

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ СУДОВ ПРИ ВНЕШНЕМ УПРАВЛЕНИИ ИХ ПРОЦЕССОМ РАСХОЖДЕНИЯ

Наличие навигационных опасностей или мешающих судов при опасном сближении судов в стесненных водах могут создать ситуации, при которых их расхождение маневром изменения курса невозможно, что обуславливает необходимость использования маневра расхождения изменением скорости.

Работа [1] посвящена вопросам предупреждения столкновений судов маневром изменения скорости при локально-независимом управлении, а процедура расчета оптимального маневра расхождения снижением скоростей судов при внешнем управлении рассмотрена в работе [2].

Цель данной статьи - разработка процедуры выбора оптимального маневра расхождения судов снижением скорости активным и пассивным торможением.

При внешнем управлении процессом расхождения судов [3] в ситуации, когда нет возможности выполнить маневр расхождения изменением курсов, приходится применять маневр снижения скоростей судов торможением. При этом необходимо выбрать режим торможения каждого из судов, после чего требуется определить тип оптимального маневра расхождения снижением скоростей судов. В общем случае различают два типа оптимальных маневров расхождения судов снижением скоростей в зависимости от параметра оптимизации маневра, хотя в обоих случаях критерием оптимальности является потеря ходового времени судов на маневр расхождения, которую необходимо минимизировать [4]. Маневр расхождения снижением скорости при заданных режимах торможения каждого из судов характеризуется следующими параметрами: общим моментом времени начала маневра торможения обоих судов t_n , безопасными скоростями уклонения первого V_{1y} и второго V_{2y} судов [4]. При первом типе оптимального маневра расхождения выбираются допустимые значения V_{1y} и V_{2y} , которые обеспечивают существование непустого множества безопасных маневров расхождения снижением скорости. Оптимизация производится по параметру t_n , величина которого определяется из условия равенства дистанции кратчайшего сближения D_{\min} с предельно-

допустимой дистанцией D_d в момент окончания переходного процесса, т.е. $D_{\min}(t_n) = D_d$.

Особенность второго типа оптимального маневра расхождения - фиксированное значение момента начала торможения судов, равное нулевому моменту времени $t_n = 0$, а оптимизация производится по параметрам V_{1y} и V_{2y} , которые минимально отличаются от начальных значений соответствующих скоростей V_1 , V_2 и обеспечивают равенство $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y}) = D_d$ к моменту окончания переходного процесса, который совпадает с моментом времени кратчайшего сближения.

В данной статье рассмотрим тип оптимального маневра расхождения, рассматривая ситуацию, когда первое судно снижает скорость активным торможением, а второе – пассивным торможением.

В этом случае, как показано в работе [5], элементы процесса активного торможения первого судна: интервал времени τ_1 снижения скорости до значения V_{1y} и пройденное судном расстояние S_1 за этот интервал времени определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{m_1}{\mu V_{yp1}} \left[\arctg \frac{V_1}{V_{yp1}} - \arctg \frac{V_{1y}}{V_{yp1}} \right]; \\ S_1 &= \frac{m_1}{2\mu} \ln \left| \frac{V_1^2 + V_{yp1}^2}{V_{1y}^2 + V_{yp1}^2} \right|, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_1 – масса первого судна; μ – коэффициент сопротивления; V_{yp1} – установившаяся скорость, которая пропорциональна упору винта P .

Элементами процесса пассивного торможения второго судна являются интервал времени τ_2 , за который скорость снижается до значения V_{2y} и пройденное судном за этот интервал времени расстояние S_2 , причем [5]:

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \frac{m_2}{\mu} \left(\frac{1}{V_{2y}} - \frac{1}{V_2} \right); \\ S_2 &= \frac{m_2}{2\mu} \ln \left| \frac{V_2^2}{V_{2y}^2} \right|, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_2 – масса второго судна.

В зависимости от соотношения величин τ_1 и τ_2 определяются расстояния L_1 и L_2 , которые проходят первое и второе суда до момента времени окончания переходного процесса, что необходимо для расчета значения дистанции кратчайшего сближения. Если справедливо неравенство $\tau_1 > \tau_2$, то:

$$L_1 = S_1;$$

$$L_2 = S_2 + V_{2y}(t_p - \tau_2).$$

По окончанию переходного процесса t_p координаты судов X_{1p} , Y_{1p} , X_{2p} и Y_{2p} определяются следующими выражениями:

$$X_{1p} = L_1 \sin K_1 = S_1 \sin K_1;$$

$$Y_{1p} = L_1 \cos K_1 = S_1 \cos K_1;$$

$$X_{2p} = L_2 \sin K_2 = [S_2 + V_{2y}(t_p - \tau_2)] \sin K_2;$$

$$Y_{2p} = L_2 \cos K_2 = [S_2 + V_{2y}(t_p - \tau_2)] \cos K_2.$$

В момент времени окончания переходного процесса t_p параметры движения обоих судов, как и относительный курс K_{opp} , становятся неизменными, а дистанция кратчайшего сближения судов

$$D_{\min} = \text{Abs}[D_p \sin(K_{opp} - \alpha_p)], \quad (3)$$

в которой значения пеленга α_p и дистанции D_p на момент времени t_p окончания переходного процесса изменения скоростей определяются выражениями:

$$D_p = \sqrt{(X_{1p} - X_{2p})^2 + (Y_{1p} - Y_{2p})^2};$$

$$\alpha_p = \arcsin \frac{X_{1p} - X_{2p}}{D_p}.$$

В случае же $\tau_1 < \tau_2$:

$$L_1 = S_1 + V_{1y}(t_p - \tau_1);$$

$$L_2 = S_2.$$

Координаты судов на момент окончания переходного процесса t_p определяются выражениями:

$$X_{1p} = L_1 \sin K_1 = [S_1 + V_{1y}(t_p - \tau_1)] \sin K_1;$$

$$Y_{1p} = L_1 \cos K_1 = [S_1 + V_{1y}(t_p - \tau_1)] \cos K_1;$$

$$X_{2p} = L_2 \sin K_2 = S_2 \sin K_2;$$

$$Y_{2p} = L_2 \cos K_2 = S_2 \cos K_2 .$$

Причем для расчета D_{\min} с помощью формулы (3) принимаются величины α_p и D_p :

$$D_p = \sqrt{(X_{2p} - X_{1p})^2 + (Y_{2p} - Y_{1p})^2} ;$$

$$\alpha_p = \arcsin \frac{X_{2p} - X_{1p}}{D_p} .$$

Таким образом, выбирая режимы торможения судов и задавая значениями их скоростей расхождения V_{1y} и V_{2y} , с помощью выражений (1) и (2) определяются элементы процесса торможения τ_1 , S_1 , τ_2 и S_2 . Исходя из соотношения величин τ_1 и τ_2 , по формуле (3) рассчитывается дистанция кратчайшего сближения D_{\min} , с помощью которой оценивается степень оптимальности выбранных скоростей расхождения V_{1y} и V_{2y} . Так как при начальных скоростях V_1 и V_2 судов сближение является опасным и $D_{\min} < D_d$, то для поиска оптимальных значений V_{1y}^* и V_{2y}^* надлежит равномерно уменьшать начальные скорости V_1 и V_2 обоих судов на величину ΔV , т.е. $V_{1yi} = V_1 - i\Delta V$ и $V_{2yi} = V_2 - i\Delta V$. При этом после каждого уменьшения скоростей для значений V_{1yi} и V_{2yi} рассчитывается возрастающее значение $D_{\min i}$, величина которого сравнивается с D_d . Процесс повторяется до тех пор, пока не достигается равенство $D_{\min}(V_{1y}^*, V_{2y}^*) = D_d$. При этом определяем оптимальные значения скоростей расхождения V_{1y}^* и V_{2y}^* .

Описанный алгоритм определения оптимальных значений скоростей расхождения методом последовательных приближений реализован компьютерной программой, позволяющей генерировать начальные ситуации опасного сближения судов и находить оптимальные значения скоростей расхождения.

Рассмотрим ситуацию опасного сближения судов, которая характеризуется начальными данными $\alpha = 229^\circ$, $D = 5$ миль, $V_1 = 18$ узлов, $V_2 = 19$ узлов, $K_1 = 267^\circ$, $K_2 = 24^\circ$, $D_d = 1$ миля, причем $D_{\min} = 0,48$ мили. Маневр расхождения предусматривает снижение скорости первого судна активным торможением, а второго - пассивным торможением.

На рис. 1 показана область недопустимых скоростей судов для за-

данной начальной ситуации, и точка с координатами ($V_1=18$, $V_2=19$) принадлежит недопустимой области. Снижая скорости судов, смещаем положение точки (V_{1yi} , V_{2yi}) относительно начального положения в сторону границы области, пока при значениях $V_{1y}^*=16$ и $V_{2y}^*=11,5$ дистанция D_{\min} не достигнет значения 1,01 мили, а точка (V_{1y}^* , V_{2y}^*) – границы недопустимой области скоростей. Корректность полученного результата подтверждена имитационным проигрыванием маневра расхождения.

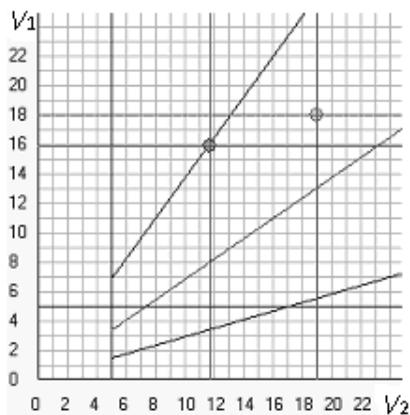


Рис. 1. Определение оптимальных скоростей расхождения V_{1y}^* и V_{2y}^*

Таким образом, при внешнем управлении процессом расхождения судов в стесненных условиях в ряде ситуаций целесообразно выбрать маневр расхождения одновременным снижением скоростей обоих судов активным или пассивным торможением. При этом получена процедура оптимизации параметров маневра расхождения снижением скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюпиков Е.Е. Зависимость момента начала маневра расхождения изменением скорости от инерционных характеристик судна / Тюпиков Е.Е., Цымбал Н.Н. // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА – 2007. – Вып. 14. – С. 130 – 135.
2. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближе-

ния / И.А Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия). – 2016. - 585 с.

3. Пятаков Э. Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э. Н., Бужбецкий Р. Ю., Бурмака И. А., Булгаков А. Ю. – Херсон: Гринь Д.С. - 2015. - 312 с.

4. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. - 2017 - Вып. 27. – С. 32 – 37.

5. Демин С.И. Торможение судна / Демин С.И.– М.: Транспорт, 1975.– 81с.