход энергоресурса на преодоление пути до станции дозаправки и обратно.

Слишком частое выполнение дозаправок приводит к частому отвлечению с маршрутной траектории и увеличению времени, затрачиваемому на осмотр района в целом, что снижает эффективность функционирования группы АНПА. Редкое отвлечение на дозаправки может привести к преждевременному израсходованию энергоресурса до того, как АНПА успеет дозаправиться. В свою очередь, это приведет к невозможности дальнейшего использования АНПА и, следовательно, к увеличению времени осмотра заданной акватории, так как осмотр района будет осуществляться меньшим количеством АНПА. Поэтому задача выбора момента дозаправки является актуальной.

Имеется район, в котором развернута сетевая система, и элемент этой системы — группа АНПА, которая осматривает район в целях получения информации о состоянии морской среды и освещения подводной обстановки. Предполагается, что АНПА двигаются по определенному маршруту, проходящему по специально выделенным «коридорам» (по аналогии с авиацией). Периодически каждому АНПА группы требуется восполнять запасы энергоресурса. Необходимо определить правило, по которому АНПА примет решение о пополнении запасов энергоресурса на ближайшей станции дозаправки так, чтобы группа АНПА функционировала эффективно. Применительно к группе АНПА эффективное функционирование означает, что свою работоспособность должно сохранять по крайней мере то количество АНПА из группы, которое обеспечивает осмотр района в отведенное время. В обеспечение эффективного функционирования следует своевременно принять решение о необходимости отклонения от маршрутной траектории для дозаправки. Прогнозировать заранее принятие решения невозможно, поскольку с течением времени происходит изменение как внешних, так и внутренних условий функционирования АНПА. Изменение условий оказывает прямое влияние на удельный расход энергоресурса, зависящий от направления внутренних течений в морской среде, изменения параметров среды — плотности, температуры, вязкости, солености и т. д.

Целью работы явилась разработка метода определения необходимости дозаправки АНПА в процессе осмотра заданного района, применение которого направлено на повышение эффективности функционирования группы АНПА

в сетевидной системе защиты морских акваторий.

### Показатель эффективности

Эффективность АНПА — это степень достижения поставленной перед АНПА цели. Целью является осмотр района в течение заданного времени.

В качестве показателя эффективности функционирования группы АНПА в работе принята вероятность выполнения миссии группой АНПА. Выполнение миссии заключается в осмотре района в заданное время.

Предполагается, что невыполнение миссии может быть вызвано двумя причинами:

— полным исчерпанием энергоресурса из-за невозможности дозаправки АНПА; в этом случае нагрузка по решению поставленной в районе задачи ложится на оставшиеся АНПА из группы, вследствие чего время осмотра заданной территории увеличивается;

— слишком частыми дозаправками, что приводит к увеличению времени осмотра района и повышенному расходу электроэнергии АНПА.

Поэтому задача заключается в том, чтобы, с одной стороны, минимизировать время на дозаправку АНПА, а с другой, чтобы текущего заряда батареи хватило АНПА для перемещения до следующей станции дозаправки.

Вероятность эффективного функционирования  $P_{эф}$  группы АНПА определяется отношением заданного на осмотр района времени  $t_{здн}$  к времени  $t_{осм}$ , затраченному на полный осмотр заданного района:

$$P_{эф} = t_{здн}/t_{осм} \text{ при } t_{здн} < t_{осм};$$

$$P_{эф} = 1 \text{ при } t_{здн} \geq t_{осм}.$$

Рассмотрим влияние указанных причин на эффективность.

1. Увеличение времени осмотра заданной акватории за счет того, что часть АНПА вышла из строя и их «обязанности» перераспределяются между оставшимися АНПА, определяется следующим образом.

Пусть количество АНПА, осматривающих заданный район, —  $N$ , заданное время осмотра района —  $t_{здн}$ . У каждого АНПА условно имеется свой участок (зона ответственности), на осмотр которого он затрачивал время  $t_{осм}$ .

Если один из АНПА группы вышел из строя по причине израсходования электроэнергии, то количество АНПА становится равным  $N - 1$ . Предполагая, что производительность АНПА осталась прежней, время осмотра в этом случае будем определять выражением

$$t'_{осм} = t_{осм} + 1/(N - 1)t_{осм}.$$

Если из строя вышли  $I$  АНПА ( $I < N$ ), то выражение увеличения времени выполнения задачи осмотра будет иметь вид

$$t'_{\text{осм}} = t_{\text{осм}} + 1/(N - I)t_{\text{осм}}.$$

Отсюда следует, что для минимизации времени осмотра необходимо стремиться к снижению  $I$ .

2. Увеличение времени осмотра за счет отвлечений АНПА на дополнительную дозаправку оказывает влияние следующим образом.

Время осмотра  $t_{\text{осм}}$  определяется временем движения по маршруту  $t_{\text{марш}}$  и временем, затрачиваемым на отвлечение на дозаправку на станциях дозаправки  $t_{\text{запр}}$ :

$$t_{\text{осм}} = t_{\text{марш}} + t_{\text{запр}}. \quad (1)$$

Время движения по маршруту  $t_{\text{марш}}$  не зависит от отвлечений, поскольку в любом случае маршрут должен быть полностью пройден. Время, затрачиваемое на отвлечение на дозаправку, определяется количеством отвлечений  $M_{\text{ст}}$  и временем, затрачиваемым на отдельно взятое отвлечение  $t_{\text{ст}}$ :

$$t_{\text{запр}} = M_{\text{ст}}t_{\text{ст}}.$$

Время, затрачиваемое на отвлечение на дозаправку, определяется временем на преодоление расстояния до станции дозаправки  $t_{\text{д/ст}}$ , временем, затрачиваемым непосредственно на дозаправку  $t_{\text{запр}}$ , временем движения от станции дозаправки до выхода на маршрут  $t_{\text{п/ст}}$ :

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{д/ст}} + t_{\text{п/ст}} + t_{\text{запр}}.$$

Здесь время  $t_{\text{д/ст}}$ ,  $t_{\text{п/ст}}$ ,  $t_{\text{запр}}$  будем считать постоянными величинами, поэтому влияние на время отвлечения на дозаправку оказывает число отклонений  $M_{\text{ст}}$ : чем меньше  $M_{\text{ст}}$ , тем система функционирования группы АНПА эффективнее.

