

Л.А. Мартынова, М.Б. Розенгауз

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ АНПА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НА МАРШРУТНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ОТКАЗОВ*

Целью исследований является возвращение автономного необитаемого подводного аппарата на маршрутную траекторию в кратчайший срок после проведения обсервации при возникновении отказов в исполнительных устройствах, обеспечивающих движение аппарата. Необходимость решения задачи вызвана тем, что при преодолении аппаратом расстояний в несколько тысяч километров возникает отклонение его положения от маршрутной траектории ввиду накопления погрешности счисления координат бортовой инерциальной навигационной системой. В результате аппарат вынужден возвращаться на маршрутную траекторию, в ходе которого возможно возникновение отказа в исполнительных устройствах, обеспечивающих движение аппарата. Ранее в такой постановке задача не рассматривалась, а подходы, используемые в аналогичных ситуациях к беспилотным летательным аппаратам, оказались непригодными. Наиболее характерными причинами, отличающими подводный аппарат от беспилотника, являются: различие в причинах отклонения от маршрутной траектории (инерциальная система у аппарата и ветер у беспилотника), отсутствие навигации по сигналам спутниковых радионавигационных систем и невозможность контроля своего местоположения при возвращении на маршрут, низкая маневренность аппарата по сравнению с беспилотником. Для решения задачи обеспечения движения аппарата к маршрутной траектории в случае возникновения отказа исполнительного устройства, обеспечивающего движение аппарата, предложено взамен отказавшего устройства выбрать альтернативное из числа дублирующих. Выбор дублирующего устройства определен, прежде всего, моментом, создаваемым устройством для маневрирования аппарата по курсу. При этом показано, что ввиду ограничений на возможность дублирующего устройства обеспечить аппарату требуемый маневр по курсу, необходимо выбирать также и траекторию движения аппарата при возвращении на маршрутную траекторию. Для этого были проанализированы пять возможных методов возвращения, отличающихся динамикой изменения курса, протяженностью пути, продолжительностью маневрирования. С учетом плавности изменения курса для каждой траектории были определены наиболее подходящие исполнительные устройства, способные обеспечить движение аппарата по выбранной траектории. Основным критерием при выборе траектории, наряду с учетом ограничений, являлась минимизация пройденного пути до маршрутной траектории с целью экономии энергоресурса аппарата. После выбора исполнительного устройства и траектории движения аппарата для восстановления на маршрутной траектории приведена последовательность вычислений для определения параметров исполнительного устройства в каждый момент времени на всем протяжении возвращения аппарата на маршрутную траекторию. Результаты проведенных исследований позволили решить задачу восстановления положения автономного необитаемого подводного аппарата на маршрутной траектории за кратчайшее время при возникновении отказа в исполнительных устройствах, обеспечивающих его движение.

Автономный необитаемый подводный аппарат; маршрутное задание; отказ исполнительного устройства; управление движением.

L.A. Martynova, M.B. Rozenhaus

AUV MOTION CONTROL FOR RECOVERY ON THE ROUTE TRAJECTORY IN THE OCCURRENCE OF FAILURES

The aim of the research is to return the autonomous underwater vehicle to the route trajectory as soon as possible after the observation in the event of failures in the actuators that ensure the movement of the vehicle. The need to solve the problem is due to the fact that when the device overcomes distances of several thousand kilometers, its position deviates from the route trajectory

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

due to the accumulation of the error in the reckoning of coordinates by the onboard inertial navigation system. As a result, the apparatus is forced to return to the route trajectory, during which a failure may occur in the actuators that ensure the movement of the apparatus. Previously, the problem was not considered in this formulation, and the approaches used in similar situations to unmanned aerial vehicles turned out to be unsuitable. The most typical reasons that distinguish an underwater vehicle from a drone are: the difference in the reasons for deviation from the route trajectory (inertial system for the device and the wind for the drone), lack of navigation using signals from satellite radio navigation systems and the inability to control its location when returning to the route, low maneuverability of the device in comparison with the drone. To solve the problem of ensuring the movement of the apparatus to the route trajectory in the event of a failure of the executive device, which ensures the movement of the apparatus, it is proposed to choose an alternative one from the number of redundant ones instead of the failed one. The choice of a backup device is determined, first of all, by the moment created by the device for maneuvering the apparatus along the course. At the same time, it is shown that, in view of the limitations on the ability of the backup device to provide the apparatus with the required maneuver along the course, it is also necessary to choose the trajectory of the apparatus when returning to the route trajectory. For this, five possible return methods were analyzed, differing in the dynamics of the course change, the length of the path, and the duration of maneuvering. Taking into account the smoothness of the course change for each trajectory, the most suitable actuators were determined, capable of ensuring the movement of the apparatus along the selected trajectory. The main criterion when choosing a trajectory, along with taking into account the limitations, was to minimize the distance traveled to the route trajectory in order to save the energy resource of the apparatus. After the selection of the actuator and the trajectory of the apparatus for restoration on the route trajectory, a sequence of calculations is presented to determine the parameters of the actuator at each moment of time throughout the return of the apparatus to the route trajectory. The results of the research made it possible to solve the problem of restoring the position of an autonomous underwater vehicle on the route trajectory in the shortest possible time in the event of a failure in the executive devices that ensure its movement.

Autonomous underwater vehicle; route assignment; failure of the actuator; motion control.

Введение. В настоящее время благодаря развитию техники и технологиям появилась возможность создания автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), способного в течение длительного времени преодолевать значительные расстояния в несколько тысяч километров [1]. Движение АНПА происходит вдоль заданной маршрутной траектории, положение АНПА на которой обеспечивается системой управления АНПА по результатам обработки поступающей от подсистем информации [2]. Навигационные определения текущего положения АНПА осуществляются по данным бортовой инерциальной навигационной системы (БИНС). С течением времени происходит накопление ошибки определения местоположения [3], в результате чего АНПА вынужден выполнять обсервацию по внешним источникам информации (например, по сигналам спутниковой навигационной системы). По результатам обсервации в целях безопасности АНПА необходимо в кратчайшие сроки восстановить свое положение на маршрутной траектории, поскольку отклонение может привести к попаданию АНПА в неблагоприятные условия, неоптимальному маршруту движения, столкновению с препятствием, попаданию в опасные зоны и т.д., что в конечном итоге скажется на эффективности его функционирования [4]. Восстановление АНПА на маршрутной траектории сопровождается изменением курса движения по направлению к маршрутной траектории [5]. И если движение АНПА вдоль маршрутной траектории прогнозируемо, то маневрирование, связанное с возвращением на маршрутную траекторию после отклонения – не прогнозируемо, так как заранее неизвестно, в какую сторону и насколько произойдет отклонение.

