

Литература:

1. Сенченко В.Г. Автоматизированный навигационный комплекс: практикум / В.Г. Сенченко, А.Л. Боран-Кешипьян, Д.С. Папулов. – Новороссийск: ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2015. – 122 с.
2. Зеленков Г.А. Проблемы создания беспилотных портовых буксиров-кантовщиков и концептуальные пути их решения / Г.А. Зеленков, В.В. Устинов, М.С. Лопатин. // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – №4. – С. 111-119.
3. Стуконог С.Н. Способ управления моделью буксира-автомата с азимутальной рулевой колонкой с использованием колес всенаправленного движения / С.Н. Стуконог. – М.: Транспортное дело России, – 2021. – №3(154). – С. 107-114.
4. Буйначев С.К. Моделирование движения и нагрузок плоских и грузовых плоских механизмов на языке python: учебное пособие / С.К. Буйначев, Е.Е. Баженов, И.В. Троицкий. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. – 80 с.

References

1. Senchenko V.G. Avtomatizirovannyj navigacionnyj kompleks: praktikum / V.G. Senchenko, A.L. Boran-Keshish'yan, D.S. Papulov. – Novorossiysk: GMU im. admirala F.F. Ushakova, – 2015 g. – 122 s.
2. Zelenkov G.A. Problemy sozdaniya bespilotnyh portovyh buksirov-kantovshchikov i konceptual'nye puti ih resheniya / G.A. Zelenkov, V.V. Ustinov, M.S. Lopatin. – Novorossiysk: MGA im. adm. F.F. Ushakova: Morskie intellektual'nye tekhnologii, – 2019 g. – №4 – s. 111-119.
3. Stukonog S.N. Sposob upravleniya model'yu buksira-avtomata s azimutal'noj rulevoj kolonkoj s ispol'zovaniem koles vsenapravlennoogo dvizheniya / S.N. Stukonog. – M.: Transportnoe delo Rossii, – 2021 g. – №3(154) – s. 107-114
4. Bujnachev S.K. Modelirovanie dvizheniya i nagruzok ploskih i nagruzok ploskih mekhanizmov na yazyke python / uchebnoe posobie / S.K. Bujnachev, E.E. Bazhenov, I.V. Troickij – Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta – 2019 g. – 80 s.

УДК656.052.4:656.052.7

DOI: 10.34046/aumsuomt101/10

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ ИМ В ПРОЦЕССЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ШВАРТОВНОЙ ОПЕРАЦИИ

*Ю.И. Юдин, доктор технических наук, профессор
В.В. Перевозов, капитан*

Целью представленных здесь результатов исследования является разработка и анализ способов швартовки с использованием предложенного инновационного принципа управления судном по отклонениям, и, тем самым, повышения эффективности этих операций. Предварительно определены структурно и идентифицированы параметрически математические модели судна, адекватно представляющие характер его поведения на различных этапах швартовной операции. Модели использованы при проведении модельных испытаний маневрирования судна на первом и втором этапах швартовки с помощью управления им по отклонениям от заданной траектории с использованием движительно-рулевого комплекса судна. В качестве объекта для выполнения исследований выбран контейнеровоз проекта ARCTICCONTAINERSHIPACS 650. Результаты выполненных модельных экспериментов представлены в настоящей статье.

Ключевые слова: швартовная операция, модель движения судна, заданная точка, заданная линия, управление по отклонениям.

SIMULATION OF THE MOVEMENT OF THE VESSEL WITH DIFFERENT WAYS OF CONTROLLING IT IN THE PROCESS OF PERFORMING A MOORING OPER- ATION

Yu.I. Yudin, V.V. Perevozov

The purpose of the research results presented here is the development and analysis of mooring methods using the proposed innovative principle of ship control by deviations, and, thereby, increasing the efficiency of these operations. The structurally defined and parametrically identified mathematical models of the vessel adequately represent the nature of its behavior at various stages of the mooring operation. The models were used in model tests of the ship's maneuvering at the first and second stages of mooring by controlling it by deviations from a given trajectory using the ship's propulsion and steering complex. A container ship of the ARCTIC CONTAINER SHIP ACS 650 project was chosen as an object for the research. The results of the model experiments performed are presented in this article.

Key words: mooring operation, ship motion model, set point, set line, deviation control.

Введение

Как было подробно изложено в статье [9], при изучении процесса подхода швартуемого судна к объекту швартовки, мы разделили его на два этапа. На каждом этапе выбрана математическая модель швартуемого судна, наилучшим образом отвечающая задаче исследования поведения судна при управлении им рассматриваемым способом [10]. Адекватность поведения модели поведению самого судна была показана в упомянутой здесь статье [10] на примерах стандартных испытаний – циркуляции и зигзага. В данной статье рассматриваются стратегии управления судном.

На первом этапе, когда судно находится на достаточно значительном расстоянии от объекта швартовки, используется управление им по отклонению от курса. Этот курс может быть выбран в начале этапа и фиксирован, или же он вычисляется в каждый момент времени с учётом перемещения швартуемого судна или любого другого объекта швартовки. В данном случае объект швартовки условно принят в виде заданной точки (ЗТ).

На первом этапе швартовки движение швартуемого судна (далее по тексту слово швартуемое опущено) описывается математической моделью японских инженеров, которая идентифицирована для контейнеровоза [10]. По нашему мнению, на первом этапе швартовой операции эта модель наилучшим образом отвечает целям исследования. Это связано с тем, что на этом этапе не происходит движения судна с большими углами дрейфа, и у нас нет необходимости использовать математическую модель в перемещениях.

