

УДК 519.8 : [656.61.052.4 : 656.61.052.7]

Моделирование процесса управляемого движения судна вдоль линии положения

С.В. Пашенцев, Ю.И. Юдин

Морская академия МГТУ, кафедра судовождения

Аннотация. Предложен способ управления движением судна, выполняющего швартовную операцию к борту другого судна. Способ основан на определении текущих значений отклонений носовой и кормовой точек судна от заданной траектории и на последующем формировании сигнала управления, пропорционального комбинации этих отклонений. Представлена оценка эффективности такого управления. Выполнено программное моделирование управляемого движения в соответствии с предложенным законом управления.

Abstract. The method of controlling movement of vessel performing mooring operation to another vessel has been proposed. It is based on determining the current values of deviations of the bow and stern points of the vessel from the desired path and on the subsequent formation of the control signal that is proportional to the deviation. The assessment of effectiveness of such management has been given. Software simulation of guided movement in accordance with the proposed method has been carried out.

Ключевые слова: линия положения, модель судна, способ управления, сигнал управления, управляющий комплекс
Key words: line of position, ship's model, control method, control signal, control complex

1. Введение

Автоматически управляемое движение судна – одно из важнейших направлений современной интеллектуализации транспортных систем. Настоящая работа ставит своей целью с помощью компьютерного моделирования показать реализуемость и эффективность предложенного способа управления буксируемым судном.

Прежде чем начать моделирование управляемого движения, следует оговорить его общие принципы. В их основу положен патентный продукт (Юдин, Пашенцев, 2008) авторов статьи, в котором введено понятие линии пути (ЛП). Эта линия находится тем или иным способом и зависит от поставленной задачи управления. Значения координат точек A и B судна позволяют непрерывно вычислять поперечные смещения d_A и d_B от текущего положения ЛП. При этом, для определенности, поперечное смещение рассматриваемой точки от ЛП считается положительным, если точка смещается вправо от ЛП, и отрицательным, если она смещается влево. Основные варианты возможного расположения судна относительно ЛП показаны на рис. 1а, б; 2а, б.

С помощью возникающих поперечных смещений вырабатывается сигнал на отклонение рулевого органа, например руля судна, по закону:

$$\alpha_r = -k_A \times d_A + k_B \times d_B, \quad (1)$$

где k_A, k_B – коэффициенты усиления по поперечным смещениям носовой и кормовой точек судна от ЛП. Это положительные величины, причём k_A больше k_B . Традиционно угол перекадки руля α_r считается положительным при его перемещении в сторону правого борта.

На рис. 1а диаметральной плоскость (ДП) судна (4) пересекает ЛП (2) под некоторым углом, величина которого характеризуется значениями поперечных смещений точки $A(d_A)$ и точки $B(d_B)$, при этом $d_A > 0, d_B < 0$. Тогда, согласно закону управления (1), угол отклонения руля будет иметь отрицательное значение, т.е. руль будет переложён на левый борт, и судно начнёт вращение влево, что приведёт к изменению d_A и d_B и в конечном итоге – к выходу судна на ЛП и пересечению её по инерции. Во втором случае (рис. 1б), согласно закону (1), угол отклонения руля будет иметь положительное значение, т.е. руль будет переложён на правый борт, и судно начнёт вращение вправо, что приведёт к изменению d_A, d_B и к выходу судна на ЛП. Два первых рисунка (рис. 1а, б) представляют случаи, когда судно находится на ЛП и пересекает её.

Два следующих рисунка (рис. 2а, б) описывают случаи, когда судно находится целиком за ЛП и удаляется от неё. Ещё на двух рисунках (рис. 2в, г) судно находится целиком за ЛП и приближается к ней.