Необходимость маневра для восстановления положения АНПА на маршрутной траектории приводит к изменению параметров движения АНПА, и как следствие, к изменению параметров исполнительных устройств или воздействию дру-

гих исполнительных устройств для наиболее быстрого восстановления АНПА на маршрутной траектории. Иными словами, необходимо не столько сохранять прежние параметры движения, сколько обеспечить скорейшее возвращение АНПА на маршрутную траекторию в целях безопасности и в целях движения АНПА с наименьшими отклонениями.

Из-за длительности плавания АНПА возможно возникновение отказов, в том числе и в исполнительных устройствах, обеспечивающих движение АНПА, и в их приводах. В этом случае, как отмечено в [6], необходимо использовать альтернативные дублирующие исполнительные устройства, имеющиеся у АНПА. В [6] приведен подход к выбору дублирующих устройств, позволяющих в максимальной степени сохранить параметры движения АНПА до отказа.

Для возвращения АНПА на маршрутную траекторию после отказа в исполнительных устройствах возникает задача о выборе дублирующих исполнительных устройств и их параметров.

Выбор исполнительных устройств определяется, как это показано в [6], параметрами движения АНПА. Однако при возникновении необходимости возвращения на маршрутную траекторию существует несколько способов построения траектории возвращения [5]. И в этом случае при отказах возникает задача выбора траектории возвращения АНПА на маршрутную траекторию с учетом ограничений, связанных с использованием дублирующих устройств, и выбора исполнительных устройств и их параметров для обеспечения движения по выбранной траектории.

Таким образом, управление движением АНПА для возвращения на маршрутную траекторию после отказа требует последовательного решения двух задач:

- ◆ выбор наиболее подходящей траектории возвращения с учетом ограничений на маневрирование из-за использования дублирующих устройств;
- ◆ в обеспечение движения по выбранной траектории – определение дублирующих устройств и их параметров.

Ранее в такой постановке применительно к АНПА задача не рассматривалась.

Решения подобной задачи применительно к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) основаны на том, что:

- ◆ легко определяется степень отклонения от маршрутной траектории, поскольку положение АНПА определяется по сигналам спутниковых навигационных систем;
- ◆ БПЛА более маневренны;
- ◆ есть возможность при возвращении на маршрутную траекторию постоянного определения местоположением по сигналам спутниковых радионавигационных систем и корректировки траектории возвращения;
- ◆ как правило, отсутствуют препятствия;
- ◆ есть радиосвязь, возможность передачи телеметрии и, при необходимости, получения корректирующих команд;
- ◆ могут быть использованы оптические средства, позволяющие осуществлять навигацию по видеоизображению;
- ◆ отклонение БПЛА от траектории в большей степени связано с действием ветра (аналог течения для АНПА), поскольку, в отличие от АНПА, отсутствуют специальные средства измерения направления и силы ветра (на борту АНПА используется лаг, определяющий скорость течения);
- ◆ вероятность возникновения препятствий намного меньше из-за меньшей плотности БПЛА в воздухе и достаточном удалении от поверхности земли.

Таким образом, подходы, имеющиеся для БПЛА, не могут быть использованы для АНПА, в связи с чем необходимо было разработать новый подход к решению задачи восстановления АНПА на маршрутной траектории при возникновении отказов.

Цель работы: заключалась в разработке управления движением АНПА при восстановлении АНПА на маршрутной траектории в условиях отказа исполнительного оборудования, обеспечивающего движение АНПА.

1. Постановка задачи. Пусть АНПА осуществляет движение по заданному маршруту.

Для описания движения АНПА по маршруту в формализованном виде введем связанную с корпусом АНПА подвижную систему координат $Oxyz$. Ее начало O – центр тяжести полного подводного объема объекта. Плоскость Oxy совпадает с диаметральной плоскостью (плоскостью симметрии). Ось Ox (продольная) лежит в плоскости Oxy и направлена в нос. Ось Oy (нормальная) лежит в плоскости Oxy и направлена вверх, перпендикулярно оси Ox . Ось Oz (боковая) перпендикулярна плоскости Oxy и направлена на правый борт.

Связанная система координат определяет положение АНПА относительно центра тяжести. Положение объекта в пространстве относительно начала неподвижной системы координат определяется тремя углами – дифферента, курса и крена, а также тремя координатами. Углы атаки и дрейфа определяют положение вектора скорости движения в связанной системе координат.

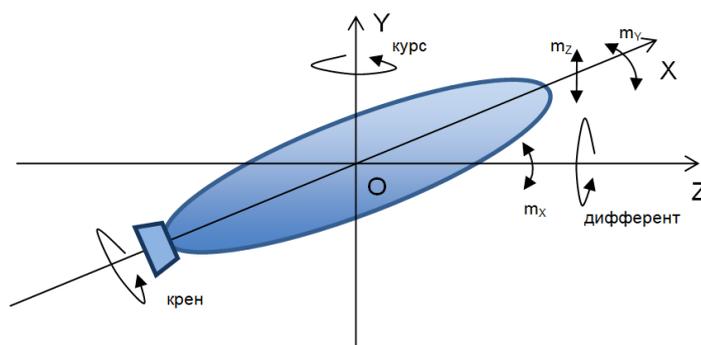


Рис. 1. Силы и моменты, действующие на корпус АНПА в морской среде

Представим модель исправного АНПА в процессе возвращения на маршрутную траекторию в матричном виде [6, 7]:

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

где x – вектор состояния АНПА до отказа размерности m ; u – вектор управления АНПА размерности n ; \mathbf{A} – матрица собственной динамики АНПА, число столбцов которой равно m ; \mathbf{B} – матрица эффективности управления АНПА, отражающая вклад параметров управления в конечный результат работы системы управления; число столбцов которой равно n .

При маневрировании по курсу в качестве штатных исполнительных устройств используют на скорости экономичного хода (порядка 4 уз) кормовые рули, при позиционировании (скорость в пределах 1 уз) горизонтальные подруливающие устройства, расположенные по одному в носовой и кормовой частях АНПА.

Состояние x и управление u АНПА по курсу опишем векторами вида:

$$x = [v_x \quad v_y \quad v_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T \quad (2)$$

$$u = [n_{MD}^2 \quad \delta_{KR} \quad \delta_{NGR} \quad n_{KPU} \quad n_{NPU}]^T, \quad (3)$$

где v_x, v_y, v_z – проекции скоростей на оси связанной с объектом основной подвижной системы координат, м/с; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловых скоростей на оси связанной с объектом, рад/с; n_{MD} – скорость вращения маршевого двигателя, количество оборотов/сек; δ_{KR} – углы перекладки кормовых рулей, в общем случае – различные, рад δ_{NGR} – углы перекладки носовых горизонтальных рулей, в общем случае – различные; n_{KPU} – скорость вращения кормового горизонтального подруливающего устройства, количество оборотов/сек.; n_{NPU} – скорость вращения носового горизонтального подруливающего устройства, количество оборотов/сек.