На втором этапе швартовки, когда расстояние до объекта швартовки невелико, используется управление судном по отклонениям от заданной линии (ЗЛ). Эта линия может быть неподвижна, а может и перемещаться плоскопараллельно вслед за перемещением объекта швартовки. Стратегия управления судном на этом этапе другая, управление осуществляется по отклонениям носовой и кормовой точек судна от выбранной тем или иным способом ЗЛ. На этом этапе возможны движения судна с большими углами дрейфа, даже движение лагом, поэтому для его моделирования выбирается другая математическая модель в перемещениях. Эта модель позволяет описывать движение с произвольными углами дрейфа. Она также рассмотрена и идентифицирована для контейнеровоза [10]. Далее рассматриваются подробно оба этапа швартовки и результаты их моделирования.

Управление процессом по отклонению курса от направления на ЗТ

При выборе этого способа управления судном по координатам центра тяжести (ЦТ) судна (x_{0G}, y_{0G}) и координатам объекта швартовки – цели (x_{0p}, y_{0p}) определяются расстояние до цели D_p и направление на цель q_p :

$$D_p = \sqrt{(x_{0p} - x_{0G})^2 + (y_{0p} - y_{0G})^2} \quad (1)$$

$$q_p = \text{arctg}[(y_{0p} - y_{0G}) / (x_{0p} - x_{0G})]$$

Расстояние до цели мы не будем пока использовать, однако оно может понадобиться при управлении главным двигателем судна при регулировании его тяги (оборотов винта) по мере приближения судна к объекту швартовки. На первом этапе швартовки основной задачей управления является регулирование угла перекадки руля α_r . Если при дальнейшем движении судна его курс ψ не совпадает с направлением q_p , то возникает отклонение от этого направления $\Delta\psi = \psi - q_p$, которое и следует использовать при управлении курсом судна. В данном случае самым простым является управление, которое сводится к изменению угла перекадки руля α_r в зависимости от отклонения курса ψ от направления на цель q_p :

$$\alpha_r = -a_\psi \Delta\psi \quad (2)$$

где a_ψ – коэффициент пропорциональности, значение которого больше нуля.

Так, если отклонение текущего курса судна ψ от заданного направления q_p происходит по часовой стрелке ($\Delta\psi > 0$), то руль перекадывается на левый борт, что и будет вести к уменьшению отклонения. Дальнейшее движение по инерции приведёт к тому, что отклонение от заданного направления станет отрицательным, и руль будет переложён на правый борт. Движения повторяются циклически вплоть до снятия заданного режима управления.

В таком простом законе управления есть значительная идеализация технических возможностей реального управления. Руль не может мгновенно перекадываться с борта на борт, так как это требует определенного времени, которое является нормативным. Поэтому реальным является управление скоростью перекадки руля. В этом случае закон управления будет такой:

$$v_{cr} = -b_\psi \Delta\psi \quad (3)$$

где b_ψ – коэффициент пропорциональности, значение которого больше нуля.

При этом скорость перекадки руля v_{cr} положительная, если руль перекадывается на правый борт, и отрицательная при перекадке на ле-

вый борт. При отклонении курса судна от заданного направления на цель q_p по часовой стрелке закон управления (3) обеспечит поворот руля на левый борт, т.к. скорость поворота будет отрицательной. Аналогично, при отклонении курса судна от направления на цель q_p против часовой стрелки начнётся перекладка руля на правый борт.

Кроме этого, к задачам, требующим решения при выборе закона управления курсом судна следует отнести и такие как:

- скорость реакции системы управления судном на возникающее отклонение;
- перерегулирование, т.е. величина максимального зарыскивания, максимального отклонения курса судна от направления на цель q_p .

Физическая сущность этих задач - инерция большой массы судна в водной среде, такова, что, оптимально решая одну из указанных задач, мы тут же снижаем качество решения другой задачи.

Так, быстрая реакция системы управления курсом ведёт к малым зарыскиваниям, но приводит к частым перекалкам руля. Наоборот, медленная реакция системы ведёт к редким перекалкам руля, но приводит к большим зарыскиваниям. Поэтому всегда вырабатываются некоторые паллиативные решения, приводящие к удовлетворяющим нас показателям системы «управление – судно».

Формирование управляющего сигнала по отклонению от курса на ЗТ

Одним из способов решения этой задачи является выработка сигнала управления по более сложному закону, чем закон (2). Он состоит в том, что вырабатывается сигнал управления

$$sig = -c_{\psi} \Delta \psi, \quad (4)$$

по которому скорость перекалки руля выбирается согласно нелинейному закону, показанному графически на рисунке 1.

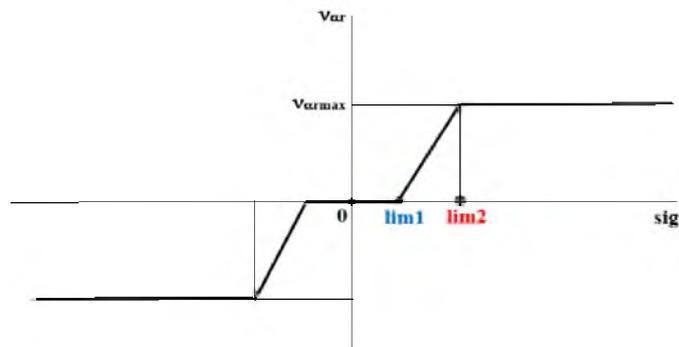


Рисунок 1 – Нелинейный сигнал управления скоростью поворота руля

Если сигнал управления не превышает величины $lim1$, то скорость перекалки руля нулевая, руль неподвижен. Тем самым возникает зона нечувствительности управляющей системы – при малых отклонениях $\Delta\psi$ система не реагирует на такое отклонение. Когда сигнал управления превышает значение $lim1$, но не достигает значения $lim2$, то происходит перекалка руля со скоростью, пропорциональной управляющему сигналу

$$v_{cor} = v_{cor\ max} \frac{sig - lim1}{lim2 - lim1} \quad lim1 < sig < lim2 \quad (5)$$

И, наконец, если управляющий сигнал превосходит значение $lim2$, то скорость перекалки руля постоянна и равна максимально возможной технической его перекалки.

