

УДК.681.51:62-519

В. М. Амбросовский, А. С. Корнев, С. П. Хабаров

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УПОРОВ В ЗАДАЧЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Описано решение задачи о распределении упоров с использованием методов линейного программирования с учетом возможности выхода решений системы уравнений за пределы области допустимых значений упоров и момента, которые могут быть физически созданы средствами активного управления, установленными на подвижном объекте.

Распределение упоров, средства активного управления, джойстиковая система

Удержание угловой ориентации и текущего местоположения подвижного объекта требует компенсации возмущений, действующих на этот объект, средствами активного управления. В настоящей статье рассматривается задача позиционирования объекта на плоскости. Для обеспечения удержания угловой ориентации и/или текущего местоположения подвижного объекта на плоскости обычно используют средства активного управления, создающие одновременно силы и моменты, действующие на подвижной объект. Например, для морских подвижных объектов это могут быть подруливающие устройства туннельного типа, винтовые движительно-рулевые колонки (поворотные подруливающие устройства) и гребные винты.

Для одновременного управления различными средствами активного управления часто используют джойстиковую систему управления (ДСУ) подвижным объектом, обеспечивающую управление различными средствами активного управления от трехкоординатной рукоятки управления (джойстика). Джойстик задает управляющие силы и моменты. ДСУ широко применяются, например, для ручного и автоматического режимов управления морскими подвижными объектами на малых ходах, где плохо работают обычные средства управления типа вертикальных рулей. Одной из задач, решаемых ДСУ, является распределение заданных сил и моментов по имеющимся средствам активного управления, что часто называется задачей распределения упоров.

Известные решения указанной задачи, приведенные, например, в работах [1], [2], в первую очередь ориентированы на системы динамического позиционирования, где сред-

ства активного управления обладают большим запасом по упору и ситуация выхода за границы области допустимых значений заданных упоров и момента встречается редко. На обычные подвижные объекты, оборудованные ДСУ, устанавливают средства активного управления, предназначенные для маневрирования (подруливающее устройство), обладающие небольшим запасом по создаваемому упору. Небольшие значения упоров определяют узкую область допустимых значений заданных упоров и момента, что накладывает существенные ограничения на работу ДСУ, так как значения заданных упоров и момента часто находятся на границе этой области или за ее пределами.

В настоящей статье рассматривается задача распределения упоров для ДСУ, оборудованной средствами активного управления, имеющими незначительные упоры.

Исходными данными для задачи распределения упоров являются заданные продольная и поперечная силы (X^* и Z^* соответственно) и заданный момент (M^*), которые формируются положением одного трехкоординатного джойстика или поворотной ручки и двухкоординатного джойстика. Выходными данными задачи распределения упоров («Блока распределения упоров» [3]) служат заданные упоры средств активного управления, которые должны быть получены с учетом имеющихся физических ограничений.

При рассмотрении сил и моментов, действующих на подвижной объект, будем использовать систему координат с началом в его центре масс. Продольная ось X направлена вдоль подвижного объекта по оси симметрии, ось Y направлена вертикально вверх, ось Z образует с ними правую координатную систему.

Рассмотрим две широко распространенные схемы установки средств активного управления: подвижной объект оборудован двумя движителями и одним неповоротным подруливающим устройством (рис. 1, а), одним движителем и двумя неповоротными подруливающими устройствами (рис. 1, б).