Эффективность управления АНПА опишем матрицей вида [8, 9]:

$$B = \begin{bmatrix} B_{MD}^F & B_{KR}^F & B_{NGR}^F & B_{KPU}^F & B_{KPU}^F \\ B_{MD}^M & B_{KR}^M & B_{NGR}^M & B_{KPU}^M & B_{KPU}^M \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где B_j^F и B_j^M – блочные матрицы сил и моментов, создаваемых каждым j -ым исполнительным устройством из числа рассматриваемых.

Пусть в некоторый момент времени t выяснилось в результате обсервации, что произошло отклонение АНПА от маршрутной траектории, и АНПА должен кратчайшим путем вернуться на маршрутную траекторию. Выбор кратчайшего пути необходим для того, чтобы:

- ◆ сэкономить энергоресурс;
- ◆ сэкономить время;
- ◆ не попасть в опасные зоны, в обход которых проложен маршрут.

Для этого необходимо маневрирование АНПА по курсу, в результате чего необходимо произвести перерасчет используемых исполнительных устройств и их параметров. Отказ на этапе возврата на маршрутную траекторию критичен тем, что:

- ◆ этап возврата более ответственный по сравнению с обычным движением по маршруту, так как здесь важно как можно более точно выдерживать траекторию;
- ◆ имеются ограничения на маневр;
- ◆ угрожает безопасности плавания;
- ◆ должен минимизировать накопленную ошибку определения собственного местоположения по показаниям БИНС в процессе возвращения АНПА на маршрутную траекторию.

Пусть в некоторый момент времени t в процессе маневрирования произошел отказ органа управления или исполнительного устройства АНПА, обеспечивающего маневрирование. При этом полагаем, что диагностирование надежно и однозначно указывает на отказ органов управления или исполнительных устройств АНПА. Кроме того полагаем избыточность исполнительных устройств для движения АНПА, что является необходимым условием для реконфигурации системы управления движением.

Тогда модель движения АНПА с отказом примет вид [9]:

$$\dot{x}_f = \mathbf{A}x_f + \mathbf{B}_f u_f, \quad (5)$$

где x_f – вектор состояния АНПА после отказа; \mathbf{B}_f – матрица эффективности управления АНПА после отказа; u_f – вектор управления АНПА после отказа.

Представим матрицу \mathbf{B} , как это предложено в [8], в виде:

$$\mathbf{B}_f = \mathbf{B} \cdot \mathbf{F}, \quad (6)$$

где \mathbf{F} – матрица размерности $n \times n$, характеризующая отказ органа управления или исполнительного устройства, и представляемая в виде диагональной матрицы с единицами на главной диагонали и нулями в местах, характеризующих отказ органа управления или исполнительного устройства [9], и равная:

$$\mathbf{F} = \text{diag} (f_1, f_2, \dots, f_n), \text{ где } f_j = 1 - \text{отказа нет}, f_j = 0 - \text{отказ есть}; j = 1, \dots, n.$$

В случае исправного состояния всех органов управления и исполнительных устройств матрица \mathbf{F} – единичная.

Необходимо найти управление u_f такое, которое бы после отказа АНПА сохранял устойчивость и управляемость:

$$u_f = u + u_k. \quad (7)$$

Для этого необходимо выбрать исполнительные устройства из числа дублирующих и их параметры.

В [9] показано, что для нахождения управление u_f необходимо оставшимися с учетом избыточности исполнительными устройствами найти такую матрицу \mathbf{B}_k , которая обеспечивала бы выполнение условия:

$$\mathbf{B}_f = \mathbf{B} + \mathbf{B}_k \quad (8)$$

Для достижения цели проанализируем, в первую очередь, условия использования альтернативных устройств.

Из множества дублирующих исполнительных устройств выбирается то устройство, которое создает силы и моменты, максимально близкие к силам и моментам, которые могли бы быть созданы отказавшим исполнительным устройством на текущей скорости движения АНПА с учетом углов атаки и дрейфа с одновременной компенсацией дополнительных сил и моментов, возникающих в результате отказа органа управления или исполнительного устройства, например, заклинивания рулей [6]. Условие выбора исполнительного устройства представим в виде:

$$\begin{cases} \Delta F_i = \left| F_{iDUB} - (F_{iOTK} + F_{iOTK}^*) \right| \rightarrow \min \\ \Delta M_i = \left| M_{iDUB} - (M_{iOTK} + M_{iOTK}^*) \right| \rightarrow \min \end{cases}, \quad (9)$$

где ΔF_i – невязка сил, действующих на АНПА вдоль осей x_1, y_1, z_1 ; ΔM_i – невязка вращающих моментов вокруг осей x_1, y_1, z_1 , $i = \{x, y, z\}$; F_{iDUB} , M_{iDUB} – силы и моменты, создаваемые дублирующим исполнительным устройством; F_{iOTK} , M_{iOTK} – силы и моменты, которые создавались бы отказавшим исполнительным устройством; F_{iOTK}^* , M_{iOTK}^* – дополнительные силы и моменты, которые возникают из-за отказа исполнительных устройств.

Проанализируем моменты, создаваемые этими устройствами.

Управление по курсу создается за счет момента, формируемого исполнительными устройствами: в первую очередь, кормовыми рулями, а также носовыми рулями и горизонтальными подруливающими устройствами (ПУ) – носовым и кормовым.

В общем виде выражение для расчета момента, за счет которого происходит маневрирование АНПА по курсу, определяется выражением:

$$\sum M_y = m_y \cdot \frac{\rho v^2}{2} V + M_n + M_k, \quad (10)$$

где m_y – позиционные коэффициенты моментов в связанной системе координат; M_n – момент от работы носового вертикального ПУ; M_k – момент от работы кормового вертикального ПУ.

Позиционный коэффициент m_y из (10) определяется при использовании кормовых рулей выражением:

$$m_y = m_y^{\delta_{KP}} \cdot \delta_{KP},$$

при использовании носовых рулей – выражением:

$$m_y = m_y^{\delta_{НПР}} \cdot \delta_{НПР}.$$

Дополнительный момент от работы кормового подруливающего устройства, вращающий АНПА относительно оси Oy , определяется выражением:

$$M_k = T_k \cdot l_k \cdot k_M^k,$$

где l_k – расстояние по длине от центра тяжести полного подводного объема АНПА до носового ПУ, м;

Тяга кормового лагового ПУ определяются выражением:

$$T_k = 0,5 \cdot n^2 \cdot k_t^k \cdot 10^{-3}, \text{ Н},$$

где k_t^k – коэффициент, учитывающий гидродинамические особенности ПУ и зависящий от углов атаки и дрейфа.