Принятые решения относительно дозаправки зависят от критерия, по которому принимается решение на отклонение на дозаправку. Поэтому на следующем этапе исследований определим критерий, по которому АНПА принимает решение по уходу с маршрута на дозаправку.

### Варианты выбора критерия принятия решения

В качестве критерия, по которому принимается решение на отклонение на дозаправку, предлагается использовать критическое значение энергозапаса АНПА  $q_{\text{кр}}$ . Вопрос заключается в том, каким выбрать  $q_{\text{кр}}$ . Можно выбрать, ориентируясь на достаточность ресурса для преодоления самого длинного участка между заправками,

чтобы в том случае, если решение придется принимать в начале самого длинного участка (именно в этот момент может сложиться так, что остаточный уровень заряда достигнет критического), то ресурса должно хватить на весь этот длинный участок.

Но вероятность такого события очень мала, более вероятно событие, при котором либо участок не самый длинный, либо даже если длинный, то АНПА должен принимать решение, находясь не в самом его начале, а посередине или в конце. Поэтому целесообразно сначала рассмотреть классические подходы к принятию решения относительно выбора  $q_{\text{кр}}$ .

Пусть в текущий момент времени остаток энергоресурса АНПА составляет  $q(t)$ . Пусть расстояние  $M_{\text{ст}}$  между станциями заправки равно  $L_1, \dots, L_m$ . При принятии решения происходит сравнение остатка  $q(t)$  с критическим значением  $q_{\text{кр}}$ , и в зависимости от результатов сравнения принимается решение о необходимости отворота на дозаправку.

Для определения критического значения уровня энергоресурса можно использовать различные подходы к принятию решения, основными из которых в условиях неопределенности являются [7]:

- критерий Вальда (критерий «максимина», пессимизма);
- критерий «максимакса» (оптимизма);
- критерий Гурвица (критерий «оптимизма-пессимизма», или «альфа-критерий»).

Критерий Вальда предполагает, что из всех возможных вариантов решения выбирается та альтернатива, которая из всех самых неблагоприятных ситуаций развития события имеет наибольшее из минимальных значений. Наиболее неблагоприятной является альтернатива, при которой АНПА оказывается на самом протяженном участке между станциями заправки, т. е. путь, который необходимо преодолеть до отворота на станцию дозаправки, составляет  $L_{\text{АНПА}} = \max \{L_1, \dots, L_m\}$ .

Поэтому  $q_{\text{кр}} = t_{\text{кр}}/q_e$ , где  $t_{\text{кр}}$  — время, затрачиваемое АНПА на преодоление участка протяженностью  $L_{\text{АНПА}}$ ;  $q_e$  — удельный расход электроэнергии АНПА.

Из соображений кинематики время  $t_{\text{кр}}$  определяется выражением  $t_{\text{кр}} = L_{\text{АНПА}}/V_{\text{АНПА}}$ , где  $V_{\text{АНПА}}$  — скорость АНПА.

При использовании критерия Вальда АНПА будет каждый раз принимать решение относительно необходимости подзарядки, аккумуляторная батарея (АБ) АНПА всегда будет достаточно заряжена, однако при этом АНПА придется заходить на каждую станцию дозаправки и тем самым увеличивать время осмотра заданного района.

При этом эффективность  $P_{\min}$  будет минимальна, поскольку много времени будет затрачено на отвлечение на дозаправки. «Макс» в названии критерия означает, что используем положение АНПА в начале выбранного участка, т. е. предполагаем проход максимального расстояния.

Критерий «максимакса» предполагает, что из всех возможных вариантов решений выбирается то, при котором из всех самых благоприятных ситуаций развития событий имеется наибольшее из максимальных значений. Благоприятной является ситуация, когда АНПА находится в текущий момент времени на самом коротком участке между станциями дозаправки:  $L_{\text{АНПА}} = \min \{L_1, \dots, L_m\}$ . Поэтому рассчитывается так же, как и в критерии Вальда.

Эффективность функционирования группы при этом максимальная ( $P_{\max}$ ), так как отвлечений на дозаправки будет гораздо меньше, и время осмотра окажется в пределах заданного.

Критерий Гурвица позволяет руководствоваться при выборе решения в условиях неопределенности некоторым средним результатом эффективности, находящимся в промежутке между значениями по критериям «максимакса» и «максимина». Оптимальная альтернатива решения по критерию Гурвица определяется на основе формулы

$$A = \alpha P_{\max} + (1 - \alpha) P_{\min},$$

где  $A$  — средневзвешенная эффективность по критерию Гурвица для конкретной альтернативы;  $\alpha$  — альфа-коэффициент, принимаемый с учетом рискованного предпочтения в поле от 0 до 1 (значения, приближающиеся к нулю, характерны для субъекта, не склонного к риску; значение, равное 0,5, характерно для субъекта, нейтрального к риску; значения, приближающиеся к единице, характерны для субъекта, склонного к риску; в рассматриваемой задаче риск заключается в использовании пониженного значения критического уровня заряда;  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$  — максимальное и минимальное значения эффективности АНПА по конкретной альтернативе.

Сказанное означает, что при формировании критерия используется не самый короткий и не самый протяженный участки, а промежуточный. Выбор значения параметра  $\alpha$  определяется конкретным соотношением между параметрами движения АНПА, объемом заряда и расстояниями между станциями заправок.

Недостатком перечисленных критериев является неопределенность участка, на котором находится АНПА в текущий момент времени, из-за которой приходится принимать решение либо «с запасом», и тем самым снижать эффективность по времени осмотра, либо «с риском» того, что часть АНПА из группы не успела пополнить свой запас

энергоресурса и вышла из строя, и тем самым также снижать эффективность. Эта неопределенность усугубляется еще тем, в каком именно месте участка будет достигнуто  $q_{\text{кр}}$  — в начале участка или в его конце, перед самой станцией дозаправки.