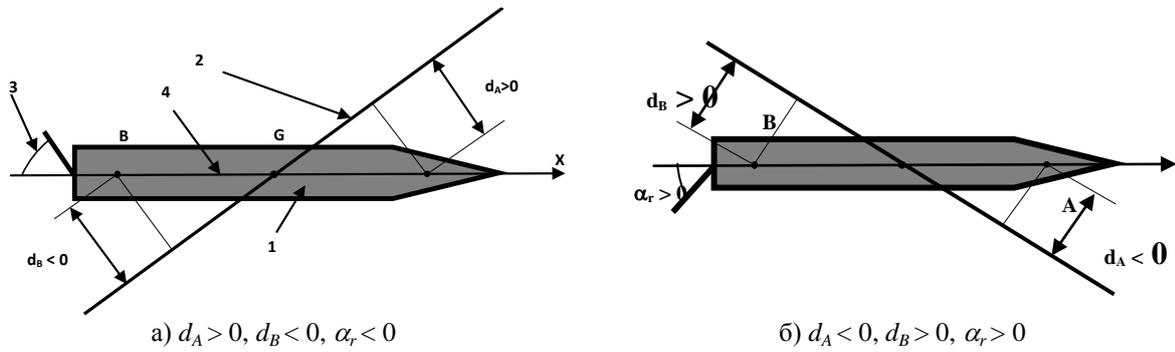


Рис. 1. Судно пересекает ЛП

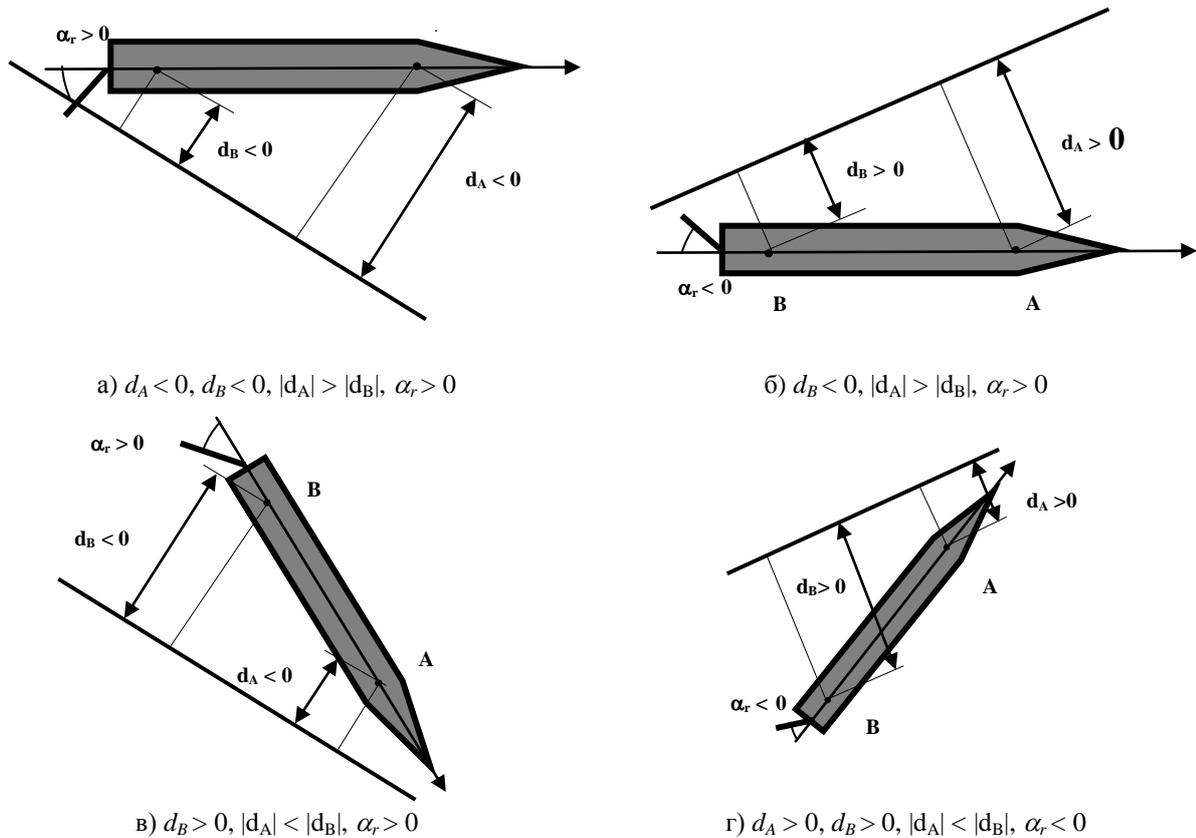


Рис. 2. Судно по одну сторону от ЛП

Следует иметь в виду, что возможны случаи, когда судно расположено параллельно ЛП и находится слева или справа от ЛП. В этом случае расстояния d_A и d_B равны друг другу и по величине, и по знаку. Заметим, что анализ знака комплекса $(k_A \times d_A + k_B \times d_B)$ во многих случаях требует знания величин коэффициентов усиления k_A и k_B . Эти коэффициенты должны зависеть от положения точек A и B на ДП судна и от степени симметрии носовой и кормовой частей судна по отношению к миделю. В идеале при равных расстояниях x_A и x_B вдоль ДП от центра тяжести (ЦТ) G и симметрии корпуса эти коэффициенты должны быть равны. В данном случае при параллельном положении ДП судна относительно ЛП руль должен быть поставлен в ДП, и поворот судна будет происходить по инерции. Поэтому даже в грубых прикидочных рассуждениях коэффициент k_A должен быть несколько больше коэффициента k_B , например, $k_A = 1.1$, а $k_B = 0.9$ при равных расстояниях x_A и x_B . Скорее всего, отношение этих коэффициентов обратно пропорционально отношению расстояний выбранных точек A и B от центра вращения с координатой x_0 (Соболев, 1976). Более точное определение этих коэффициентов требует решения некоторой оптимизационной задачи, связанной с оценкой качества управления.

2. Формирование управляющего сигнала

Управление (1) – не единственно возможное. Оно предполагает, что руль переключается в новое положение мгновенно, чего не происходит в реальности. Поэтому другим похожим законом управления будет закон, который определяет скорость перекладки руля:

$$v_{\alpha} = -k_A \times d_A + k_B \times d_B. \quad (2)$$

При этом будет действовать естественное ограничение на величину самой перекладки руля, которая не должна превосходить максимальной, заданной для конкретного рулевого устройства судна.