В таком законе управления вариацией пределов участков $lim1$ и $lim2$ можно добиться определенных качественных характеристик результатов управления.

Замедление реакции системы на малые отклонения от курса можно получить с помощью

ещё одного закона управления. В него следует ввести производную по времени отклонения $\Delta\psi$. Этот закон управления можно записать так:

$$v_{cor} = -b_{\psi} \Delta \psi - c_{\psi} \frac{d(\Delta \psi)}{dt} \quad (6)$$

В этом законе второе слагаемое связано со скоростью изменения $\Delta\psi$. Оно призвано усилить реакцию системы управления, если отклонение $\Delta\psi$ возрастает по модулю, и ослабить реакцию, если отклонение убывает по модулю. Да и сама скорость возрастания-убывания $\Delta\psi$ сказывается на формировании скорости перекалки руля.

Такой закон можно обобщить и формировать, как и выше, не саму скорость поворота руля, а только управляющий сигнал

$$sig = -b_{\psi} \Delta \psi - c_{\psi} \frac{d(\Delta \psi)}{dt} \quad (7)$$

и лишь с его помощью задавать величину скорости перекалки руля согласно нелинейному закону, показанному на рисунке 1.

Управление процессом по отклонениям от ЗЛ

Другой стратегией управляемого подхода являются принципы управления по отклонениям. Эти принципы согласуются с патентными продуктами [4]-[7], которые положены в основу всех представленных здесь исследований. Эти принципы вводят понятие заданной линии (ЗЛ), которая выбирается некоторым образом, и зависит от существа той задачи, которая стоит перед управлением. Принцип этой стратегии управления состоит в следующем. Тип ЗЛ выбран, и её уравнение составлено. Спутниковая система с дифференциальным сигналом DGPS или ДСНС «Глонасс» определяет непрерывно координаты двух

разнесённых точек судна. В качестве таковых берутся две точки соответствующим образом расположенные в диаметральной плоскости (ДП) судна, носовая F и кормовая A . Значения координат точек F и A позволяют непрерывно вычислять их поперечные смещения d_F и d_A от текущего положения ЗЛ, которая в общем случае может перемещаться. Фактически, это просто кратчайшее расстояние этих точек до ЗЛ. Причём, поперечное смещение рассматриваемой точки от ЗЛ считается положительным, если она смещается вправо от неё и отрицательным, если она смещается влево, глядя в нос судна. Различные варианты расположения судна и ЗЛ приведены на рисунке 2 а, б, в, г, д, е.

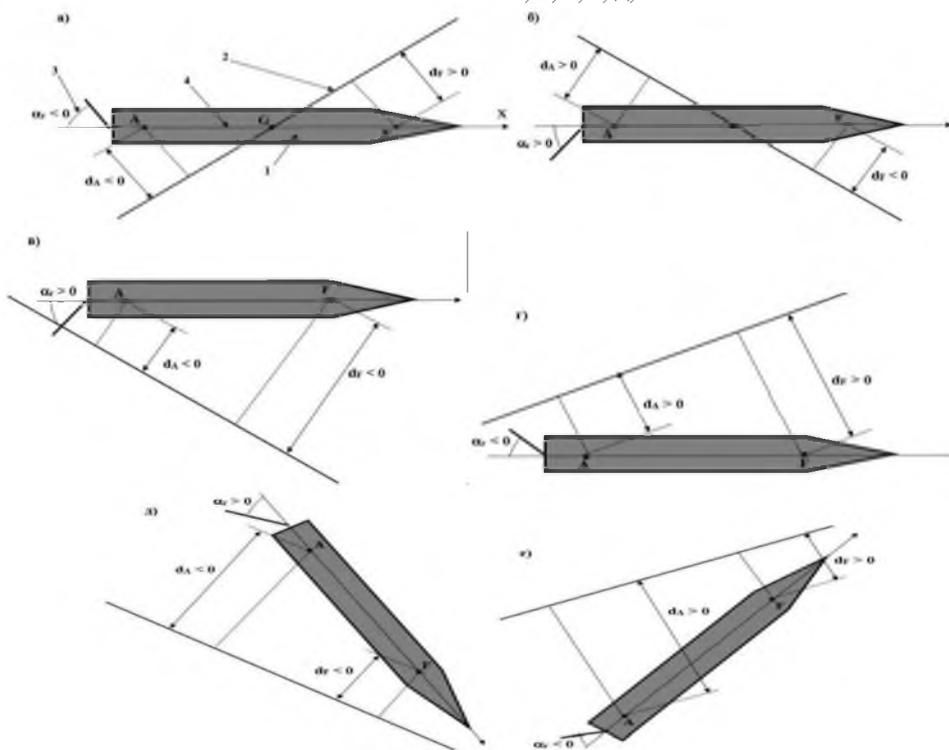


Рисунок 2 – Различные варианты движения судна относительно ЗЛ и управления судном по отклонениям от неё

Вычисленные поперечные смещения вырабатывают сигнал на отклонение руля α_r по следующему закону:

$$\alpha_r = -k_F d_F + k_A d_A \quad (8)$$

Здесь k_F , k_A – коэффициенты усиления по поперечным смещениям носовой и кормовой точек судна от ЗЛ. Это положительные величины, причём k_F больше, чем k_A . При этом угол перекадки руля α_r считается положительным при его перекадке в сторону правого борта и наоборот.