Дополнительный момент от работы кормового ПУ, вращающий АНПА относительно оси Oy , определяется выражением:

$$M_k = T_k \cdot l_k \cdot k_M^k,$$

где l_k – расстояние по длине от центра тяжести полного подводного объема до носового ПУ, м;

k_M^k – коэффициент, учитывающий гидродинамические особенности ПУ и зависящий от углов атаки и дрейфа.

Для анализа возможности замены отказавшего исполнительного устройства альтернативным были рассчитаны моменты m_y для трех вариантов управления АНПА по курсу: первый вариант – создаваемого двумя носовыми рулями; второй вариант – создаваемого двумя кормовыми рулями, третий вариант – создаваемого четырьмя кормовыми рулями. При проведении расчетом скорость движения АНПА принималась равной 2 м/с.

Результаты расчетов зависимости моментов m_y , создаваемых кормовыми рулями, носовыми рулями, от углов перекадки – приведены на рис. 2.

Результаты расчетов зависимости моментов m_y , создаваемые кормовым горизонтальным подруливающим устройством и носовым подруливающим устройством, приведены на рис. 3.

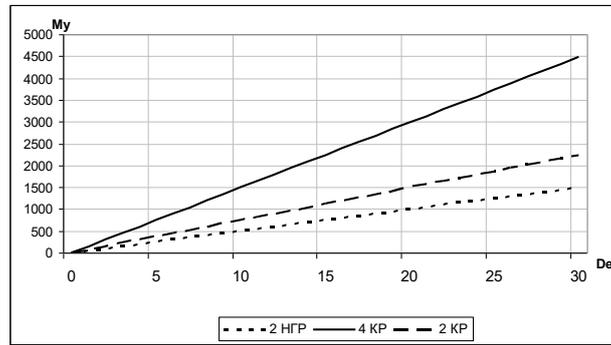


Рис. 2. Зависимость момента t_y от углов перекладки носовых и кормовых рулей

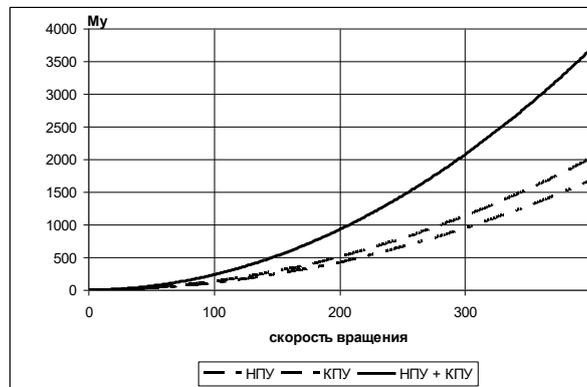


Рис. 3. Зависимость момента t_y от скорости вращения винта горизонтальных подруливающих устройств – носового и кормового

Результаты, приведенные на рис. 2 и 3, показывают, что моменты при использовании носовых рулей близки к результату использования диагонально расположенных кормовых рулей. Так при угле перекладки 10° различие составило менее 200 Н·м, а при максимальном угле перекладки в 30° различие составило меньше 500 Н·м.

При использовании штатных четырех кормовых рулей создаваемый момент существенно превосходит момент двух НГР, которые потенциально планируется использовать в качестве альтернативных.

Таким образом, по результатам анализа видно, что полноценной альтернативы КР – нет, но поскольку маневрировать АНПА все равно надо, чтобы оказаться на маршрутной траектории, то можно будет выбрать дублирующие устройства с учетом траектории восстановления АНПА на маршрутной траектории.

При сравнении моментов, создаваемых парой горизонтальных подруливающих устройств видно, что они на скорости движения АНПА, равной 2 м/с, незначительно проигрывают НГР. Однако при использовании одиночного кормового руля создаваемый момент существенно снижается.

Результаты проведенного анализа показывают, что при выработке курса в процессе движения АНПА при восстановлении АНПА на маршрутной траектории необходимо руководствоваться ограничениями по возможностям дублирующих исполнительных устройств.

Изменение курса в процессе восстановления АНПА на маршрутной траектории определяется выбором метода, который в наибольшей степени соответствовал бы учету ограничений на маневрирование АНПА при восстановлении на маршрутной траектории.

В связи со сказанным, на следующем этапе исследований были рассмотрены различные методы восстановления АНПА на маршрутной траектории.

2. Метод возврата АНПА на маршрутную траекторию. Существует несколько методов возврата АНПА на маршрутную траекторию. Такими методами являются:

- ◆ метод погони;
- ◆ метод наведения с упреждением;
- ◆ метод накрытия цели;
- ◆ алгоритм управления по отклонению угла линии визирования;
- ◆ алгоритм с непосредственным управлением боковым отклонением АНПА от траектории.

Рассмотрим их особенности.

2.1. Метод погони. Для решения задачи следования АНПА траектории исходно используются алгоритмы наведения на цель, в качестве которой рассматривается положение АНПА так, как если бы он не отклонился от маршрутной траектории. Сформированный кинематическим алгоритмом задающий сигнал подается на контур курса. При использовании метода погони [12–20] условием выполнения является непрерывное направление продольной оси АНПА на цель. Исходными параметрами для формирования закона управления являются данные о координатах АНПА в глобальной системе координат, значение угла курса АНПА и заданные координаты точки положения цели на маршрутной траектории. В каждый момент времени принимается, что угол курса АНПА равен углу между линией АНПА-цель и осью абсцисс глобальной системы.

На рис. 4 под номером 3 приведена траектория движения АНПА в результате использования метода погони. На рисунке пунктирной горизонтальной линией показано положение маршрутной траектории, кроме того показаны точки положения АНПА в момент наблюдения и точки положения АНПА для случая отсутствия отклонения от маршрутной траектории.