В связи с этим в работе предлагается метод, учитывающий не только критический уровень заряда, при достижении которого необходимо принять решение относительно пополнения запасов электроэнергии АНПА, а и дополнительный наряду с  $q_{\text{кр}}$  параметр — расстояние  $L$  до следующей станции дозаправки.

### Метод принятия решения о дозаправке

Метод заключается в следующем. В каждый момент времени происходит оценка остатка энергоресурса  $q(t)$ , текущего расхода  $q_{\text{расх}}(t)$  и расстояния  $L_j$  между ближайшей и следующей станциями дозаправки, т. е. длины следующего участка. Далее происходит сравнение остатка заряда  $q_{\text{ост}}(t)$  и критического значения  $q_{\text{кр}}$ . Если остатка  $q_{\text{ост}}(t)$  достаточно до ближайшей станции и не достаточно до следующей, то принимается решение о дозаправке на ближайшей станции. Если же ресурса достаточно до следующей станции, то принимается решение заправиться на ней, пропустив ближайшую.

При подходе к следующей станции дозаправки вновь анализируются собственный запас и расстояние, необходимые для перехода к ближайшей станции и следующей станции. И вновь принимается решение относительно необходимости поворота на ближайшую станцию. Математически это означает следующее.

Пусть имеется информация о параметрах:

$q_e$  — удельном расходе энергоресурса АНПА в единицу времени;

$t_1 = L_1/q_e$  — времени, необходимом для перехода до первой ближайшей станции от момента принятия решения, при первоначальном подходе именно это расстояние АНПА и необходимо пройти для прибытия на станцию дозаправки;

$t_2 = L_2/q_e$  — времени, необходимом для перехода до второй ближайшей станции от момента принятия решения;

$q_{\text{ост}}$  — остаточном значении энергоресурса АНПА;

$$L_1 < L_2.$$

Тогда в момент  $q_{\text{ост}} = q_{\text{кр}}$  происходит сравнительный анализ:

$q_1 = q_{\text{расх}} t_1$  — объема электроэнергии, затрачиваемого для преодоления расстояния  $L_1$  до ближайшей станции дозаправки;

$q_2 = q_{\text{расх}}(t_1 + t_2)$  — объема электроэнергии, затрачиваемого для преодоления расстояния  $L_2$  до следующей ближайшей станции дозаправки.

Поскольку  $L_1 < L_2$ , то и  $q_1 < q_2$ .

Если  $q_{\text{ост}} t_1 > L_1$  и  $q_{\text{ост}} t_1 + q_{\text{ост}} t_2 < L_2$ , то принимается решение о дозаправке на ближайшей станции. В этом случае разницы между использованием первоначального подхода и предложенного в настоящей работе метода нет.

Если  $q_{\text{ост}} t_1 > L_1$  и  $q_{\text{ост}} t_1 + q_{\text{ост}} t_2 > L_2$ , то принимается решение о пропуске ближайшей станции и дозаправке на следующей станции.

Для определения преимущества предложенного метода проведем сравнение с вариантом выбора станции дозаправки, например по критерию Вальда (критерий пессимизма «дозаправка на ближайшей станции на всякий случай»).

Имеем  $q_{\text{полн}}$  — полный запас энергоресурса АНПА,  $q_{\text{кр}}$  — тот критический уровень, после которого принимается решение о дозаправке,  $t_{x1}$  — время хода АНПА до критического значения, определяемого по первоначальной схеме;  $t_{x2}$  — время хода АНПА до критического значения, определяемого по предложенному методу. Очевидно, что чем выше  $q_{\text{кр}}$ , тем чаще происходит дозаправка, так как промежуток времени между отвлечениями на дозаправку становится меньше.

В первом случае (дозаправка на ближайшей станции) критический уровень  $q_{\text{кр}1} = q_{\text{полн}} - q_e t_{x1}$ .

Во втором случае (дозаправка на ближайшей станции при условии, что до второй не дотянуть) критический уровень  $q_{\text{кр}2} = q_{\text{полн}} - q_e t_{x2}$ .

Тогда

$$\text{при } q_{\text{кр}1} > q_{\text{кр}2} \quad t_{x1} < t_{x2}. \quad (2)$$

Это означает, что в первом случае промежуток времени меньше, поэтому решение о дозаправке наступает чаще. Количество отвлечений на дозаправки определяется выражением

$$M_{\text{ст}1} = t_q / t_{x1}, \quad (3)$$

где  $t_q$  — время полного израсходования энергоресурса АНПА.

Соответственно, количество отвлечений на дозаправки во втором случае определяется выражением

$$M_{\text{ст}2} = t_q / t_{x2}. \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), с учетом (2) получаем

$$M_{\text{ст}1} > M_{\text{ст}2}, \quad (5)$$

что означает, что в первом случае отвлечений на дозаправки больше, следовательно, время, затрачиваемое на осмотр, больше, чем во втором случае.

Перепишем (1) в виде

$$t_{\text{осм}} = t_{\text{марш}} + M_{\text{ст}} t_{\text{ст}}.$$

Отсюда после подстановки получаем

$$t_{\text{осм}1} = t_{\text{марш}} + M_{\text{ст}1} t_{\text{ст}}; \quad t_{\text{осм}2} = t_{\text{марш}} + M_{\text{ст}2} t_{\text{ст}}.$$

С учетом (5) получаем

$$t_{\text{осм}1} > t_{\text{осм}2}.$$

Это означает, что при  $t_{\text{осм}2} > t_{\text{здн}} > t_{\text{осм}1}$  первоначальный вариант принятия решения не будет удовлетворять требованиям эффективности. Вариант с использованием предложенного метода, как раз наоборот, обеспечит требуемую эффективность, так как время осмотра района находится в пределах заданного.

Для того чтобы получить количественные оценки преимущества предложенного метода перед первоначальным вариантом принятия решения относительно дозаправки, был проведен численный эксперимент для рассмотрения различных вариантов критического значения заряда АБ, и на основе показателя эффективности  $P_{\text{эф}}$  определены преимущества от использования предложенного метода.

Для расчета показателя эффективности  $P_{\text{эф}}$  специально была разработана математическая модель оценки эффективности функционирования системы АНПА — станции дозаправки.