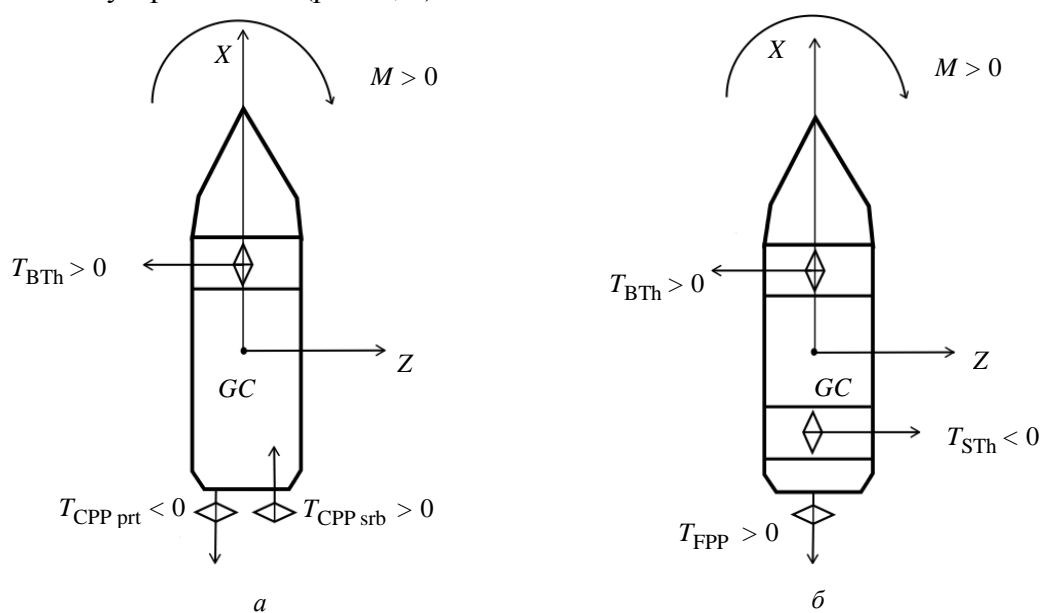


Рис. 1

Для каждой из этих схем необходимо определить упоры средств активного управления при условии, что заданы продольная и поперечная силы и момент (X^* , Z^* , M^*).

Указанные задачи сводятся к решению следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} T_1 + T_2 + T_3 = X^*, \\ T_4 + T_5 = Z^*, \\ L_{1,3}(T_1 - T_3) - L_4 T_4 + L_5 T_5 = M^*; \end{cases} \quad (1)$$

$$T_{i \min} \leq T_i \leq T_{i \max}, i = 1 \dots 5, \quad (2)$$

где T_1, T_2, T_3 – упоры, создаваемые двигателем левого борта, двигателем, находящимся в диаметральной плоскости, и двигателем правого борта соответственно; $T_{1 \max}, T_{2 \max}, T_{3 \max}$ – максимальные значения упора на передний ход, создаваемого соответствующим двигателем; $T_{1 \min}, T_{2 \min}, T_{3 \min}$ – максимальные значения упора на задний ход, создаваемого соответствующим двигателем; T_4, T_5 – упоры, создаваемые передним и задним подруливающими устройствами; $T_{4 \max}, T_{5 \max}$ – максимальные значения упора на левый борт, создаваемого соответствующим подруливающим устройством; $T_{4 \min}, T_{5 \min}$ – максимальные значения упора на правый борт, создаваемого соответствующим подруливающим устройством; $L_{1,3}, L_4, L_5$ – параметры, зависящие от положения подруливающего устройства и двигателей.

Для случая, когда подвижной объект оборудован подруливающим устройством и двумя двигателями, система уравнений (1) примет вид

$$\begin{cases} T_1 + T_3 = X^*, \\ T_4 = Z^*, \\ L_{1,3}(T_1 - T_3) - L_4 T_4 = M^*. \end{cases}$$

Рассматриваемая система уравнений (1) может иметь единственное решение, а может решений не иметь, если заданные значения сил и момента выходят за границы допустимых значений.

В случае существования единственного решения задача распределения упоров тривиальна. В случае нарушения ограничений неравенств необходимо найти другие заданные значения сил и момента (X_1^*, Z_1^*, M_1^*), которые будут минимально отличаться от первоначальных заданных ДСУ значений (X_0^*, Z_0^*, M_0^*). Таким образом, в случае нарушений условий (2) при решении системы (1) необходимо добавить условия минимизации следующего критерия:

$$J = \min \left(\lambda_X |X_0^* - X^*| + \lambda_Z |Z_0^* - Z^*| + \lambda_M |M_0^* - M^*| \right). \quad (3)$$

Минимизация критерия (3) позволяет найти новые значения заданных сил и момента наиболее приближенные в том или ином смысле к первоначальным заданным значениям. В задачу минимизации критерия (3) могут быть добавлены дополнительные требования, которые определяются режимом работы ДСУ и могут быть учтены в критерии (3) с помощью весовых множителей ($\lambda_X, \lambda_Z, \lambda_M$). Например, в режиме удержания курса большим приоритетом обладает момент, а в режиме удержания точки – упоры.

Систему распределения упоров (1) с ограничениями (2) можно решить, используя методы линейного программирования [4]. При этом задача распределения упоров сводится к задаче минимизации целевой функции:

$$f = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 e_{ij}, \quad e_{ij} \geq 0, \quad (4)$$

где $e_{i1} = T_{i \max} - T_{i+}$, $e_{i2} = -T_{i \min} + T_{i-}$, T_{i+} – упоры, создаваемые двигателями на передний ход и подруливающим устройством на левый борт; T_{i-} – упоры, создаваемые двигателями на задний ход и подруливающим устройством на правый борт.