На рисунке 2 а ДП(4) судна (1) пересекает ЗЛ (2) под углом, величина которого определяется значениями поперечных смещений точек: носовой d_F и кормовой d_A от ЗЛ, при этом $d_F > 0$, $d_A < 0$. В этом случае, согласно закону управления (8), угол перекадки руля (3) будет иметь отрицательное значение $\alpha_r < 0$, т.е. он будет перекачен на

левый борт и судно начнёт вращение влево, что приведёт к изменению d_F и d_A и в конечном итоге к выходу судна на ЗЛ и пересечению этой линии по инерции. Во втором случае (рисунок 2 б) согласно закону (8) угол α_r будет иметь положительное значение $\alpha_r > 0$, т.е. руль будет перекачен на правый борт и судно начнёт вращение вправо, что приведёт к изменению d_F , d_A и к выходу судна на ЗЛ. Таким образом два указанных рисунка (2 а, б) представляют случаи, когда судно находится на ЗЛ и пересекает её в том или ином направлении.

Следующие два рисунка (2 в, г) представляют случаи, когда судно находится целиком вне ЗЛ и удаляется от неё. Ещё на двух рисунках (2 д, е) судно находится целиком вне ЗЛ и приближается к ней. Следует иметь в виду, что возможны случаи, когда судно расположено параллельно ЗЛ

и находится слева или справа от неё. В этом случае расстояния d_F и d_A равны друг другу и по величине, и по знаку. Заметим по существу, что анализ знака комплекса $(k_F \times d_F + k_A \times d_A)$ во многих случаях требует знания величин коэффициентов усиления k_F и k_A . Естественно, что эти коэффициенты должны зависеть от положения точек F и A на ДП судна относительно его ЦТ. При равных значениях абсцисс точек F(x_F) и A(x_A) ($x_F = x_A$) и симметрии корпуса эти коэффициенты должны быть равны. В этом случае при параллельном положении ДП судна относительно ЗЛ руль должен быть расположен в ДП, и поворот судна будет происходить по инерции. Поэтому даже при предварительных оценках можно предполагать, что значение коэффициента k_F должен быть несколько больше значения коэффициента k_A . Так, например, возможно положить $k_F = 1.1$, а $k_A = 0.9$ при равных расстояниях x_F и x_A . Скорее всего, отношение этих коэффициентов обратно пропорционально отношению расстояний выбранных точек F и A от полюса поворота с координатой x_0 [3]. Точный подбор этих коэффициентов связан с решением задачи оптимизации, т.е. связан с оценкой качества управления.

Формирование управляющего сигнала по отклонениям от ЗЛ

Как было сказано выше, управление (4) имеет определенные недостатки. Оно предполагает, что руль переключается в новое положение мгновенно, чего реально не происходит. Поэтому другим подобным законом управления является закон, в котором формируется скорость переключения руля

$$v_{ор} = -k_F d_F + k_A d_A \tag{9}$$

При этом будет действовать естественное ограничение на величину самой перекладки руля,

которая не должна превосходить максимальной, заданной для конкретного судна. Это означает, что руль, переложенный на борт, далее находится в этом положении до новой команды на его переключку.

Как и ранее, при управлении по отклонению от направления, лучшим является способ управления, состоящий в формировании управляющего сигнала sig , величина которого определит затем саму скорость перекладки руля.

В нашем случае этот сигнал имеет вид:

$$sig = -k_F d_F + k_A d_A \tag{10}$$

Сама скорость перекладки руля в зависимости от сигнала выражается графически рисунком 1. Это рисунок уже использовался в случае управления по отклонению от направления. В данном случае иначе сформирован только сам управляющий сигнал. Разумеется, коэффициенты усиления в законах (2) или (3) и (10) различны. Чтобы не повторяться словесно, приведём этот закон в аналитическом виде:

$$\begin{aligned} v_{ор} &= 0 & sig &\leq lim1 \\ v_{ор} &= v_{ор\max} \frac{sig - lim1}{lim2 - lim1} & lim1 < sig < lim2 \\ v_{ор} &= v_{ор\max} & sig &\geq lim2 \end{aligned} \tag{11}$$

Данный закон управления весьма универсален и содержит зону нечувствительности ($sig < lim1$), зону насыщения ($sig > lim2$) и переходную между ними зону ($lim1 < sig < lim2$) линейного изменения скорости перекладки. Закон предполагает асимметричное отображение для отрицательных значений сигнала управления ($sig < 0$). Эти зоны показаны на рисунке 3 в зависимости от отклонений d_F (на рисунке dn) и d_A (на рисунке dk): зона 0 – нулевое значение сигнала, зона 1 – $lim1 < sig < lim2$, зона 3 – $sig > lim1$, зона 2 – $-lim1 > sig > -lim2$, зона 4 – $sig < -lim2$.