### Математическая модель функционирования группы АНПА с использованием станций дозаправки

#### Моделирование процессов

Математическая модель воспроизводит процессы:

- движения АНПА;
- принятия решения относительно отворота на ближайшую станцию дозаправки;
- разряда АБ в ходе выполнения миссии;
- заряда разряженной АБ на станции дозаправки.

#### Моделирование движения АНПА

Движение АНПА в общем случае моделируется как перемещение материальной точки: в  $i$ -м такте имитации вычисляются координаты АНПА по формулам

$$X_{\text{АНПА}i} = X_{\text{АНПА}i} + V_{\text{АНПА}} \Delta t \cos(Q_{\text{АНПА}});$$

$$Y_{\text{АНПА}i} = Y_{\text{АНПА}i} + V_{\text{АНПА}} \Delta t \sin(Q_{\text{АНПА}});$$

$$Z_{\text{АНПА}i} = Z_{\text{АНПА}i} + V_{\text{АНПА}} \Delta t \sin(\theta_{\text{АНПА}}),$$

где  $Q_{\text{АНПА}}$  — курс АНПА;  $\theta_{\text{АНПА}}$  — дифферент АНПА;  $\Delta t$  — длительность такта имитации.

В имитационной модели учитываются разгон/торможение АНПА, в результате чего текущая скорость АНПА определяется выражением

$$V_{АНПАi} = V_{АНПАi-1} + a_i \Delta t,$$

где  $a_i$  — ускорение АНПА в  $i$ -м такте имитации. Моделирование принятия решения относительно отворота на ближайшую станцию дозаправки осуществлялось в соответствии с алгоритмом предложенного в настоящей работе метода.

**Моделирование разряда батареи**

Расчет текущего уровня заряда АБ в процессе эксплуатации происходил следующим образом. Зависимость уровня разряда АБ от времени аппроксимирована кусочно-непрерывной функцией и разбита на три участка [8–10]:

- кратковременный линейный участок;
- участок «основного» заряда — линейный;
- участок «окончательного» заряда — линейный.

Текущий уровень заряда АБ  $Q_{тек}$  на момент времени  $t_{тек}$  определяется выражениями

$$Q_{тек} = Q_{исх} - \frac{(t_1 - t_{тек})}{t_1 - t_{нач}} (Q_1 - Q_{исх}) \text{ при } t_{тек} < t_1;$$

$$Q_{тек} = Q_1 - \frac{(t_2 - t_{тек})}{t_2 - t_1} (Q_2 - Q_1) \text{ при } t_1 < t_{тек} < t_2;$$

$$Q_{тек} = Q_2 - \frac{(t_3 - t_2)}{t_3 - t_2} (Q_3 - Q_2) \text{ при } t_2 < t_{тек} < t_3,$$

где  $Q_{исх}$  — первоначальный заряд АБ на момент старта АНПА;  $t_{тек}$  — текущий момент времени;

$t_{нач}$  — начальный момент времени (старт АНПА);  $t_1$  — момент времени окончания первого участка;  $t_2$  — момент времени окончания второго участка;  $t_3$  — момент времени окончания третьего участка, соответствующий моменту полного разряда АБ;  $Q_1, Q_2, Q_3$  — уровни заряда на указанные моменты времени, задаются в процентах от номинального значения полностью заряженной АБ.

Расход энергии АБ в текущем  $i$ -м такте имитации определяется выражением

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^{N_y} q_i \Delta t,$$

где  $N_y$  — количество устройств, потребляющих в текущем такте имитации энергию АБ;  $q_i$  — потребляемый ресурс каждого из устройств в текущем такте имитации.

Оставшийся энергоресурс  $Q_{ост}$  АБ АНПА в каждом такте имитации определяется выражением

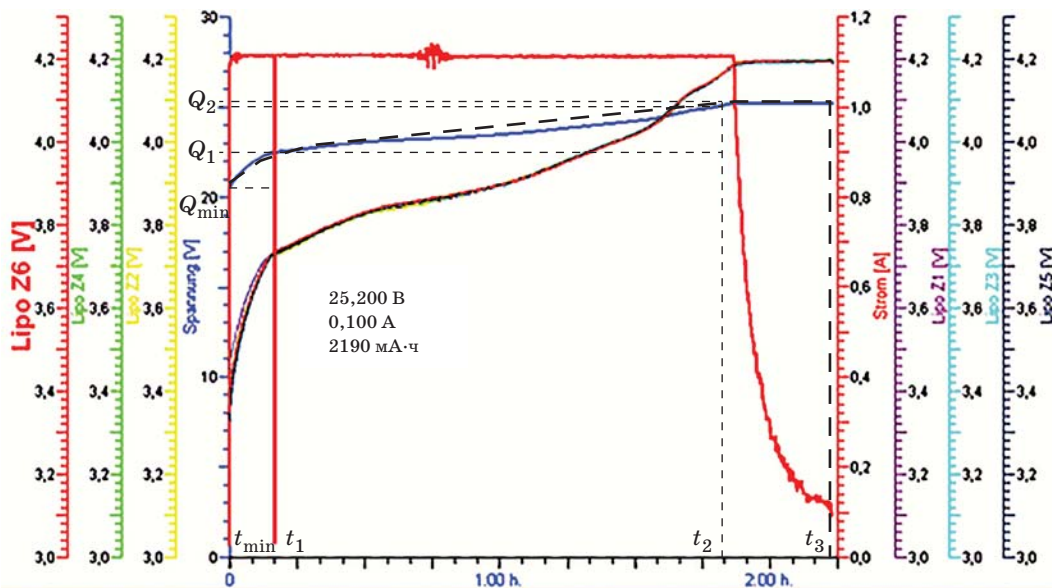
$$Q_{ост} = Q_{исх} - \int_{t_{нач}}^{t_{тек}} \Delta Q dt = Q_{исх} - \int_{t_{нач}}^{t_{тек}} \sum_{i=1}^{N_y} q_i dt.$$

**Моделирование процесса заряда батареи**

Расчет уровня заряда АБ  $Q_{зар}$  определяется функционалом

$$Q_{зар} = f(Q_{min}, M_{зар}, \Delta t_M, T, U, I_{зар}, t_{зар}),$$

где  $Q_{min}$  — уровень заряда к моменту начала процесса заряда АБ;  $M_{зар}$  — количество циклов до последнего заряда;  $\Delta t_M$  — промежуток времени от последнего заряда;  $T$  — температура окру-



■ Рис. 1. Аппроксимация линии изменения уровня заряда с течением времени (пунктирная линия черного цвета)

жающей среды, при которой осуществлялся заряд АБ перед началом выполнения миссии;  $U$  — максимальное напряжение при заряде;  $I_{зар}$  — ток заряда;  $t_{зар}$  — время заряда.