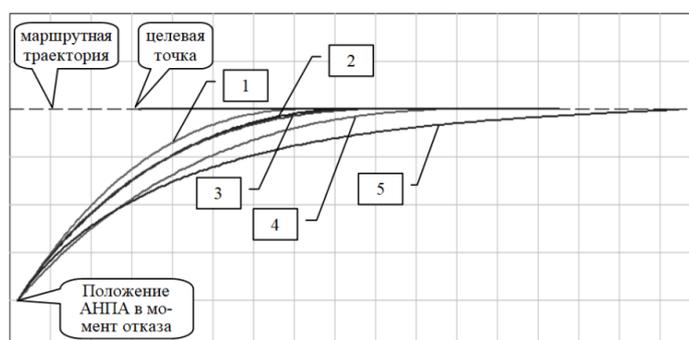


Рис. 4. Траектории движения АНПА для восстановления своего положения на маршрутной траектории разными методами

2.2. Метод наведения с упреждением. При использовании наведения с упреждением вектор скорости АНПА всегда направлен в упрежденную точку встречи с целью, соответствующую данному моменту времени [21]. Условие выполнения метода – $\varphi = const$ или $\dot{\varphi} = 0$, где φ – угол наклона линии «АНПА – цель» в глобальной системе координат. Для выполнения этого условия вектор скорости перемещения АНПА в глобальной системе координат должен быть направлен на заданную точку траектории (проекция скорости перемещения АНПА на ось, перпендикулярную линии «АНПА – цель», должна быть равна 0). Траектория движения АНПА при использовании наведения с упреждением приведена на рисунке 4 под номером 4. Из сравнения траектории 1 и траектории 2 видно, что при движении АНПА по методу с непрерывным упреждением его траектория незначительно отличается от траектории движения по методу погони, однако траектории движения при наведении с упреждением ближе к желаемой, чем в методе погони.

Преимуществом данного метода является простота определения курса движения АНПА, наилучшие условия сближения с маршрутной траекторией в конце наведения, так как вектор скорости АНПА (его продольная ось) постоянно направлены в целевую точку.

2.3. Метод накрытия цели. По методу накрытия цели АНПА находится на прямой «командный пункт (КП) - цель» [22]. В качестве КП примем предыдущую точку траектории.

Условием выполнения метода является равенство угла γ между векторами «АНПА-КП» и «АНПА-цель» π радиан или равенство нулю угла между векторами «АНПА-цель» и «КП-цель». Требуемый угол курса АНПА вычисляется в соответствии со следующим выражением:

$$\varphi_t = \varphi_{t-1} + K \cdot \gamma$$

где φ_{t-1} – предыдущее значение угла курса АНПА; K – коэффициент системы управления.

Траектория движения АНПА по методу накрытия приведена на рисунке 4 под номером 2. Из рис. 4 видно, что траектория носит более пологий характер, более протяженная по длине, а, значит и по времени, чем траектории предыдущих двух методов. В связи с этим такой метод целесообразно применять для варианта с ограничениями на изменение курса, которые могут быть вызваны недостаточным моментом, создаваемым дублирующим исполнительным устройством, заменившим отказавшее исполнительное устройство.

Из рис. 4 видно, что наибольшая кривизна траектории имеет место в конце траектории.

2.4. Алгоритм управления по отклонению угла линии визирования.

Данный алгоритм является модификацией предыдущего алгоритма накрытия цели. Задача системы управления – совместить линию визирования «АНПА – заданная точка траектории» с идеальной траекторией. Условием выполнения совмещения линии является равенство нулю угла β между линией визирования и линией идеальной траектории [23]. Заданный угол курса АНПА определяется выражением:

$$\varphi_t = \varphi_{t-1} + K_\varphi \cdot \lambda + K_\varphi \cdot K_u \cdot \int \lambda dt$$

где K_φ, K_u – коэффициенты системы управления.

Достоинством алгоритма является то, что, в отличие от метода накрытия цели, отсутствует колебательный характер траектории движения АНПА при переходе на новый участок галса. При этом АНПА следует по траектории, близкой к идеальной, совпадающей с маршрутной траекторией.

Траектория движения АНПА по методу накрытия приведена на рис. 4 под номером 1. Из рисунка 4 видно, что траектория, полученная при использовании алгоритма управления по отклонению угла линии визирования, имеет наиболее короткий путь восстановления АНПА на маршрутной траектории. Это, безусловно, сокращает время и электроэнергию, однако при этом предъявляет повышенные требования к изменению курса. Может оказаться, что не всякое исполнительное устройство способно обеспечить такой маневр.

2.5. Алгоритм с непосредственным управлением боковым отклонением АНПА от траектории. При использовании алгоритма с непосредственным управлением боковым отклонением АНПА от траектории [24] сигнал, подаваемый на контур курса системы управления АНПА, определяется выражением:

$$\varphi_t = \varphi_{t-1} + K_\varphi \cdot d_{MT},$$

где d_{MT} – боковое отклонение АНПА от маршрутной траектории.

Траектория движения АНПА по методу накрытия приведена на рис. 4 под номером 5. Как видно из рисунка 4, данная траектория является наиболее полой и самой протяженной. Вследствие этого ее использование целесообразно только в случае существенных ограничений на работу исполнительных устройств АНПА, обеспечивающих маневрирование по курсу.

Таким образом, результаты анализа возможных методов восстановления АНПА на маршрутной траектории показана возможность подбора наиболее подходящей траектории под особенности исполнительных устройств, обеспечивающих маневр по курсу.

Поэтому исследования следующего этапа были направлены на определение наиболее подходящего метода восстановления АНПА на маршрутной траектории с учетом ограничений на действия, создаваемые исполнительными устройствами в зависимости от скорости движения АНПА.

3. Выбор альтернативного исполнительного устройства из числа дублирующих. Управление АНПА по курсу при движении в режиме экономичного хода (до 4 узлов) традиционно осуществляется с помощью кормовых рулей. В качестве дублирующих можно рассматривать носовые рули при перекладке их синхронно враздрай, то есть не параллельно, а в противоположных направлениях.

Выбор исполнительных устройств означает также и определение их параметров: углов перекладки рулей в случае отказа кормовых рулей.

В процессе исследований были проведены расчеты изменения курса с течением времени по каждому из пересиленных методов. Результаты расчетов в виде зависимости изменения курса с течением времени представлены на рис. 5.

Из результатов, приведенных на рис. 5, следует, что в зависимости от выбранного метода движения АНПА к маршрутной траектории зависит характер изменения курса. Анализ результатов рисунка 5 показывает, что при использовании всех методов состоялось приведение АНПА на маршрутную траекторию, однако протяженность траектории и динамика изменения курса по мере движения по траектории – различны: для методов 2 и 5 – более стабильное, в методах 1 и 3 – более изменяющееся. На рис. 6 приведен градиент изменения курса при движении АНПА рассмотренными методами.