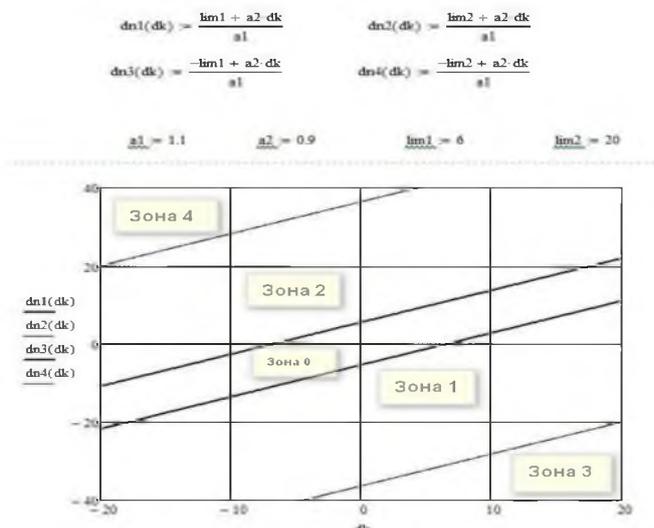


Рисунок 3 – Зоны изменения управляющего сигнала в зависимости от отклонений точек судна F и A от ЗЛ

Зоны разделяют параллельные прямые линии, уравнения которых показаны вверху рисунка в виде скриншота из среды MathCad. Рисунок позволяет представить, как формируется сигнал управления в зависимости от величин и знаков от-

клонений d_F и d_A . Расчёт выполнен для конкретных значений коэффициентов и пределов: $a_1 = 1.1$, $a_2 = 0.9$, $lim1 = 6$, $lim2 = 20$ (см. рисунок 3).

На рисунке 4 показан момент изменения положения руля.

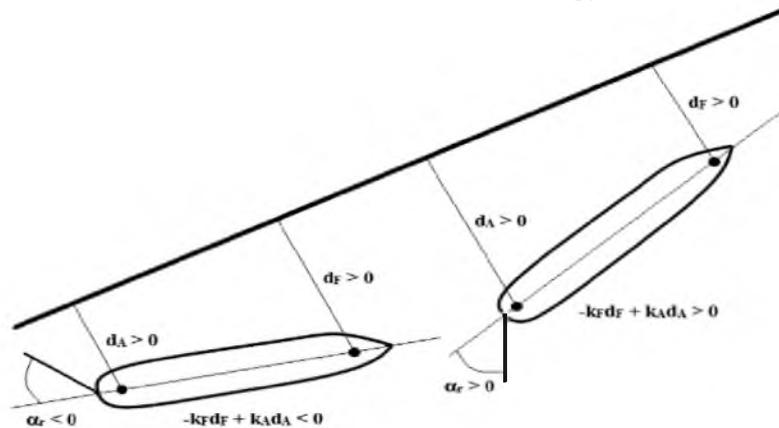


Рисунок 4 - Момент изменения направления угла перекладки руля

Это момент, когда в законе, например, (9) комплекс $-k_F d_F + k_A d_A$, управляющий рулём, меняет свой знак. В данном случае, он меняется с отрицательного знака на положительный. Следовательно, руль, переложённый на левый борт будет переключаться на правый борт.

Инерцию самого судна, а не только системы перекладки руля, можно учесть неявно подбором границ зон. Желательно сделать этот учёт явным, для чего следует добавить в закон формирования управляющего сигнала член, который зависит от текущего положения руля α_r :

$$sig = -k_F d_F + k_A d_A + k_{\alpha_r} \alpha_r \quad (12)$$

Управление с использованием представленных законов придётся моделировать отдельно, оценивая каждый раз их эффективность.

При выбранном законе управления рулём система управления начнёт перекладку руля до пересечения судном ЗЛ, а именно, в момент начала движения в её сторону. Более точно этот момент можно отрегулировать выбором значений коэффициентов усиления k_F и k_A . Аналогичная перекладка руля с правого борта на левый будет выполнена при нахождении судна по другую сторону от ЗЛ.

Моделирование движения вдоль ЗЛ

При использовании предложенных законов управления определяющими величинами являются расстояния от определённых точек судна до задаваемой или вычисляемой ЗЛ. Такую линию, как при моделировании, так и при реальной швартовке, можно выбирать различными способами. Цель – показать работоспособность принципа управления по отклонениям в самых разнообразных режимах маневрирования.

Способ 1. ЗЛ связывает ЗТ и начальное место судна, при этом ЗЛ остается неподвижной.

Способ 2. То же, что в способе 1, но ЗЛ получает угловое перемещение, вращаясь с центром в ЗТ. Вращение попеременное маятниковой типа.

Способ 3. То же, что в способе 1, но ЗТ перемещается в ограниченной области. ЗЛ связывает эту точку с ЦТ судна, т.е. перемещается соответственно.

Способ 4. ЗТ выбрана в начальном месте судна. ЗЛ проходит через эту точку и вращается с центром в ней маятниковым образом.

Способ 5. ЗЛ, построенная любым способом, перемещается сложным образом с некоторой скоростью, меньшей скорости судна.

Далее будем подробно рассматривать результаты моделирования манёвров судна при этих способах выбора ЗЛ, варьирую параметры формирования управляющего сигнала и других характеристик управления. На этом этапе будем пользоваться моделью японских инженеров, считая, что движения будут происходить с углами дрейфа, не превышающими 30° .