В зависимости от текущего времени определялся текущий уровень заряда. При расчете текущего уровня процесс заряда АБ условно был разделен на три участка:

- кратковременный линейный участок;
- участок «основного» заряда — линейный;
- участок «окончательного» заряда — линейный (рис. 1).

Текущий уровень  $Q_{тек}$  заряда АБ определялся выражениями

$$Q_{зар} = Q_{min} + \frac{(t_1 - t_{тек})}{t_1 - t_{min}}(Q_1 - Q_{min}) \text{ при } t_{тек} < t_1;$$

$$Q_{зар} = Q_1 + \frac{(t_2 - t_{тек})}{t_2 - t_1}(Q_2 - Q_1) \text{ при } t_1 < t_{тек} < t_2;$$

$$Q_{зар} = Q_2 + \frac{(t_3 - t_2)}{t_3 - t_2}(Q_3 - Q_2) \text{ при } t_2 < t_{тек} < t_3.$$

#### Определение показателя эффективности

Расчет вероятности выполнения миссии происходил с использованием метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) [11, 12], применяемого авторами ранее при проведении подобных исследований [13–17].

Проводилась серия из  $N_{исп}$  испытаний. В каждом испытании оценивалась эффективность функционирования группы АНПА. Для этого задавалось время, в течение которого группа АНПА должна осмотреть заданный район. Далее в процессе моделирования осмотра района группой АНПА определялся текущий запас энергоресурса каждого АНПА и проводился анализ его достаточности для выполнения осмотра. Если принималось решение о необходимости отворота к станции дозаправки для пополнения энергоресурса, моделировался сход АНПА с маршрутной траектории и его движение к станции дозаправки, дозаправка АНПА и движение АНПА от станции дозаправки на маршрутную траекторию. Если решение о дозаправке не принималось, АНПА продолжал движение по маршрутной траектории без отворота к станции дозаправки.

Задавался маршрут движения АНПА так, чтобы в ходе осмотра заданного района каждый АНПА двигался по замкнутой траектории и по окончании испытания оказывался в точке своего старта. В зависимости от запаса энергоресурса при моделировании могло оказаться, что энергоресурс АНПА полностью израсходован. В этом случае принималось, что этот АНПА перестает функционировать. Остальные АНПА группы продолжали

осмотр заданного района. Невозможность функционирования группы АНПА регистрировалась тогда, когда все АНПА группы полностью расходовали свой запас энергоресурса.

Если из всех четырех АНПА по крайней мере один продолжал функционировать, то регистрировалось время, равное времени испытания, и считалось, что остановки АНПА не произошло. Далее по серии испытаний определялось, в скольких испытаниях к  $i$ -му моменту миссия не была выполнена.

По результатам численного моделирования и проведения серии испытаний строилась зависимость вероятности выполнения миссии от времени. Вероятность выполнения миссии определялась как отношение количества испытаний, в которых не был зафиксирован полный расход энергоресурса, к  $i$ -му моменту времени, к общему количеству испытаний.

Количество испытаний, в которых не произошло полного расхода энергоресурса системы, рассчитывалось суммированием: весь временной диапазон разбивался на участки, и определялось, сколько АНПА полностью израсходовали свой энергоресурс в пределах каждого временного участка. С течением времени количество нерезультативных испытаний возрастало.

Например, пусть из  $N_{исп} = 100$  на  $j$ -м интервале оказалось  $K_j$  прекращений функционирования группы из-за полного расхода энергоресурса каждого АНПА группы. Следовательно, количество результативных испытаний  $N_{р.исп}$  составляло  $N_{р.исп} = N_{исп} - K_j$ .

По всем временным интервалам, количество которых обозначим  $M_{инт}$ , определялось общее количество вышедших из строя АНПА  $K_m = \sum_{j=1}^{M_{инт}} K_j$ .

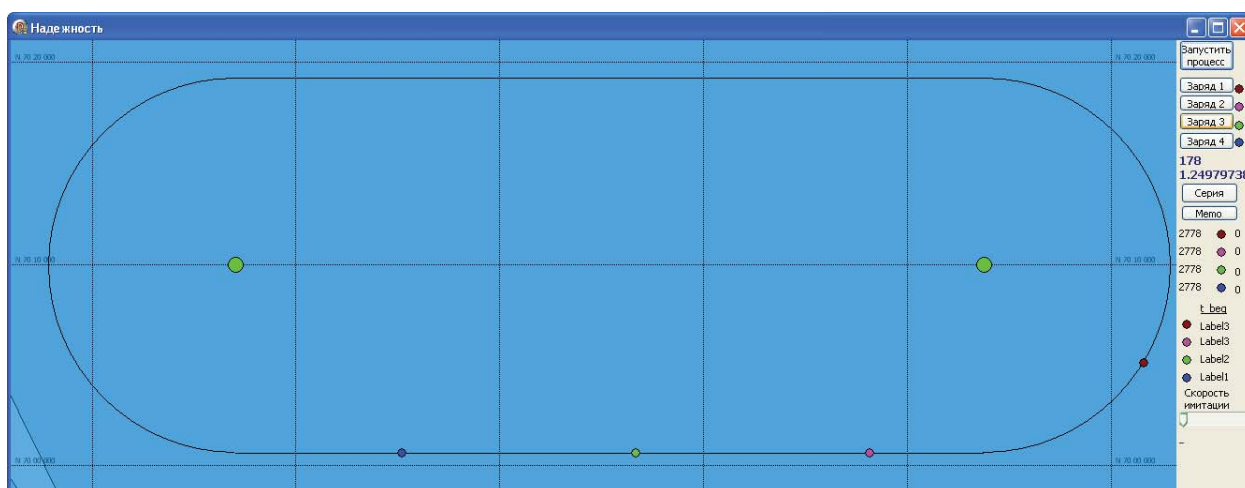
Следовательно, к  $j$ -му интервалу количество результативных испытаний составляло  $N_{исп} - K_m$ . Поэтому вероятность выполнения миссии на  $j$ -м интервале определялась выражением  $P_j = (N_{исп} - K_m)/N_{исп}$ .