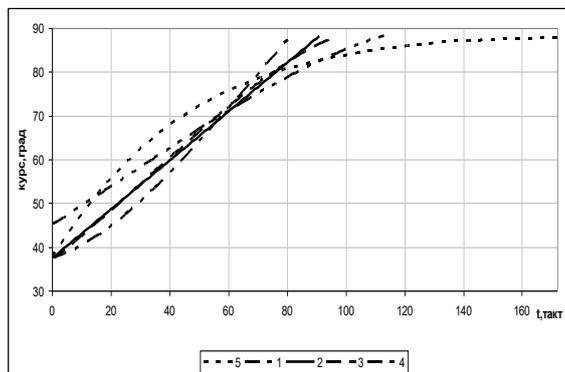


Рис. 5. Зависимость изменения курса с течением времени при разных траекториях движения АНПА

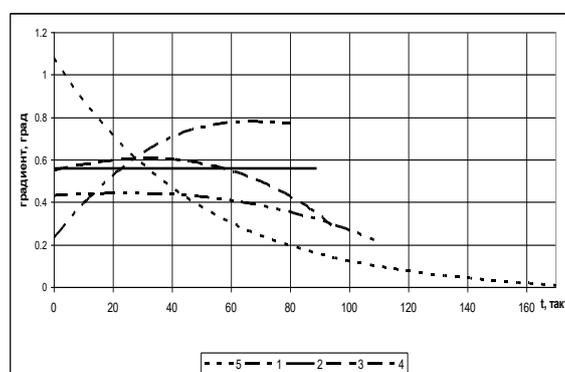


Рис. 6. Изменение градиента курса с течением времени для различных методов восстановления АНПА на маршрутной траектории

Из результатов, приведенных на рис. 6 видно, что при методе 2 курс стабилен с течением времени, а наибольший диапазон изменения наблюдается при методе 5.

Ниже в таблице приведены минимальное (min) и максимальное (max) значения изменения курса, а также диапазон τ от минимального до максимального значений. Кроме того, в таблице приведена продолжительность движения АНПА до маршрутной траектории.

Таблица

Минимальное, максимальное изменение курса и диапазон изменения

№ п/п	Наименование метода	min	max	max-min	T
1	Алгоритм управления по отклонению угла линии визирования	0,232506	0,776354	0,543848	84
2	Метод накрытия цели	0,557999	0,558001	1,70755·10 ⁻⁶	93
3	Метод погони	0,290804	0,604072	0,313268	98
4	Метод наведения с упреждением	0,201649	0,441923	0,240275	113
5	Алгоритм с непосредственным управлением боковым отклонением АНПА от траектории	0,005166	1,078562	1,073396	172

По данным, приведенным в таблице, видно, что по «Алгоритму управления по отклонению угла линии визирования» (1) начало траектории – самое плавное из всех рассмотренных методов, однако затем ближе к маршрутной траектории изменение курса с течением времени возрастает. В методе (4) все наоборот, с приближением к маршрутной траектории плавность траектории – увеличивается. Метод накрытия цели (2) имеет практически нулевое изменение курса. Это удобно тем, что целевой курс на всем протяжении АНПА к маршрутной траектории не меняется. В методе (3) изменение курса в начале траектории такое же, как при использовании метода (2), однако при приближении к маршрутной траектории изменение курса становится более плавным. И, наконец, особенностью траектории «Алгоритма с непосредственным управлением боковым отклонением АНПА от траектории» является наибольший диапазон между минимальным и максимальным значениями изменения курса, наибольшее изменение курса на начальном участке траектории и наименьшее изменение курса на конечном участке траектории из всех рассмотренных вариантов.

Поэтому при выборе дублирующего исполнительного устройства предлагается учитывать характер наклона, протяженность и изменение курса с течением времени. Так, более плавное изменение курса больше подходит для использования одного ПУ (вариант 5), менее плавное – для использования двух ПУ, средний – для использования пары НГР враздрай, наиболее вертикальные – для двух либо диагонально расположенных КР, либо для всех четырех КР.

Таким образом, показано, что выбор исполнительных устройств определяется, во-первых, диапазоном изменения курса, а во-вторых – минимальными и максимальными изменениями курса. Это позволяют оценить возможность применения исполнительного устройства. Так, если устройство не обеспечивает максимально необходимое изменение курса, то надо выбирать более плавную траекторию, например постоянным курсом. При выборе алгоритма восстановления одновременно есть возможность оценить время восстановления на маршрутной траектории и затрачиваемый энергоресурс.

Например, пусть сложилась ситуация, при которой можно было бы выбрать наиболее плавную траекторию, однако необходимо по кратчайшему пути вернуться на маршрутную траекторию с целью экономии энергоресурса и времени, поэтому если то же самое выбранное исполнительное устройство позволяет, то целесообразнее выбрать более короткий маршрут, допустимый с учетом ограничений на возможности исполнительного устройства.

4. Определение параметров выбранного исполнительного устройства.

Пусть определено исполнительное устройство, которое способно заменить отказавшее исполнительное устройство, и пусть выбрана траектория, по которой АНПА выполнит движение для восстановления своего положения на маршрутной траектории.

Целевое значение управляющего момента по курсу M_y^{per} , обеспечивающее аппарату движение с программным изменением курса на ходу, определяется выражением:

$$M_y^{\text{per}} = K_{\text{п}\phi} \cdot (\varphi_{\text{ц}} - \varphi) - K_{\text{д}\phi} \cdot \dot{\varphi},$$

где $\varphi_{\text{ц}}$, φ – целевое и текущее значение курса, соответственно;

$\dot{\varphi}$ – текущее значение угловой скорости рыскания;

$K_{\text{п}\phi}$, $K_{\text{д}\phi}$ – пропорциональный и дифференциальный коэффициенты закона регулирования угла курса.

Исходя из момента, определяем углы перекадки и скорость вращения ПУ. При этом заданные регуляторами углы поворота кормовых рулей в градусах, обеспечивающие независимое и равноценное формирование управляющих моментов, определяются соотношениями

$$\delta_{ЛР} = \frac{180}{2\pi v^2} \cdot \frac{M_y^{\text{пер}}}{\rho V},$$

где V – полное подводное объемное водоизмещение, м³;

ρ – плотность воды, тс·с²/м⁴;

v – скорость движения АНПА.

Пусть принято решение, что для маневрирования по курсу использовать горизонтальные подруливающие устройства.

Для реализации управляющего момента $M_y^{\text{пер}}$ по курсу необходимо определить соответствующие целевые обороты носового и кормового горизонтального ПУ. Момент, создаваемый носовым горизонтальным ПУ и кормовым горизонтальным ПУ, определяется выражениями:

$$M_y^{\text{ГПУ}} = T_k \cdot l_k \cdot k_M^k - T_n \cdot l_n \cdot k_M^n,$$

где $M_y^{\text{ГПУ}}$ – курсовой момент, создаваемый горизонтальными ПУ, в Н·м; T_n – тяга носового ПУ, Н; T_k – тяга кормового ПУ, Н.

Тяги, создаваемые в результате работы носовым горизонтальным ПУ и кормовым горизонтальным ПУ, определяются выражениями:

$$T_k = K_k \cdot n^2 \cdot k_M^k \cdot g,$$

$$T_n = K_n \cdot n^2 \cdot k_M^n \cdot g,$$

где g – ускорение свободного падения, $g=9,8$ м/с²;

K_k и K_n – коэффициенты уравнения тяги, полученные эмпирическим путем.