Рассмотрим определение расстояний от заданных точек судна до некоторой прямой – ЗЛ в неподвижной координатной системе X_0OY_0 . При этом если она проходит через точку с координатами (x_{0p}, y_{0p}) и имеет заданное направление ψ_p (положительное направление отсчёта от оси OX_0 по часовой стрелке), то её нормальное уравнение можно записать в виде:

$$-(x_0 - x_{0p}) \cos \psi_p + (y_0 - y_{0p}) \sin \psi_p \pm \Delta l = 0 \quad (13)$$

Здесь уравнение несколько обобщено – в случае, если $\Delta l = 0$, то это упрощённое уравнение,

если же $\Delta l \neq 0$, то это уравнение прямой, отклонённой параллельно ЗЛ на величину Δl . Знак отклонения Δl позволяет смещать параллельную прямую в ту или другую сторону. Пока будем считать это смещение нулевым, создавая возможность для дальнейших обобщений.

Выберем на ДП судна две точки, соответственно носовую F (x_{0F} , y_{0F}) и кормовую A (x_{0A} , y_{0A}), которые расположены на равных расстояниях d от ЦТГ (x_{0G} , y_{0G}) судна и запишем их координаты в неподвижной координатной системе X_0OY_0 :

$$\begin{aligned} x_{0F} &= x_{0G} + d \sin \psi ; y_{0F} = y_{0G} + d \cos \psi \\ x_{0A} &= x_{0G} - d \sin \psi ; y_{0A} = y_{0G} - d \cos \psi \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь ψ – курс судна. Тогда отстояния точек F и A от ЗЛ, представленной уравнением (13) находятся обычной подстановкой их координат (14) в нормальное уравнение ЗЛ. Получаем следующие выражения для отклонений точек F и A от ЗЛ:

$$\begin{aligned} d_F &= -(x_{0F} - x_{0p}) \cos \psi_p + (y_{0F} - y_{0p}) \sin \psi_p \\ d_A &= -(x_{0A} - x_{0p}) \cos \psi_p + (y_{0A} - y_{0p}) \sin \psi_p \end{aligned} \quad (15)$$

Можно раскрыть выражения в (15) и получить зависимости:

$$\begin{aligned} d_F &= -(x_{0G} - x_{0p}) \cos \psi_p + (y_{0G} - y_{0p}) \sin \psi_p + d \sin(\psi_p - \psi) \\ d_A &= -(x_{0G} - x_{0p}) \cos \psi_p + (y_{0G} - y_{0p}) \sin \psi_p - d \sin(\psi_p - \psi) \end{aligned} \quad (16)$$

Возьмём теперь комбинацию расстояний – $d_F + d_A$, т.е. фактически возьмём равные коэффициенты усиления в законе (9). В результате несложных преобразований получим:

$$-d_F + d_A = 2d \sin(\psi - \psi_p) = 2d \sin(\Delta \psi) \quad (17)$$

Это означает, что при равных коэффициентах усиления в законе управления (9) он переходит в рассмотренный нами закон управления по отклонению курса судна ψ от направления на цель

q_p . Это ещё раз подтверждает необходимость выбирать значения коэффициентов усиления в законе (9) неравными по величине, чтобы иметь возможность реализовать предложенный способ управления. Кроме того, этот факт доказывает, что предлагаемый способ управления судном является более общим, из него как частный случай следует способ управления по отклонению курса ψ от фиксированного направления q_p .

Способ 1. Произведя указанные преобразования, перейдём к моделированию манёвров судна с использованием первого способа определения ЗЛ. Выберем следующие параметры в системе формирования управляющего сигнала: $a_1 = 1.1$, $a_2 = 0.9$ (a_1 , a_2 – обозначения, принятые в компьютерной программе), $\text{lim}1 = 3$, $\text{lim}2 = 14$. Движение начинается из точки с координатами (0, 0), со скоростью $v = 9$ м/с и начальным курсом $\psi_0 = 45^\circ$. ЗТ расположена в координатах (20000 м, 20000 м), ЗЛ направлена в эту точку из нулевой точки.

Поскольку направление ЗЛ q_p и начальный курс судна ψ_0 совпадают, а самосудно находится на ЗЛ, то дальнейшее движение происходит по прямой линии, совпадающей с ЗЛ. Причина этого банального поведения судна – отсутствие какого-либо начального возмущения, заставляющего судно отклониться от ЗЛ. Любой фактор, который вызывает такое возмущение, приводит к иному поведению судна. Таким фактором может быть курс судна, не совпадающий с направлением ЗЛ, начальное смещение от ЗЛ или внешние воздействия в виде ветра и волнения. Например, на рисунке 5 показан рабочий кадр программы для моделирования манёвров судна, который содержит два поля.