Описанная математическая модель была использована для проведения численного эксперимента по выявлению работоспособности метода и оценке повышения эффективности за счет его использования.

#### Условия, исходные данные и результаты численного эксперимента

В ходе проведения численного эксперимента рассматривалась следующая тактическая ситуация (рис. 2).

Имеется акватория  $1200 \times 600$  м. Имеются две стационарно расположенные станции дозаправки, координаты которых (100,100) и (1100,100).



■ Рис. 2. Положение АНПА (точки на линии), траектории движения АНПА (линия) и станции дозаправки (кружки светло-зеленого цвета)

В районе функционируют четыре АНПА, двигаясь друг за другом по определенной траектории, осматривая район. Маршрут движения представляет собой две параллельные линии, удаленные друг от друга на 200 м и соединенные между собой полуокружностью радиусом 100 м. Движение всех четырех АНПА происходит против часовой стрелки. Скорость движения АНПА принималась постоянной и равной 2 уз.

Для дозаправки АНПА отклонялся от маршрутной траектории и двигался к станции дозаправки. Отклонение возможно было только в начале или в конце прямолинейного участка движения. Заходить на станцию дозаправки можно с любого из прямолинейных отрезков.

Предполагалось, что на удельный расход электроэнергии АНПА влияние оказывают факторы, характерные для морской среды, поэтому случайным являлся удельный расход энергоресурса в процессе движения АНПА, который менялся каждые 500 тактов имитации. Удельный расход разыгрывался случайным образом в предположении того, что увеличение расхода может достигать двукратного размера, т. е. диапазон изменения удельного расхода составлял от 1,0 до 2,0. Значение расхода разыгрывалось равновероятно.

В процессе эксперимента моделировалось движение АНПА, поворот к станции дозаправки в случае принятия решения о дозаправке. В момент дозаправки цвет станции меняется на красный.

Рассматривались три варианта принятия решения относительно дозаправки на ближайшей станции, а также предложенный метод, всего — четыре варианта:

— критерий Вальда соответствовал значению критического заряда, достаточного для перехода самого протяженного участка между станциями дозаправки, т. е. 1800 м;

— критерий «максимакса» соответствовал значению критического заряда, необходимого на преодоление самого короткого расстояния между станциями дозаправки, т. е. 1000 м;

— критерий Гурвица соответствовал промежуточному значению критического заряда, необходимому для преодоления 1200 и 1600 м до станции дозаправки;

— предложенный метод, учитывающий наряду с критическим значением остаточного заряда также расстояние между ближайшей и следующей станциями дозаправки.

При проведении серии из 100 экспериментов длительность испытания составляла 10 000 тактов имитации.

В результате формировались накопленные данные в каждом временном диапазоне. Если конец испытания по причине полного расхода ресурса всеми АНПА группы наступал в диапазоне 3000–4000 тактов имитации, то этот результат учитывался также и в последующих диапазонах: от 4000 до 5000, от 5000 до 6000 и т. д., и наконец, от 9000 до 10 000 тактов имитации. Поэтому при определении вероятности выполнения миссии к концу испытания вероятность выполнения миссии стремилась к 0, поскольку результативными оказывались только единичные испытания.

Таким образом, результатом выполнения серии испытаний из 100 испытаний является массив моментов времени, в которые функционирование группы АНПА становилось невозможным. По полученным результатам строилась зависимость (в графическом виде) изменения вероятности выполнения миссии с течением времени.

На рис. 3 приведены результаты численных экспериментов — зависимость изменения вероятности выполнения миссии с течением времени. Время по горизонтальной оси приведено в тактах