Корректное распределение курсового момента между горизонтальными ПУ требует учета ограничения на их тяги, обусловленные максимально допустимой частотой вращения электроприводов $n=500/60=8,333$ об/с. Приняв допущение о равенстве коэффициентов $k_M^k=1$ и $k_M^n=1$, определим максимальное значение курсового момента горизонтальных ПУ.

Для принятых исходных данных ($n=8,333$ об/с, $l_k=l_1$ м, $l_n=-l_2$ м) $M_y^{\text{ГПУ}}=5000$ Н·м при одинаковых направлениях вращения горизонтальных ПУ максимальная достижимая лаговая тяга будет определяться выражением:

$$T_z^{\text{ГПУ}} = T_k \cdot l_k - T_n \cdot l_n.$$

При этом скорость вращения горизонтальных ПУ, обеспечивающая независимое и равноценное формирование управляющего момента и лаговой тяги, будет определяться соотношениями:

$$n_n = \sqrt{\left| \frac{T_z^{\text{ГПУ}} - M_y^{\text{ГПУ}} / l_n}{2 \cdot 9,8 \cdot 0,5} \right|} \cdot \text{sign}(T_z^{\text{ГПУ}} - M_y^{\text{ГПУ}} / l_n) \cdot 60$$

для носового горизонтального ПУ;

$$n_k = \sqrt{\left| \frac{T_z^{\text{ГПУ}} - M_y^{\text{ГПУ}} / l_k}{2 \cdot 9,8 \cdot 0,5} \right|} \cdot \text{sign}(T_z^{\text{ГПУ}} - M_y^{\text{ГПУ}} / l_k) \cdot 60$$

для кормового горизонтального ПУ.

По результатам расчетов по приведенным выше выражениям формируются рекомендации по применению исполнительных устройств в тех или иных ситуациях при разных скоростях.

Заключение. В работе решается задача выбора дублирующих исполнительных устройств при движении АНПА для восстановления его положения на маршрутной траектории. Для этого рассмотрены пять различных вариантов траектории движения АНПА к маршрутной траектории, отличающиеся градиентом изменения курса, длиной пути, продолжительностью маневрирования. В зависимости от возможного выбора альтернативных исполнительных устройств и ограничений, накладываемых от их использования на изменение курса, осуществляется выбор маршрутной траектории. Приведен алгоритм расчета параметров выбранного исполнительного устройства. Результаты проведенных исследований позволяют расширить возможности использования альтернативных исполнительных устройств в случае отказа традиционно используемых при маневрировании.

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., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.* Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 50-58.
3. *Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А.* Навигация и управление движением судов. – СПб.: Элмор, 2002. – 359 с.
4. *Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.* Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016). Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 205-209.
5. *Мартынова Л.А.* Метод эффективного удержания положения АНПА на маршрутной траектории при ведении сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. – 2018. – № 3. – С. 34-44. – DOI: 10.15217/issn1684-8853.2018.3.34.
6. *Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.* Подход к реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. – 2020. – Т. 28, № 2 (109). – С. 131-146.
7. *Лямина Е. А.* Алгоритмы управления движением группы АНПА по поисковым траекториям. – <http://sntbul.bmstu.ru/doc/637281.html> (дата обращения: 15.05.2021).
8. *Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Пролетарский А.В.* Аналитический синтез законов управления боковым движением летательного аппарата // Известия вузов. Авиационная техника. – 2015. – № 3. – С. 14-20.
9. *Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Ефанов Д.Е.* Аналитический синтез законов управления продольным движением летательного аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2015. – № 2. – С. 3-14.
10. *Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В.* Аналитический синтез многосвязных отказоустойчивых систем управления с упрощенной схемной реализацией // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 108-117.
11. *Shuping Hou, Jian Xu, Zheping Yan* Implementation of Autonomous Reconfigured Control for AUV Based on Fault Detection and Isolation. – DOI: 10.1109/ISMA.2007.4303543.
12. *Очков В.Ф., Васильева И.Е.* Применение разностных схем к решению задачи о погоне // Тр. СПИИРАН. – 2019. – 18 (6). – P. 1407-1433. – <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.6.1407-1433>.

13. *Petrosyan L.A., Mazalov V.V.* Recent Advances in Game Theory and Applications. – Springer International Publishing, 2016. – 284 p.
14. *Mazalov V., Chirkova J.V.* Networking Games. Network Forming Games and Games on Networks. – Academic Press, 2019. – 322 p.
15. *Petrosyan L.A.* Differential Games of Pursuit. – World Scientific, 1993. – 332 p.
16. *Isaacs R.* Differential Games: A Mathematical Theory with Applications to Warfare and Pursuit, Control and Optimization. – Courier Corporation, 1999. – 416 p.
17. *Kumkov S.S., Le Menec S., Patsko V.S.* Zero-sum pursuit-evasion differential games with many objects: survey of publications // *Dynamic Games and Applications*. – 2017. – Vol. 7, No. 4. – P. 609-633.
18. *Ramana M.V., Kothari M.* Pursuit-evasion games of high speed evade // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2017. – Vol. 85, No. 2. – P. 293-306.
19. *Паньков С.Я.* Теория и методика управления авиацией. учеб. пособие в 2 ч. / под общ. ред. В.А. Мещерякова. – Ульяновск: ЦУВАУ ГА, 2006. – 190 с.
20. *Dohi N., Baba Y., Takano H.* Modified proportional navigation for a missile with varying velocity - comparison with the optimal guidance // *The proceeding of 24th international congress of the aeronautical sciences ICAS – 2004*. – Yokohama, Japan. – 2004. – Vol. 7. – P. 207-215.
21. *Palumbo Neil F., Blauwkamp Ross A., Lloyd Justin M.* Modern homing missile guidance theory and techniques // *Johns Hopkins APL Technical digest, USA*. – 2010. – Vol. 29, No. 1. – P. 42-59.
22. *Аранович Г.П., Михайлин Д.А.* Управление и наведение самолетов и ракет. – <https://mai.ru/upload/iblock/efa/efab8f94fdae57f3174761563981a21b.pdf> (дата обращения: 21.05.2021).
23. *Соловьев Г.А., Чузунова В.А.* Метод наведения летательных аппаратов на наземные объекты с использованием БРЛС С САР // *Тр. СПИИРАН*. – 2013. – Вып. 4 (27). – С. 156-171.
24. *Кулифеев Ю.Б., Миронова М.М.* Алгоритмы автоматического управления боковым движением ударного беспилотного летательного аппарата самолетного типа на воздушном участке полета // *Тр. МАИ*. – 2015. – Вып. № 84. – С. 1-14.