Более тонкий способ управления состоит в выработке некоторого управляющего сигнала $sign$, величина которого определяет скорость перекладки руля (или его положение). Например:

$$sign = -k_A \times d_A + k_B \times d_B, \quad (3)$$

скорость перекладки руля от самого сигнала выражается графически, рис. 3.

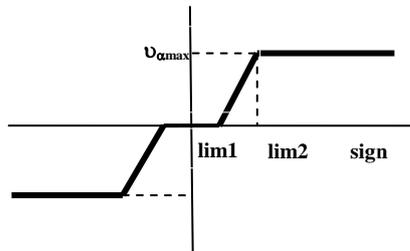


Рис. 3. Зависимость скорости перекладки руля от сигнала управления $sign$

Этот закон управления достаточно универсален и содержит зону нечувствительности ($sign < lim 1$), зону насыщения ($sign > lim 2$) и переходную между ними зону ($lim 1 < sign < lim 2$) линейного изменения скорости перекладки. Закон предполагает асимметричное отображение для отрицательных значений сигнала ($sign < 0$). В этих зонах скорость перекладки меняется следующим образом (для $sign > 0$):

$$\begin{aligned} v_{\alpha} &= 0 & sign & \leq lim 1, \\ v_{\alpha} &= v_{\alpha \max} \times (sign - lim 1) / (lim 2 - lim 1) & lim 1 < sign < lim 2, \\ v_{\alpha} &= v_{\alpha \max} & sign & \geq lim 2. \end{aligned} \quad (4)$$

Инерцию самого судна, а не только рулевого привода, можно учесть неявно, подбором границ зон. Однако эффективнее сделать этот учёт явным и добавить в закон формирования управляющего сигнала член, который зависит от текущего положения пера руля α_r :

$$sign = -k_A \times d_A + k_B \times d_B + k_{\alpha} \times \alpha_r. \quad (5)$$

Эти законы управления придётся моделировать отдельно, оценивая каждый раз их эффективность.

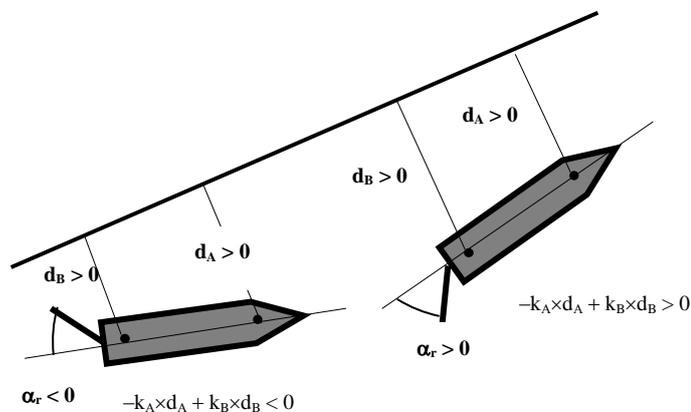


Рис. 4. Момент переключения положения пера руля

На рис. 4 показан момент изменения положения пера руля. Это момент, когда в законе, например (2), комплекс $-k_A \times d_A + k_B \times d_B$, управляющий рулём, меняет свой знак. В данном случае он меняет знак с отрицательного на положительный. Следовательно, руль из положения "на левый борт" будет изменять