Минимизация функции f (4) позволяет минимизировать суммарную невязку выхода значения создаваемых упоров за границу области допустимых значений, при этом по величине невязок e_{ij} можно судить, находимся ли мы в области допустимых значений или вышли из нее; также, используя значения этих же невязок, можно вернуть точку в область допустимых значений.

Решим задачу распределения с использованием симплекс-метода [4] для подвижного объекта, оборудованного двумя двигателями и носовым подруливающим устройством. При решении задачи симплекс-методом все переменные должны быть положительными, поэтому каждый упор, создаваемый подруливающим устройством, двигателями левого и правого бортов, необходимо представить состоящим из двух переменных (упора вперед и назад, упора влево и вправо). Представим систему уравнений и неравенств (1) и (2) в следующем виде:

$$\begin{cases} (x_1 - x_2) + (x_3 - x_4) = b_1, \\ (x_5 - x_6) = b_2, \\ k_1(x_1 - x_2) - k_1(x_3 - x_4) - k_2(x_5 - x_6) = b_3, \\ (x_1 - x_2) \leq b_{1 \max}, \\ (x_1 - x_2) \geq b_{1 \min}, \\ (x_3 - x_4) \leq b_{1 \max}, \\ (x_3 - x_4) \geq b_{1 \min}, \\ (x_5 - x_6) \leq b_{2 \max}, \\ (x_5 - x_6) \geq b_{2 \min}, \end{cases} \quad (5)$$

где x_1, x_3 – упор двигателя левого или правого борта на передний ход ($T_{CPP \text{ prt}}, T_{CPP \text{ stb}}$ на рис. 1); x_2, x_4 – упор двигателя левого и правого борта на задний ход ($T_{CPP \text{ prt}}, T_{CPP \text{ stb}}$ на рис. 1); x_5, x_6 – упор носового подруливающего устройства на левый или правый борт (T_{BTh} на рис. 1); b_1, b_2, b_3 соответствуют X^*, Z^*, M^* ; k_1, k_2 – параметры, зависящие от положения подруливающего устройства и двигателей; $b_{1 \max}, b_{1 \min}$ – максимальное значение упора, создаваемого двигателем на передний или задний ход; $b_{2 \max}, b_{2 \min}$ – максимальное значение упора, создаваемого носовым подруливающим устройством на левый или правый борт.

Для использования метода линейного программирования в решении задачи распределения упоров, введя дополнительные переменные $x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$ (назовем эти переменные невязками), приведем систему уравнений и неравенств (5) к следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} (x_1 - x_2) + (x_3 - x_4) = b_1, \\ (x_5 - x_6) = b_2, \\ k_1(x_1 - x_2) - k_1(x_3 - x_4) - k_2(x_5 - x_6) = b_3, \\ (x_1 + x_7) = b_{1 \max}, \\ (x_2 - x_8) = b_{1 \min}, \\ (x_3 + x_9) = b_{1 \max}, \\ (x_4 - x_{10}) = b_{1 \min}, \\ (x_5 + x_{11}) = b_{2 \max}, \\ (x_6 - x_{12}) = b_{2 \min}. \end{cases} \quad (6)$$

Зададим целевую функцию f , которую будем минимизировать при решении системы (6):

$$f = x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12}. \quad (7)$$

Таким образом, задача распределения упоров сводится к задаче минимизации функции f (7) с ограничением в виде равенств (6). Минимизация функции f позволяет минимизировать суммарную невязку выхода за границу области допустимых значений.

Система уравнений (6) определяет область допустимых значений заданных упоров и момента (ОДЗ), то есть те значения упоров и момента, которые могут быть физически созданы средствами активного управления, установленными на подвижной объект.

Область допустимых заданных упоров и момента для подвижного объекта, оборудованного двумя движителями и одним носовым подруливающим устройством, со следующими параметрами: $b_{1 \min} = -10$ т; $b_{1 \max} = 14$ т; $k_1 = 2$ м; $b_{2 \min} = -1$ т; $b_{2 \max} = 1$ т; $k_2 = 15$, представлена на рис. 2.

Вне ОДЗ выделим три следующие подобласти: подобласть с превышением по заданному моменту (рис. 2, точка В); подобласть с превышением по заданному упору подруливающего устройства (рис. 2, точка С); подобласть с превышением по заданному упору движителей (рис. 2, точка D).