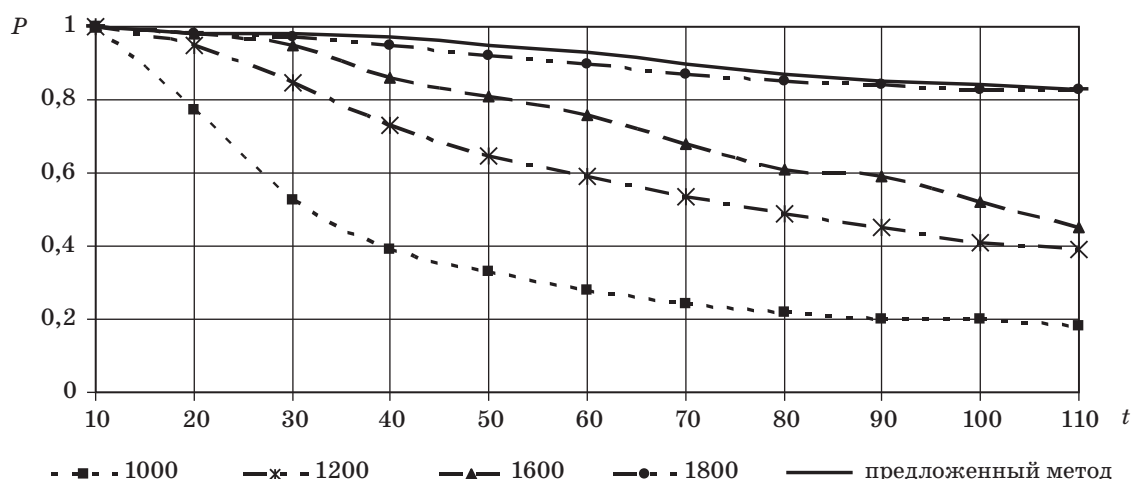


Рис. 3. Изменение вероятности выполнения миссии с течением времени

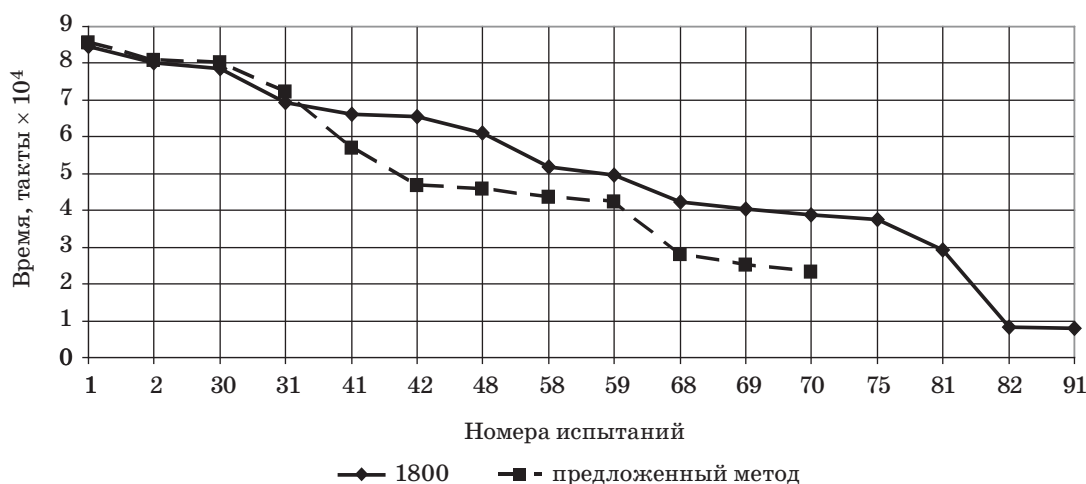


Рис. 4. Зависимость времени осмотра района от количества отвлечений на дозаправку

имитации, каждое деление соответствует количеству тысяч тактов имитации, например, число 10 соответствует 10 тысячам тактов имитации.

Пунктирными линиями показаны результаты, полученные с использованием критериев принятия решения Вальда (1800 м), Гурвица (1000 м), «максимакса» (1200, 1600 м); сплошной линией выделен результат с использованием предложенного метода определения необходимости дозаправки.

Из графика, приведенного на рис. 3, видно, что:

1. При использовании критерия Гурвица решение принималось о дозаправке на каждой второй станции. При этом происходила экономия временного и энергетического ресурса АНПА и группы в целом, однако вероятность выполнения миссии оказалась крайне низкой из-за того, что АНПА не успевали добраться до станции дозаправки.

2. С увеличением критического значения заряда, необходимого для преодоления расстояния

1200 м (при использовании критерия «максимакса»), вероятность выполнения миссии повысилась в среднем на 0,3, при повышении до 1600 м — еще на 0,1 по вероятности выполнения миссии.

3. Использование критерия Вальда привело к существенному повышению вероятности выполнения миссии, которая в заданный промежуток времени не опускалась ниже 0,8.

Однако с точки зрения временных ограничений на осмотр заданного района эффективность функционирования группы АНПА все равно осталась низкой. Дозаправка происходила на каждой станции, что привело к значительному повышению времени осмотра заданного района.

4. При использовании предложенного метода время, затраченное на осмотр заданного района, оказалось существенно меньше, чем при использовании критерия Вальда, а вероятность выполнения миссии оказалась несколько выше. На рис. 4 приведено время остановки всех АНПА группы при

использовании критерия Вальда и предложенного метода. Номера испытаний предварительно были ранжированы так, чтобы с увеличением номера испытания снижалось время остановки всех АНПА группы. Из рис. 4 видно, что при использовании предложенного метода принятия решения время выполнения миссии выше в среднем на 10 000 тактов имитации.

## Заключение

При рассмотрении различных подходов к принятию решения относительно выбора критического значения остаточного уровня электрического заряда АБ АНПА:

- определен показатель эффективности выполнения миссии;
- разработан метод определения оптимального выбора момента отворота на дозаправку;

— разработана математическая модель оценки эффективности функционирования группы АНПА в сетевидной системе;

— проведены численные эксперименты, результаты которых позволили разработать рекомендации по выбору момента времени на отворот на дозаправку.

По результатам проведенных исследований было выявлено, что целесообразно наряду с критическим зарядом использовать дополнительные параметры. Предложенный метод, который учитывал также расход энергии между ближайшей и следующей станциями дозаправки, привел к повышению эффективности функционирования группы АНПА в сетевидной системе освещения подводной обстановки. Повышение вероятности выполнения миссии составило в среднем 0,1 из-за превышения времени осмотра заданного района, вызванного остановками АНПА группы по причине нехватки энергоресурса.

## Литература

1. Пешехонов В. Г., Брага Ю. А., Машошин А. И. Сетевидный подход к решению проблемы освещения подводной обстановки в Арктике // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 3. Т. 128. С. 219–227.
2. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. М. Д. Агеева. — М.: Наука, 2005. — 320 с.
3. Пантов Е. Н., Махин Н. Н., Шереметов Б. Б. Основы движения подводных аппаратов. — Л.: Судостроение, 1973. — 216 с.
4. Белоусов И. Г. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США (2013) // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 5. С. 79–88.
5. Цариченко С. С. АНПА GAVIA — подводный исследователь // Гидротехника. 2011. № 2 (22). С. 112–114.
6. FDECO Program. [www.navaldrone.com/FDECO.html](http://www.navaldrone.com/FDECO.html) (дата обращения: 21.02.2017).
7. Черноуцкий А. А. Методы принятия решений. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 408 с.
8. Костенко В. В., Михайлов Д. Н. Определение параметров энергосилового устройства автономного необитаемого подводного аппарата по заданной дальности хода // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 70–73.
9. Особенности заряда и эксплуатации аккумуляторов. [www.os-propo.info/content/view/98/1/](http://www.os-propo.info/content/view/98/1/) (дата обращения: 21.02.2017).
10. Герасимов В. А., Филоженко А. Ю., Чепурин П. И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 47–55.
11. Гмурман В. Е. Теория вероятности и математическая статистика. — М.: Высш. шк., 2000. — 305 с.
12. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 400 с.
13. Мартынова Л. А. Имитационная модель оценки эффективности функционирования АНПА // Тр. Междунар. конф. по судостроению и океанотехнике, Санкт-Петербург, 6 июня–8 июля 2016 г. — СПб.: СПбГМТУ, 2016. С. 455–469.
14. Мартынова Л. А., Розенгауз М. Б. К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5. С. 25–34. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.25
15. Мартынова Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В. Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // Материалы конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2016), 4–6 октября 2016 г. СПб., 2016. С. 205–209.
16. Мартынова Л. А., Машошин А. И. Особенности оценки эффективности функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов в нестандартных ситуациях // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». СПб.: Ап4Принт, 2016. С. 86–91.
17. Безрук Г. Г., Мартынова Л. А. Оценка эффективности образцов робототехнических комплексов в условиях противодействия // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. 2016. № 11–12 (101–102). С. 45–49.

