УДК 656.61.052.484

Бурмака И.А.
НУ «ОМА»

СПОСОБ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО МАНЕВРА РАСХОЖДЕНИЯ ПАРЫ СУДОВ ИЗМЕНЕНИЕМ СКОРОСТЕЙ

Обеспечения безопасного расхождения судов при плавании в стесненных водах является одной из наиболее актуальных проблем безопасности судовождения. Как указывается в работе [1], в стесненных районах интенсивного судоходства с помощью систем управления движения судов реализуется принцип внешнего управления опасно сближающимися судами, причем выбор стратегии расхождения осуществляется именно этими системами, а не судами. Хотя при расхождении предпочтительным является маневр изменения курсов судов, однако возникают ситуации, в которых для расхождения необходимо уменьшать скорости судов при их неизменных курсах. Принцип внешнего управления тремя судами для предупреждения столкновения рассмотрен в работе [2]. В настоящей статье анализируется возможность предупреждения столкновения судов маневром снижения скоростей.

Цель публикации - разработка способа аналитического расчета оптимального маневра расхождения судов снижением скоростей.

В работе [3] получено условие существования множества маневров расхождения судов изменением их скоростей, согласно которому необходимо, чтобы разность курсов судов отличалась от значений 0 ° и 180 °. Также требуется, чтобы разность начальных и текущих скоростей судов отличалась от нуля. Если указанные требования выполняются, то для момента времени начала маневра $t_n = 0$ рассчитывается дистанция кратчайшего сближения $D_{\min}$. При $D_{\min} \geq D_d$ множество маневров расхождения судов существует.

Для расчета маневра расхождения изменением скорости исходными являются начальные скорости движения судов V_1, V_2, и выбранные безопасные скорости V_{1y}, V_{2y}. Маневры расхождения отличаются значением момента времени начала маневра расхождения t_n, причем при неравенстве $D_{\min} \geq D_d$ значение t_n изменяется от 0 до значения t_n^*, при котором $D_{\min} = D_d$, т.е. $t_n \in [0, t_n^*]$.

Обозначим через c_{mx} судно, переходной период которого больше и равный длительности общего переходного процесса t_p. Судно с меньшим переходным периодом обозначим c_{mn}. Если время начала маневра расхождения t_n превосходит начальный момент времени t_0, то суда в течение переходного процесса t_p проходят следующие дистанции:

$$L_{mx} = V_{mx} t_n + S_{mx};$$

$$L_{mn} = V_{mn} t_n + S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn}),$$

где S_{mx} и S_{mn} - расстояния, которые проходят соответственно суда c_{mx} и c_{mn} за время переходного процесса τ_{mx} и τ_{mn} изменения скоростей.

К моменту времени окончания общего переходного процесса t_p координаты судов определяются следующими выражениями:

$$X_{mxp} = L_{mx} \sin K_{mx} = (V_{mx} t_n + S_{mx}) \sin K_{mx};$$

$$Y_{mxp} = L_{mx} \cos K_{mx} = (V_{mx} t_n + S_{mx}) \cos K_{mx};$$

$$X_{mnp} = L_{mn} \sin K_{mn} = [V_{mn} t_n + S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \sin K_{mn}; \qquad (1)$$

$$Y_{mnp} = L_{mn} \cos K_{mn} = [V_{mn} t_n + S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \cos K_{mn}.$$

Значения пеленга α_p и дистанции D_p на момент времени t_p окончания переходного процесса изменения скоростей:

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

$$\alpha_p = \arcsin \frac{X_{mxp} - X_{mnp}}{D_p},$$

причем четверть, в которой находится пеленг α_p, определяется знаками выражений $(X_{mxp} - X_{mnp})$ и $(Y_{mxp} - Y_{mnp})$.

В момент времени t_p параметры движения обоих судов становятся неизменными, как и относительный курс K_{otp}. Поэтому дистанция кратчайшего сближения судов

$$D_{\min} = \Delta_p D_p \sin(K_{otp} - \alpha_p), \qquad (2)$$

где $\Delta_p = \mathrm{sign}[\sin(K_{otp} - \alpha_p)]$.