Для решения задачи распределения упоров был предложен алгоритм, позволяющий учесть случаи, когда решения системы уравнений выходят за пределы области допустимых заданных упоров и момента. Алгоритм был построен с использованием последовательной проверки нахождения невязок в областях с превышениями по заданному упору подруливающего устройства, по заданному упору движителей и по заданному моменту, создаваемыми разностью упоров движителей. При возвращении в область, когда превышен заданный момент, возможны три варианта возврата точки: с сохранением разности упоров движителей, но с уменьшением общей продольной тяги; с сохранением общей продольной тяги, но с уменьшением разности упоров движителей; с одинаковым уменьшением продольной тяги и разности упоров движителей.

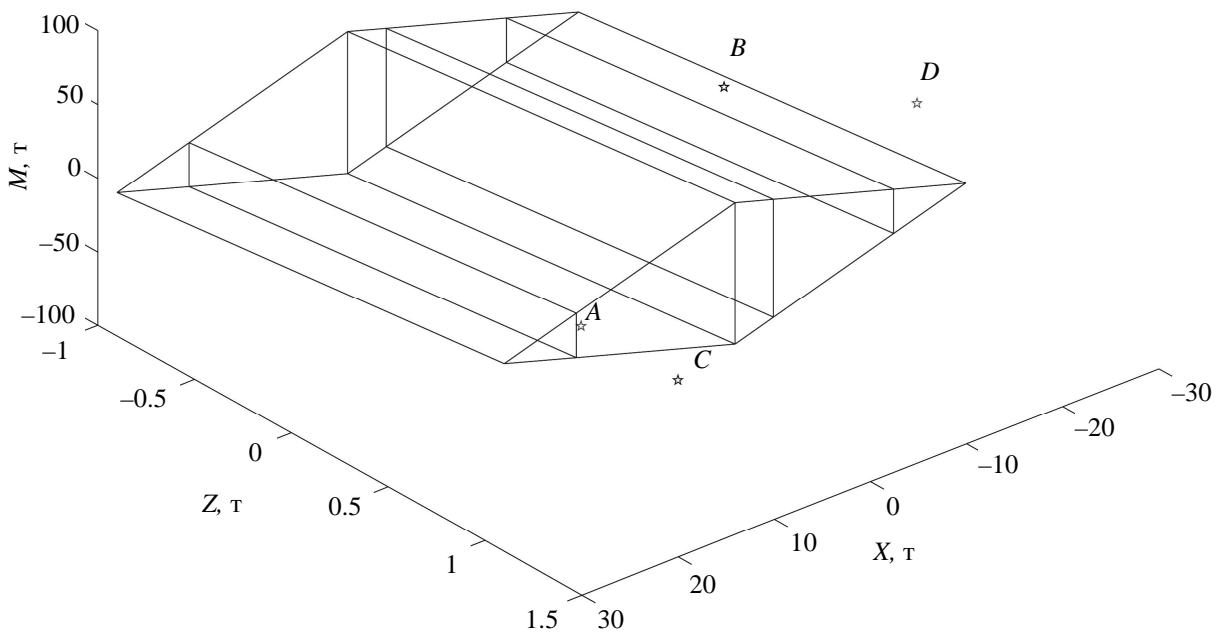


Рис. 2

Для иллюстрации работы алгоритма был рассмотрен случай, когда заданные продольная, поперечная силы и/или момент выходят за границы области допустимых значений. Работа предложенного алгоритма распределения упоров в этих случаях проиллюстрирована на рис. 3 и 4, где представлены положения подвижного объекта и диаграммы работы средств активного управления совместно с автоматическим режимом удержания курса при последовательном изменении положения джойстика. На рис. 4 обозначены: 1 – обороты подруливающего устройства (ПУ); 2 – угол разворота винта регулируемого шага правого борта (ВРШ ПрБ); 3 – угол разворота винта регулируемого шага левого борта (ВРШ ЛБ).