его в положение "на правый борт". Обратим внимание, что при таком законе управления судно начнёт переключение руля ещё до пересечения ЛП, только начав двигаться в её сторону. Более тонко этот момент можно отрегулировать выбором коэффициентов усиления k_A и k_B . Аналогичное изменение положения пера руля с правого борта на левый произойдет по другую сторону от ЛП. Мысленно можно отразить рисунок зеркально в ЛП.

При использовании этих законов базовыми величинами являются расстояния от определённых точек, например швартуемого судна, до задаваемой или вычисляемой ЛП. Важнейшей среди них является прямая, которая параллельна линии перемещения швартуемого судна на заданном расстоянии от него. Пусть это судно как цель перемещается с координатами (x_z, y_z) и имеет курс K_z . Уравнение прямой, которая параллельна его курсу и расположена в d_{d0} метрах от него, удобнее всего записать в нормированном виде. Такое уравнение выглядит наиболее просто и позволяет легко находить расстояния до этой прямой от любых точек:

$$-(x - x_z) \times \cos(K_z) + (y - y_z) \times \sin(K_z) + d_{d0} = 0. \quad (6)$$

Знак d_{d0} позволяет смещать параллельную прямую в ту или другую сторону.

Возьмем на ДП швартуемого судна две точки, которые расположены на равных расстояниях от центра тяжести и запишем их координаты:

$$\begin{aligned} x_n &= x_s + l \times \sin(K_s); y_n = y_s + l \times \cos(K_s); \\ x_k &= x_s - l \times \sin(K_s); y_k = y_s - l \times \cos(K_s). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь индексами n, k обозначены признаки точек в носу и в корме швартуемого судна; индексом s – признаки центра тяжести (ЦТ) швартуемого судна. Тогда расстояния этих точек до ЛП (6) находятся простой подстановкой их координат (7) в это уравнение. Получаем следующие выражения:

$$\begin{aligned} d_n &= -(x_n - x_z) \times \cos(K_z) + (y_n - y_z) \times \sin(K_z) + d_{d0}; \\ d_k &= -(x_k - x_z) \times \cos(K_z) + (y_k - y_z) \times \sin(K_z) + d_{d0}. \end{aligned} \quad (8)$$

Можно расшифровать выражения (7) и преобразовать получившиеся формулы, что даёт следующее:

$$\begin{aligned} d_n &= -(x_s - x_z) \times \cos(K_z) + (y_s - y_z) \times \sin(K_z) + d_{d0} + l \times \sin(K_z - K_s); \\ d_k &= -(x_s - x_z) \times \cos(K_z) + (y_s - y_z) \times \sin(K_z) + d_{d0} - l \times \sin(K_z - K_s). \end{aligned} \quad (9)$$

Возьмём теперь комбинацию расстояний $-d_n + d_k$, т.е. фактически возьмём равные коэффициенты усиления в законе (1). После несложных преобразований получаем результат в виде: $-d_n + d_k = 2l \times \sin(K_s - K_z)$. Это означает, что при равных коэффициентах усиления в законе управления (1) он превращается в хорошо известный закон управления по отклонению курса швартуемого судна от курса швартуемого судна. Это ещё раз подтверждает вывод о том, что коэффициенты усиления следует выбирать различные по величине.

3. Оценка качества управления судном

В научной литературе (Антомонов, 1964; Фельдбаум, 1953; Карасев и др., 1967) описано множество подходов к такой оценке. При моделировании подходов швартуемого судна к швартуемому судну нами были выбраны два критерия оптимальности. В качестве первого критерия возьмем потерю скорости хода при изменении курса, которую можно выразить интегралом:

$$Q_1 = \int_0^T [v \times \sin(K - \beta - K_0)] dt. \quad (10)$$

Естественно, что при численном моделировании интеграл переходит в суммирование, которое производится по всем точкам траектории подхода к месту швартовки:

$$Q_1 = \sum [v_k \times \sin(K_k - \beta_k - K_0)] dt. \quad (11)$$

В выражениях для критерия Q (10, 11) фигурируют K – курс швартуемого судна; K_0 – его уставное значение для управления; v, β – скорость и угол дрейфа. При этом K_0 может быть и переменным, если ЛП в процессе подхода к месту швартовки меняет свое положение. По самому смыслу введенного критерия он должен быть тем меньше, чем качественнее управление судном. Такой критерий позволяет сравнивать различные варианты управления, изменяя в них, например, пределы (4) управляющего сигнала для переключения рулевого привода, или коэффициенты усиления (3) при отклонениях для формирования управляющего сигнала. Однако при этом траектории подхода будут различными, и более длинная траектория накопит большую сумму вида (11). Поэтому логично отнести качество к одной точке траектории, поделив сумму на число слагаемых. Кроме того, сумму следует нормировать, поделив её на начальную скорость судна v_0 .

Возможен другой критерий, который представляется нам удобным. Он имеет форму, в которую входит отклонение курса швартуемого судна от некоторого среднего значения (зарыскивание) и отклонение руля от нулевого положения в ДП. Этот критерий может быть таким:

$$Q_2 = \sqrt{\sum_k [(K_k - K_0)^2 + \rho \times \alpha_r^2]} \quad (12)$$

Здесь критерий представлен сразу в виде суммы, минуя форму интегральную. Эту сумму логично нормировать, относя первое слагаемое к квадрату начального курса K_0 , а второе – к квадрату модуля предельного положения руля. Поскольку слагаемые носят квадратичный характер, из результирующей суммы извлекается квадратный корень. Как и выше, отнесем результат к одной точке, поделив его на число слагаемых. В этом критерии используются сразу две характеристики – зарыскивание и перекладки руля, т.е. критерий носит комплексный характер. Поэтому в выражение (12) входит весовой множитель ρ , позволяющий уравновесить эти два показателя. Исходя из требований к зарыскиванию ($\approx 8^\circ$) и зная порядок предельной кладки руля (в общем случае $\approx 35^\circ$), можно взять этот множитель как $(8/35)^2 \approx 0.05$. Именно таким в нашем случае он и выбран при подсчётах качества управления. После введения критериев Q_1 и Q_2 можно производить собственно моделирование различных вариантов подхода к швартуемому судну, используя разные управления.

4. Моделирование движения вдоль ЛП

Из общих принципов подхода к месту швартовки известно, что на данном этапе сближения мы используем управление по отклонениям от ЛП. Такая линия, в данном случае, строится как прямая, смещенная от точки нахождения швартуемого судна в данный момент и имеющая направление курса швартуемого судна (направление её ДП). Все соответствующие формулы приведены выше – это формулы (6-9). С их помощью мы получаем отклонения носовой и кормовой точек ДП швартуемого судна от ЛП, а затем используем их для формирования управляющего сигнала системы управления $sign = -a_1 \times d_n + a_2 \times d_k$. Имея все эти формулы, мы можем легко производить моделирование данного этапа подхода к месту швартовки.

На рис. 5 изображены три траектории движения танкера "Саратов", который управляется с помощью комбинации отклонений носовой и кормовой точек от ЛП. Базовой траекторией является траектория № 1 с начальным курсом 60° . ЛП изображена желтым цветом; видно, что она смещена от облака точек цели. Две другие траектории отличаются начальным курсом судна (170° и 330°), но судно всё равно выводится на ту же линию прицеливания, что свидетельствует об устойчивости этого способа управления.

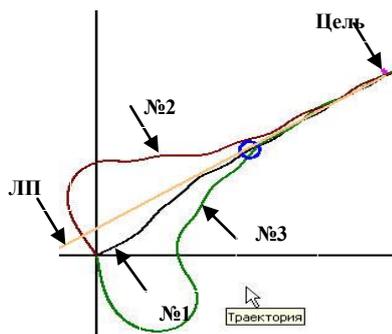


Рис. 5. Траектории танкера "Саратов" при управлении с формированием управляющего сигнала по двум отклонениям от линии прицеливания (ЛП)