UDC 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.47

**Efficient Operation of a Group of Standalone Unmanned Submersibles in a Network-Centric System of Underwater Illumination**Martynova L. A.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, martynowa999@bk.ruRozengauz M. B.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, rozengauz\_mb@mail.ru<sup>a</sup>State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** A typical modern network-centric system of underwater illumination includes a group of standalone unmanned submersibles providing the illumination and monitoring of the marine environment, and immovable refill stations accepting the data from a device and filling up its energy resource. Designing a network-centric system implies a decision-making problem concerning the refill of the submersibles in order, on the one hand, to provide a sufficient resource for the transition to the next refill station and, on the other hand, to ensure that the general time of the survey does not exceed the predefined limit. **Purpose:** We develop a decision-making method for the refill of standalone unmanned submersibles, which would provide effective functioning for a group of submersibles in a network-centric system of underwater illumination. **Results:** A new decision-making method has been proposed which uses an additional factor: the energy necessary to cover the distance between the nearest refill station and the next one. Mathematical modeling and numerical experiments were conducted to determine the quantitative characteristics of using the conventional decision-making criteria and the proposed method. The obtained results have demonstrated an advantage of using the proposed method. **Practical relevance:** When designing a network-centric system of underwater illumination, assessing the possibilities of standalone unmanned submersibles and refill stations allows you to solve the problems of their placement topology, resource intensity and temporal characteristics.

**Keywords** — Standalone Unmanned Submersible, Mathematical Modeling, Decision-Making Method, Refill Station, Network-Centric System.

**References**

1. Peshehonov V. G., Braga Yu. A., Mashoshin A. I. Network-Centric Approach to a Solving of the Problem in Arctic. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 3, vol. 128, pp. 219–227 (In Russian).
2. *Autonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii* [Independent Underwater Robots. Systems and Technologies], Ed. M. D. Ageev. Moscow, Nauka Publ., 2005. 320 p. (In Russian).
3. Pantov E. N., Mahin N. N., Sheremetov B. B. *Osnovy dvizheniia podvodnykh apparatov* [Bases of the Movement of Submersibles]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1973. 216 p. (In Russian).
4. Belousov I. G. Modern and Perspective Uninhabited Submersibles of Naval Forces of the USA (2013). *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2013, no. 5, pp. 79–88 (In Russian).
5. Tsarichenko S. S. ANPA GAVIA is an Underwater Researcher. *Gidrotekhnika*, 2011, no. 2 (22), pp. 112–114 (In Russian).
6. *FDECO Program*. Available at: [www.navaldrone.com/FDECO.html](http://www.navaldrone.com/FDECO.html) (accessed 03 March 2017) (In Russian).
7. Chernorutsky A. A. *Metody priniatiia reshenii* [Decision Making Methods]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005. 408 p. (In Russian).
8. Kostenko V. V., Mikhailov D. N. Determination of Parameters AUV'S Power Plant on the Set of Long Cruising Rang. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 3 (140), pp. 70–73 (In Russian).
9. *Osobennosti zariada i ekspluatatsii akkumulatorov* [Features of a Charge and Operation of Accumulators]. Available at: [www.os-propo.info/content/view/98/1/](http://www.os-propo.info/content/view/98/1/) (accessed 03 March 2017).
10. Gerasimov V. A., Filozhenko A. J., Chepurin P. I. Structure of the System Noncontact Energy Issue of Autonomous Undersea Device. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 3 (140), pp. 47–55 (In Russian).
11. Gmurman V. E. *Teoriia veroiatnosti i matematicheskaiia statistika* [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 2000. 305 p. (In Russian).
12. Buslenko N. P. *Modelirovanie slozhnykh sistem* [Modeling of Difficult Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 400 p. (In Russian).
13. Martynova L. A. A Simulation Model of an Efficiency Evaluation of Functioning of ANPA. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po sudostroeniiu i okeanotekhnike* [Proc. Intern. Conf. on Naval Architecture and Ocean Engineering]. Saint-Petersburg, 2016, pp. 455–469. Available at: <https://yadi.sk/i/mDou6wzuiuVvS3> (accessed 03 March 2017) (In Russian).
14. Martynova L. A., Rozengauz M. B. Reliability of an Autonomous Underwater Vehicle with a Multiagent Control System. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 5, pp. 25–34 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.25
15. Martynova L. A., Mashoshin A. I., Pashkevich I. V. Approaches to an Efficiency Evaluation of the Autonomous Underwater Vehicle. *Materialy konferentsii "Upravlenie v morskikh i ajerokosmicheskikh sistemah" (UMAS-2016)* [Proc. of the Conf. "Management in Sea and Space Systems" (UMAS-2016)], Saint-Petersburg, 2016, pp. 205–209 (In Russian).
16. Martynova L. A., Mashoshin A. I. Features of an Efficiency Evaluation of Functioning of Autonomous Underwater Vehicle in Emergency Situations. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Jekstremal'naja robototekhnika"* [Proc. of the Intern. Scientific and Technical Conf. "Extreme Robotics"]. Saint-Petersburg, Ap4Print Publ., 2016, pp. 86–91 (In Russian).
17. Bezruk G. G., Martynova L. A. An Efficiency Evaluation of Samples of Robotic Complexes in the Conditions of Counteraction. *Voprosy oboronnoy tekhniki*, Ser. 16, 2016, no. 11–12 (101–102), pp. 45–49 (In Russian).