REFERENCES

1. *Appolonov E.M., Bachurin A.A., Gorokhov A.I., Ponomarev L.O.* O vozmozhnosti i neobkhodimosti sozdaniya sverkhbol'shogo neobitaemogo podvodnogo apparata [On the possibility and necessity of creating an extra-large uninhabited underwater vehicle], *Sb. materialov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective Systems and Control Problems"]. Rostov-on-Don – Taganrog: YuFU, 2018, pp. 34-42.
2. *Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V., Sokolov A.I.* Algoritmy, realizuemye integrirovannoy sistemoy upravleniya ANPA [Algorithms implemented by the integrated control system of AUV], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 50-58.
3. *Lukomskiy Yu.A., Peshekhonov V.G., Skorokhodov D.A.* Navigatsiya i upravlenie dvizheniem sudov [Navigation and ship traffic control]. Saint Petersburg: Elmor, 2002, 359 p.
4. *Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V.* Podkhody k otsenke effektivnosti avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata Upravlenie v morskikh i aerokosmicheskikh sistemakh (UMAS-2016). Saint Petersburg: AO «Kontsern «TSNII «Elektropribor», 2016, pp. 205-209.
5. *Martynova L.A.* Metod effektivnogo uderzhaniya polozheniya ANPA na marshrutnoy traektorii pri vedenii seysmorazvedki [Method of effective retention of the AUV position on the route trajectory during seismic exploration], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2018, No. 3, pp. 34-44. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2018.3.34.
6. *Martynova L.A., Rozengauz M.B.* Podkhod k rekonfiguratsii sistemy upravleniya dvizheniem avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Approach to the reconfiguration of the motion control system of an autonomous unmanned underwater vehicle], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2020, Vol. 28, No. 2 (109), pp. 131-146.
7. *Lyamina E.A.* Algoritmy upravleniya dvizheniem gruppy ANPA po poiskovym traektoriyam [Algorithms of motion control of the AUV group along the search trajectories]. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/637281.html> (accessed 15 May 2021).
8. *Zubov N.E., Mikrin E.A., Ryabchenko V.N., Proletarskiy A.V.* Analiticheskiy sintez zakonov upravleniya bokovym dvizheniem letatel'nogo apparata [Analytical synthesis of the laws of lateral motion control of the aircraft], *Izvestiya vuzov. Aviatcionnaya tekhnika* [News of higher educational institutions. Aviation equipment], 2015, No. 3, pp. 14-20.

9. Zubov N.E., Mikrin E.A., Ryabchenko V.N., Efanov D.E. Analiticheskiy sintez zakonov upravleniya prodol'nym dvizheniem letatel'nogo apparata [Analytical synthesis of the laws of control of the longitudinal motion of the aircraft], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. "Priborostroenie"* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2015, No. 2, pp. 3-14.
10. Zybin E.Yu., Kos'yanchuk V.V. Analiticheskiy sintez mnogosvyaznykh otkazoustoychivyykh sistem upravleniya s uproshtennoy skhemnoy realizatsiey [Analytical synthesis of multiply connected fault-tolerant control systems with a simplified circuit implementation], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAN. Theory and control systems], 2010, No. 1, pp. 108-117.
11. Shuping Hou, Jian Xu, Zheping Yan Implementation of Autonomous Reconfigured Control for AUV Based on Fault Detection and Isolation. DOI: 10.1109/ICMA.2007.4303543.
12. Zhykov V.F., Vasil'eva I.E. Primenenie raznostnykh skhem k resheniyu zadachi o pogone [Application of Difference Schemes to Solving the Pursuit Problem], *Tr. SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2019, 18 (6), pp. 1407-1433. Available at: <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.6.1407-1433>.
13. Petrosyan L.A., Mazalov V.V. Recent Advances in Game Theory and Applications. Springer International Publishing, 2016, 284 p.
14. Mazalov V., Chirkova J.V. Networking Games. Network Forming Games and Games on Networks. Academic Press, 2019, 322 p.
15. Petrosyan L.A. Differential Games of Pursuit. World Scientific, 1993. 332 p.
16. Isaacs R. Differential Games: A Mathematical Theory with Applications to Warfare and Pursuit, Control and Optimization. Courier Corporation, 1999, 416 p.
17. Kumkov S.S., Le Menec S., Patsko V.S. Zero-sum pursuit-evasion differential games with many objects: survey of publications, *Dynamic Games and Applications*, 2017, Vol. 7, No. 4, pp. 609-633.
18. Ramana M.V., Kothari M. Pursuit-evasion games of high speed evade, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, Vol. 85, No. 2, pp. 293-306.
19. Pan'kov S.Ya. Teoriya i metodika upravleniya aviatsiey. ucheb. posobie v 2 ch. [Theory and methods of aviation management]. study allowance in 2 hours], under the general ed. V.A. Meshcheryakova. Ul'yanovsk: TSUVAU GA, 2006, 190 p.
20. Dohi N., Baba Y., Takano H. Modified proportional navigation for a missile with varying velocity - comparison with the optimal guidance, *The proceeding of 24th international congress of the aeronautical sciences ICAS – 2004*. Yokohama, Japan, 2004, Vol. 7, pp. 207-215.
21. Palumbo Neil F., Blauwkamp Ross A., Lloyd Justin M. Modern homing missile guidance theory and techniques, *Johns Hopkins APL Technical digest, USA*, 2010, Vol. 29, No. 1, pp. 42-59.
22. Aranovich G.P., Mikhaylin D.A. Upravlenie i navedenie samoletov i raket [Control and guidance of aircraft and missiles]. Available at: <https://mai.ru/upload/iblock/efa/efab8f94fdae57f3174761563981a21b.pdf> (accessed 21 May 2021).
23. Solov'ev G.A., Chugunova V.A. Metod navedeniya letatel'nykh apparatov na nazemnye ob'ekty s ispol'zovaniem BRLS S SAR [Method of guidance of flying vehicles to ground objects using radar with ATS], *Tr. SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2013, Issue 4 (27), pp. 156-171.
24. Kulifeev Yu.B., Mironova M.M. Algoritmy avtomaticheskogo upravleniya bokovym dvizheniem udarnogo bespilotnogo letatel'nogo apparata samoletnogo tipa na vozdushnom uchastke poleta [Algorithms for automatic control of lateral movement of an unmanned aircraft-type strike unmanned aerial vehicle in the air segment of the flight], *Tr. MAI* [Proceedings of the MAI], 2015, Issue No. 84, pp. 1-14.

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

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.

Розенгауз Михаил Борисович – e-mail: rozengauz_mb@mail.ru; тел.: 89219411395; к.т.н.; с.н.с.

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

Rozengauz Mikhail Borisovich – e-mail: rozengauz_mb@mail.ru; phone: +79219411395; cand. of eng. sc.; senior researcher.