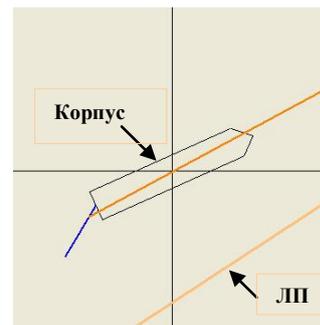


Рис. 6. Положение корпуса судна и ЛП при движении по траектории

За положением корпуса судна относительно ЛП можно наблюдать в программе в отдельном поле, которое показано на рис. 6. Там же показаны направление движения судна и положение пера руля. Это позволяет проследить за поведением судна вдоль траектории подхода на конечном этапе швартовки. На рис. 7 приводятся значения курса швартуемого судна K , угла перекладки руля $delR$ и управляющего сигнала $sign$, а на рис. 8 – значения отклонений носовой O_1 и кормовой O_2 точек шва судна от ЛП и управляющего сигнала $sign$ вдоль траектории перемещения швартуемого судна в процессе управления им. Траектории напоминают движение при управлении судном с помощью отклонения курса от направления на цель. Однако это иное управление, и его можно применять на любых расстояниях до цели, вплоть до непосредственного контакта.

Как и в случае ориентирования на переменную точку, при управлении относительно ЛП можно варьировать параметры формирования управляющего сигнала a_1 , a_2 , $\lim 1$, $\lim 2$. Получая при этом разные траектории движения судна, мы можем сравнивать их с помощью введенных ранее показателей качества Q_1 или Q_2 . Траектории незначительно отличаются друг от друга, на черно-белых рисунках выглядят почти неразличимо и поэтому не приводятся. Численные результаты варьирования в пяти вариантах даются в табл. 1 для танкера "Саратов". Естественно, им соответствуют пять траекторий.

Таблица 1

	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
a_1	20	20	20	24	16
a_2	2	2	2	1	4
$\lim 1$	3	5	1	1	1
$\lim 2$	12	20	8	8	8
Q_1	0.081	0.089	0.078	0.079	0.077

Табличные результаты (табл. 1) варьирования параметров управления показывают большую устойчивость управления по отклонениям в сравнении с управлением по отклонению курса. Такой вывод гарантирует перспективы применения этого способа управления при решении ряда задач сложного маневрирования.

Аналогичные детали моделирования приведём для другого судна – траулера "Б. Зайцев". Ранее были приведены результаты модельных испытаний при управлении этим судном с помощью отклонения курса от ЛП (рис. 9, 10). Отмечена высокая поворотливость такого судна. На рис. 9 даны две траектории траулера при управлении им с помощью отклонений носовой и кормовой точек от ЛП.

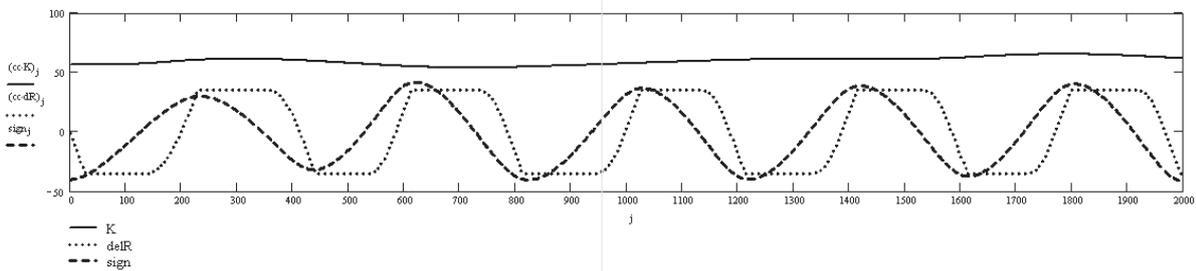


Рис. 7. Изменение во времени: курса швартуемого судна K , угла перекадки руля $delR$ и управляющего сигнала $sign$

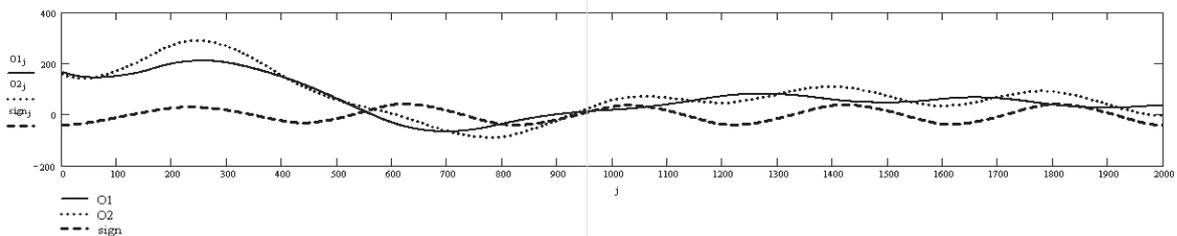


Рис. 8. Изменение во времени: отклонение носовой O_1 и кормовой O_2 точек судна от ЛП и управляющего сигнала $sign$