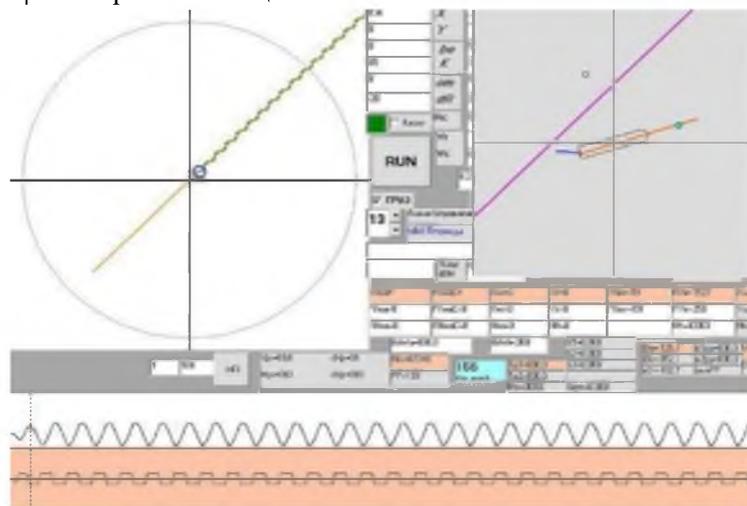


Рисунок 5 – Кадр компьютерной программы для моделирования манёвров судна

Левое поле показывает траекторию судна при маневрировании с масштабом представления 0,2, правое поле показывает положение судна в масштабе 10, т.е. в 50 раз крупнее, чем на левом поле. На левом поле представлена траектория судна, которая меандрирует вокруг коричневой линии, которая является ЗЛ. Синяя окружность даёт место ЦТ судна на момент просмотра траектории, именно на этот момент на правом поле изображается положение судна относительно ЗЛ, которая на этом поле имеет фиолетовый цвет. Два длинных узких поля внизу показывают курс судна ψ (белое поле) и угол перекладки руля (коричневое поле). На этих полях в левом конце видна вертикальная пунктирная линия, которая показывает момент просмотра траектории – в самом начале движения. В малом голубом поле над этими длинными полями записан момент времени просмотра – 156 с движения при общей длине от-

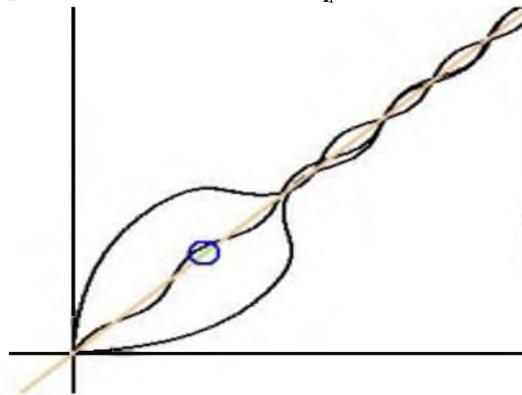


Рисунок 6 – Начальные возмущения в виде отклонений начального курса судна от направления ЗЛ

Верхняя траектория соответствует начальному курсу 5° , нижняя – курсу 85° , при направлении ЗЛ 45° . Система управления при начальной разности направлений в $\pm 40^\circ$ успешно обрабатывает её и выводит судно на направление ЗЛ. Средняя траектория соответствует начальному отклонению курса в 15° , поэтому мы не видим начального манёвра, отклонение слишком мало. Однако, если начальное отклонение превышает 40° , система управления не в состоянии обработать его, и судно будет следовать по этому начальному курсу. Практически это означает, что перед включением системы управления следует выйти на курс, достаточно близкий к намеченному движению вдоль ЗЛ.

Способ 2. ЗЛ сформирована так же, как и первым способом, но она разнонаправлено «качается» вокруг её исходного положения с угловой скоростью $0.69^\circ/\text{мин}$, сменяя направление поворота каждые 1000 с. Это и служит возмущающим фактором – ЗЛ уходит от направления движения судна, система управления возвращает судно на ЗЛ. Соответствующая траектория судна показана

резка моделирования 6000 с. Можно констатировать, что система управления по отклонениям действует безупречно, производя периодически перекладку рулевого органа с одного борта на другой. Тем самым она осуществляет движение вдоль ЗЛ, ведя судно в ЗТ. Вопрос – за счёт чего начались эти управляющие движения, что было начальным возмущением? В самой верхней части кадра есть два небольших поля с обозначениями «X» и «Y», при этом $x_{0G} = 134$, $y_{0G} = 0$. Вот это начальное значение координаты x_{0G} и послужило указанным возмущением. Уже в самом начале движения возникло отклонение от ЗЛ, которое было отработано системой управления и привело к меандрическому движению вдоль ЗЛ.

На рисунке 6 показан случай, когда начальным возмущением является отклонение начального курса судна $\psi_0 = 5^\circ, 85^\circ$ от направления ЗЛ $\varphi_p = 45^\circ$.

на рисунке 7.

Видно, что траектория существенно отличается от траектории рисунка 5. Линии, показанные здесь, имеют тот же смысл, что на рисунке 5. Система управления справляется с возмущением, которое действует не только в начальный момент, но и в процессе всего моделирования – судно остаётся на ЗЛ и движется в ЗТ. Для этого вида возмущения характерно, что его величина убывает по мере приближения судна к ЗТ. Линейные перемещения ЗЛ при маятниковом качании тем больше, чем дальше от ЗТ находится судно. Именно поэтому траектория судна под действием управления по отклонениям носит характер, показанный на рисунке 7 (левое поле).

Вначале размах траектории большой, по мере движения к ЗТ он убывает, так как линейные перемещения ЗЛ уменьшаются. Программа моделирования даёт возможность исследовать поведение моделируемого судна всесторонне. Это означает, что программа имеет возможность выводить все кинематические и силовые характеристики процесса движения.

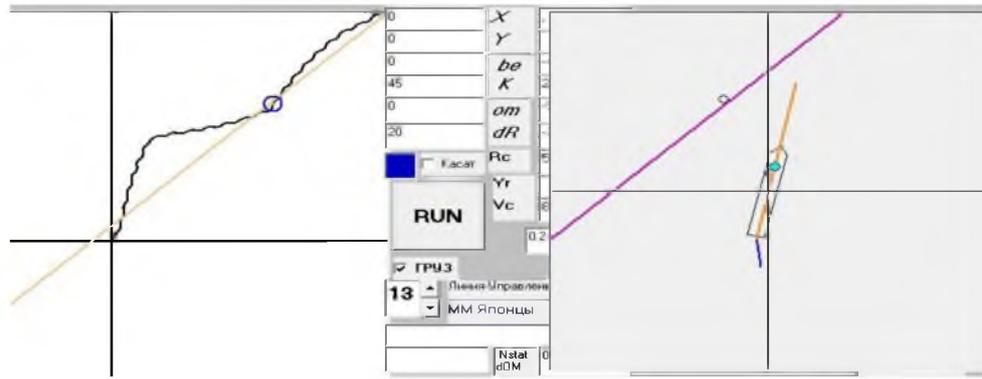


Рисунок 7 – Кадр моделирования манёвров судна при маятниковом качании ЗЛ

Так, на рисунке 8 приведены основные параметры, характеризующие процесс управления судна по отклонениям. Верхняя диаграмма рисунка показывает изменение самих отклонений d_F и d_{Δ} в метрах. Средняя диаграмма даёт разность