По смыслу решаемой задачи оптимальным маневром расхождения является такой маневр, при выполнении которого достигают минимума потери ходового времени судов Δt_{mv}, вызванного маневром. Если суда чисто расходятся, то $\Delta t_{mv} = 0$. Если же необходимо торможение судов для расхождения, то потери Δt_{mv} равны интервалу времени от начала времени торможения t_n до момента времени восстановления начальных скоростей судов после кратчайшего сближения, т.е.:

$$\Delta t_{mv} = \tau_{mx} + \Delta\tau_p + \tau_{mv},$$

где $\Delta\tau_p$ – интервал времени между окончанием переходного процесса по снижению скоростей судов и моментом времени кратчайшего сближения $t_{\min}$, как показано на рис. 1; τ_{mv} – интервал времени, необходимый для увеличения скоростей судов до начальных значений V_1 и V_2.

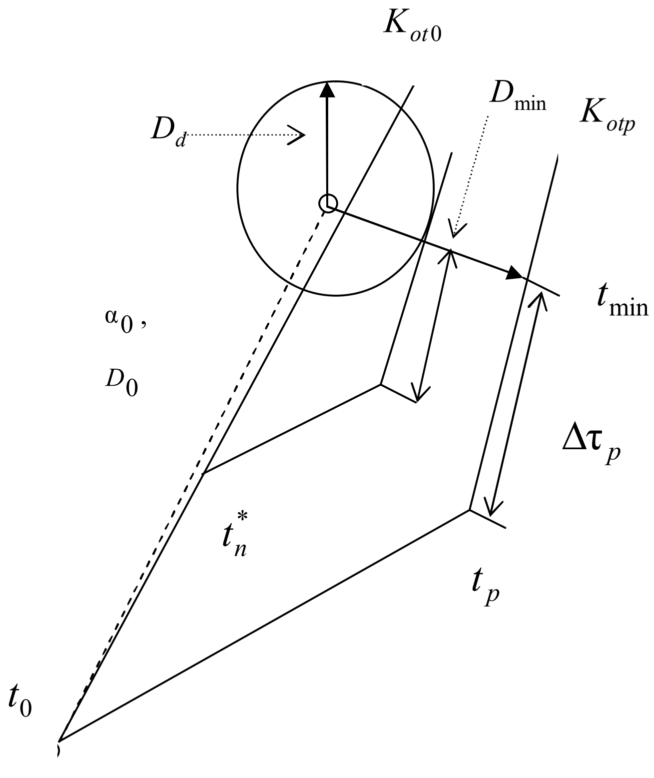

Рис. 1. Выбор оптимального маневра расхождения

Так как все безопасные маневры расхождения отличаются только величиной времени начала маневра t_n, а интервалы времени τ_{mx} и τ_{mv} всех маневров одинаковы, то оптимальным будет маневр с минимальным значением $\Delta\tau_p$. Из рис. 1 следует, что величина $\Delta\tau_p$ сокращается с уменьшением дистанции кратчайшего сближения, и оптимальным маневром является маневр, при котором $D_{\min} = D_d$ и $t_n = t_n^*$.

Для аналитического расчета момента времени начала маневра t_n^* вначале найдем зависимость $D_{\min}$ от t_n. Для этого воспользуемся выражением (2):

$$D_{\min} = \Delta_p D_p \sin(K_{otp} - \alpha_p) = \Delta_p D_p (\sin K_{otp} \cos\alpha_p - \cos K_{otp} \sin\alpha_p) .$$

Учитывая, что

$$\sin\alpha_p = \frac{X_{mxp} - X_{mnp}}{D_p} \text{ и } \cos\alpha_p = \frac{Y_{mxp} - Y_{mnp}}{D_p},$$

$$\sin K_{otp}(Y_{mxp} - Y_{mnp}) - \cos K_{otp}(X_{mxp} - X_{mnp}) = \Delta_p D_{\min} .$$