Хорошо видно, что поворотливое судно ведёт себя отличающимся от других судов образом, особенно в первые моменты маневрирования под управлением системы. Затем, при выходе на ЛП, поведение его становится похожим на поведение танкера "Саратов". Но качество этого поведения несколько иное. Например, для базовой траектории $Q_1 = 0.378$ и $Q_2 = 0.045$. Это примерно в четыре раза большие показатели, чем базовые для танкера "Саратов". Вариации параметров при формировании управляющего сигнала по отклонениям дали результаты, которые приведены в табл. 2.

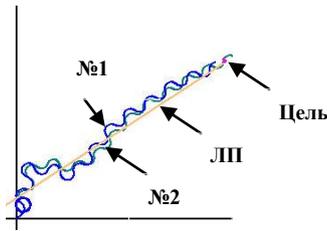


Рис. 9. Траектории траулера "Б. Зайцев" при управлении с формированием управляющего сигнала по двум отклонениям от ЛП

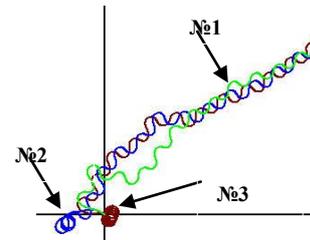


Рис. 10. Траектории траулера "Б. Зайцев" при вариации начальных параметров

Таблица 2

	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
a_1	20	20	20	24	16
a_2	2	2	2	1	4
lim 1	3	5	1	1	1
lim 2	12	20	8	8	8
Q_1	0.457	нет	0.078	0.378	0.396

В случае с траулером наилучшие результаты даёт вариант № 4, именно он принят за базовый. Вариант № 2 вообще не привёл к выходу на ЛП.

Для обоих судов (танкер, траулер) можно варьировать и другие параметры испытаний. Основные из них – начальные курс и скорость судна. Танкер показал устойчивость процесса выхода на ЛП относительно вариации этих параметров (рис. 5). Траулер и здесь обнаружил особенности своего поведения (рис. 10).

5. Выводы

На основании проведенных модельных испытаний с двумя различными типами судов в разных условиях плавания можно сделать следующий принципиальный вывод. Подход швартуемого судна к объекту швартовки, находящемуся, например, на якорной стоянке, разделяется естественным образом на три этапа с разными способами управления швартуемым судном.

Этап 1. Движение на переменную точку, которая определяется как точка на ЛП, удалённая от цели на заданное расстояние. Его величина определяется из длины тормозного пути при снижении скорости швартуемого судна от ходовой до скорости швартовки. Движение на этом этапе происходит на ходовой скорости. Управление осуществляется по отклонению курса судна от направления на заданную точку.

Этап 2. Движение вдоль ЛП, которая определяется как линия, параллельная курсу цели и удалённая от цели на заданное расстояние. Скорость на этом этапе уменьшается до скорости швартовки. Управление происходит путем формирования управляющего сигнала как комбинации отклонений носовой и кормовой точек ДП судна от линии прицеливания.

Этап 3. Подход к борту объекта швартовки. На этом этапе управление судном ведётся вручную, исходя из конкретных обстоятельств швартовки. Автоматизированная швартовка на этом этапе возможна только при наличии соответствующего движительно-рулевого комплекса и датчиков, которые определяют расстояния и скорости точек швартуемого судна до объекта швартовки и индицируют эти данные на мониторе.

В настоящей статье рассмотрено автоматизированное движение только вдоль переменной ЛП. Показана на модели возможность реализации такого движения и рассчитана его эффективность с помощью одного из критериев качества управления.

Литература

- Антомонов Ю.Г. Расчёт систем, оптимальных по быстродействию. Л., Судостроение, с.273, 1964.
 Карасев А.В., Лукомский Ю.Л., Мусин Е.А. О критерии оптимального управления курсом судна. Судостроение, № 4, с.36-40, 1967.
 Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. Л., Судостроение, с.478, 1976.
 Фельдбаум А.А. Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования. Автоматика и телемеханика, т. 14, № 6, с.712-728, 1953.
 Юдин Ю.И., Пашенцев С.В. Патент № 2375246 Российская Федерация, МПК В63Н25/00. Мурман. гос. техн. ун-т. 2008126354/11; заявл. 27.06.2008; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 15, 2009.