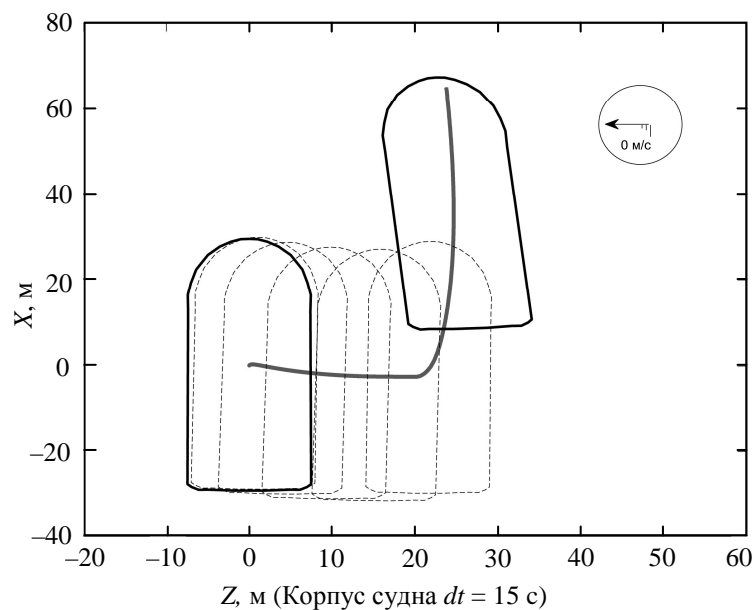


Рис. 3

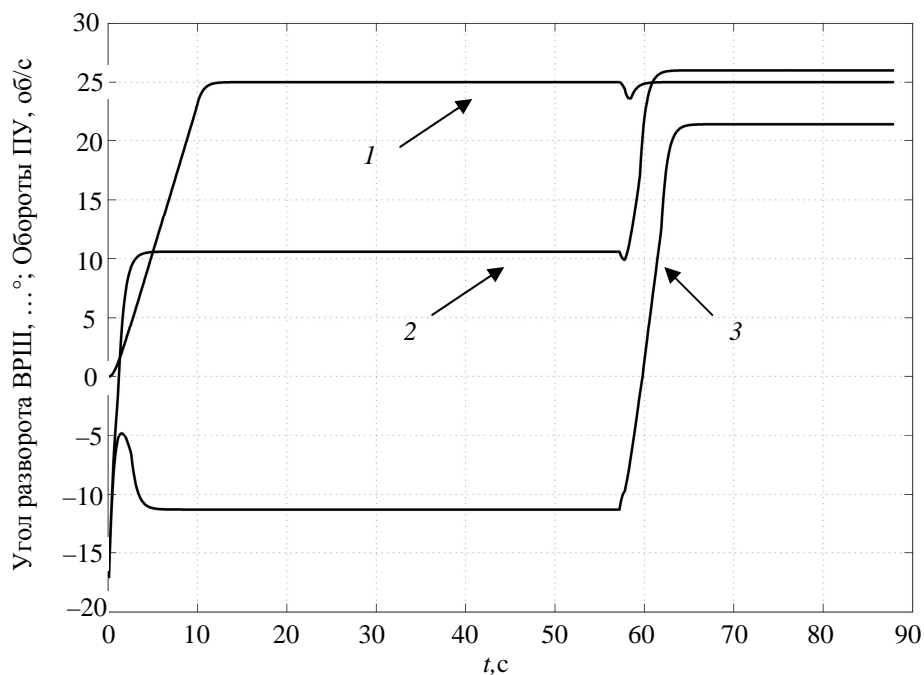


Рис. 4

Предложен способ решения задачи распределения упоров средств активного управления с использованием метода линейного программирования (симплекс-метод), который обеспечивает получение решений для случаев выхода заданных сил и момента за границы области допустимых значений. Работа предложенного алгоритма проиллюстрирована на примере управления движением морского подвижного объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Veksler A., Johansen Tor A., Skjetne R. Transient power control in dynamic positioning – governor feed-forward and dynamic thrust allocation. 9th IFAC Conf. MCMC 2012, Arenzato, Italy.
2. Optimal constrained control allocation in marine surface vessels with rudders / A. Johansen, P. T. Fuglseth, P. Tondel, I. Fossen // Control Engin. Practice. 2008. Vol. 16. P. 457–464.
3. Система координированного управления движением корабля / В. М. Амбросовский, Ю. В. Баглюк, А. Н. Коданев, А. С. Корнев // Морской вестн. 2011. № 2. С. 85–87.
4. Акулич И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах. М.: Высш. шк., 1986.

V. M. Ambrosovsky, A. S. Korenev, S. P. Habarov

CONTROL ALLOCATION IN TASK OF DYNAMIC POSITION OF VESSEL

The problem of the control allocation has been solved by using the methods of linear programming with the possibility of output solutions of the system outside of the thrust ability diagram.

Control allocation, thrusters, joystick system