Подставляем в последнее равенство ранее полученные выражения (1) для координат судов X_{mxp}, Y_{mxp}, X_{mnp}, Y_{mnp} и после преобразований получим:

$$t_n[V_{mx} \sin(K_{otp}\text{-}K_{mx}) - V_{mn} \sin(K_{otp}\text{-}K_{mn})] =$$

$$\Delta_p D_{\min} + S_{mx} \sin(K_{mx} - K_{otp}) + [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})]\sin(K_{mn} - K_{otp}) .$$

Из последнего выражения находим зависимость t_n от $D_{\min}$:

$$t_n = \frac{\Delta_p D_{\min} - S_{mx} \sin(K_{otp}\text{-}K_{mx}) - [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})]\sin(K_{otp}\text{-}K_{mn})}{V_{mx} \sin(K_{otp}\text{-}K_{mx}) - V_{mn} \sin(K_{otp}\text{-}K_{mn})} .$$

Очевидно, для оптимального маневра момент времени t_n^* справедливо выражение:

$$t_n^* = \frac{\Delta_p D_d - S_{mx} \sin(K_{otp}\text{-}K_{mx}) - [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})]\sin(K_{otp}\text{-}K_{mn})}{V_{mx} \sin(K_{otp}\text{-}K_{mx}) - V_{mn} \sin(K_{otp}\text{-}K_{mn})} .$$

Расчет значения t_n^* целесообразно выполнять по следующему алгоритму. Исходным является выражение

$$D_{\min} = \mathrm{Abs}[D_p \sin(K_{otp} - \alpha_p)] . \qquad (3)$$

Так как по завершению переходного периода при $t_n = 0$ справедливо неравенство $D_{\min} > D_d$ и относительный курс K_{otp} является постоянным, то с ростом t_n значение $D_{\min}$ уменьшается, а также изменяются величины пеленга α_p и дистанции D_p. Поэтому для каждого значения $t_n > 0$ следует рассчитать величины α_p и D_p, по которым с помощью формулы (3) определяется величина $D_{\min}$. Полученное значение $D_{\min}$ сравнивается с величиной предельно-допустимой дистанции D_d. Процесс расчета циклически продолжается до тех пор, пока не достигается равенство $D_{\min} = D_d$, при этом $t_n = t_n^*$.

В качестве примера рассмотрим ситуацию опасного сближения судов со следующими параметрами: α =45 °, D =3 мили, V_1=18 узлов, V_2 =21 узел, K_1 =90°, K_2 =180°, D_d =1 миля. В данной ситуации кратчайшее сближение достигается при $D_{\min}$ =0,23 мили. Маневр расхождения предусматривает снижение скорости обоих судов торможением. С помощью области опасных скоростей судов [1] определены безопасные скорости расхождения V_{1y} =6,9 узла и V_{2y} =20 узлов, причем первое судно снижает скорость активным торможением, а второе - пассивным. С помощью выше рассмотренного алгоритма определено, что при начале маневра в нулевой момент времени $t_n = 0$ дистанция кратчайшего сближения будет равна $D_{\min}$ =1,18 мили. При этом элементы торможения судов принимают значения τ_1 =80 с, τ_2 =13 с, S_1 =0,248 мили, S_2 =0,07 мили. Оптимальное значение момента времени начала торможения судов t_n^* =68 с, минимальное значение дистанции кратчайшего сближения $D_{\min}$ =0,99 мили достигается в момент времени $t_{\min}$ =148 с.

Таким образом, предлагаемый способ расчета оптимальных параметров маневра расхождения судов снижением скоростей позволяет определить момент времени начала торможения с заданными значениями скоростей расхождения, при которых минимизируются потери ходового времени судов на выполнение маневра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.

2. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2014. – Вып. 20. - Одесса: ОНМА. - С. 18 - 23.

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