этих отклонений и управляющий сигнал sig согласно формуле (13). Нижняя диаграмма показывает угол перекладки руля α_r , управляемого с помощью сигнала sig .

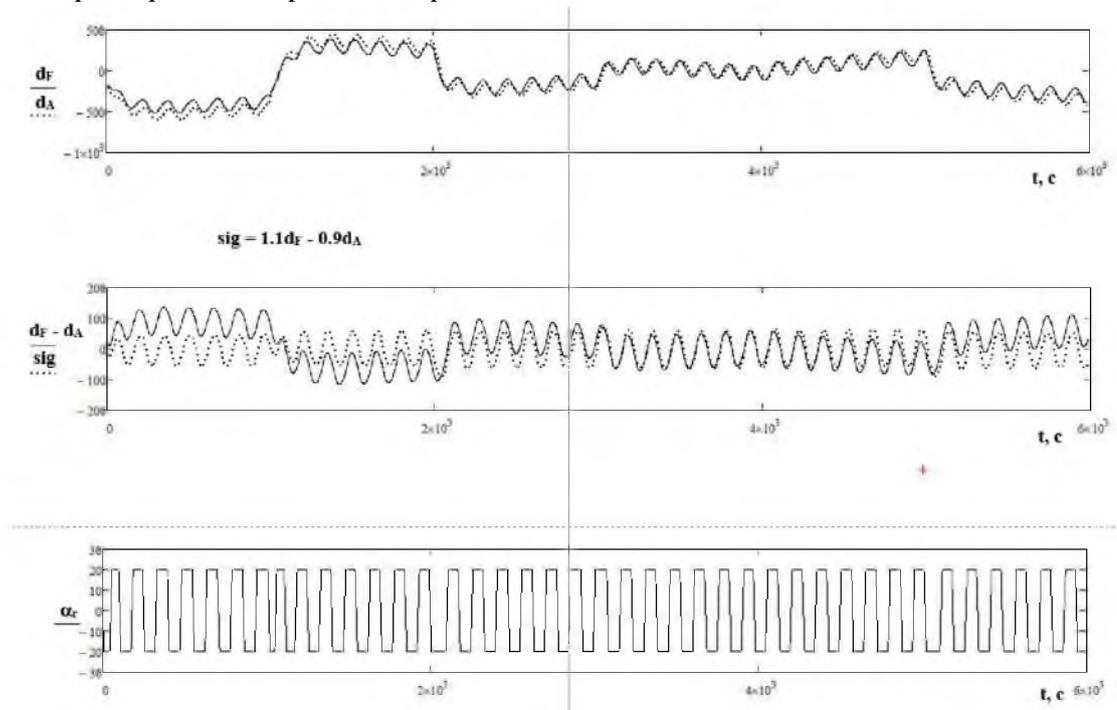


Рисунок 8 – Отклонения от ЗЛ (м), управляющий сигнал и угол перекладки руля ($^{\circ}$) судна

На рисунке 9 приводится угловое положение ЗЛ ψ_p ($^{\circ}$), управляющий сигнал sig и курс судна ψ ($^{\circ}$) вдоль траектории. На диаграмме этого

рисунка видно, как управляющий сигнал обрабатывает изменение в положении ЗЛ, изменяя в свою очередь угол перекладки руля и, как следствие, курса судна.

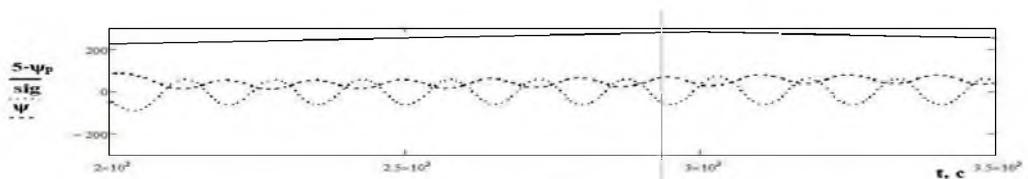


Рисунок 9 – Угловое положение ЗЛ ψ_p , управляющий сигнал sig и курс судна ψ в процессе управления по отклонениям от ЗЛ

Способ 3.ЗТ перемещается в небольшой области, направление ЗЛ изменяется с небольшой угловой скоростью. Перемещения ЗТ задаётся уравнениями:

$$x_{0p} = x_{0p0} + 800 \cos(3t) \quad y_{0p} = y_{0p0} + 600 \sin(5t) \quad (18)$$

Фактически это закон перемещения по тра-

ектории фигуры Лиссажу, в нашем случае это может имитировать движение объекта швартовки, например, судна, стоящего на якоре при действии ветро-волновых нагрузок. Кроме того, ЗЛ, связанная с этой точкой качается вокруг неё с угловой скоростью $0.7^\circ/\text{мин}$. Поведение судна в этом случае показано на рисунке 10.

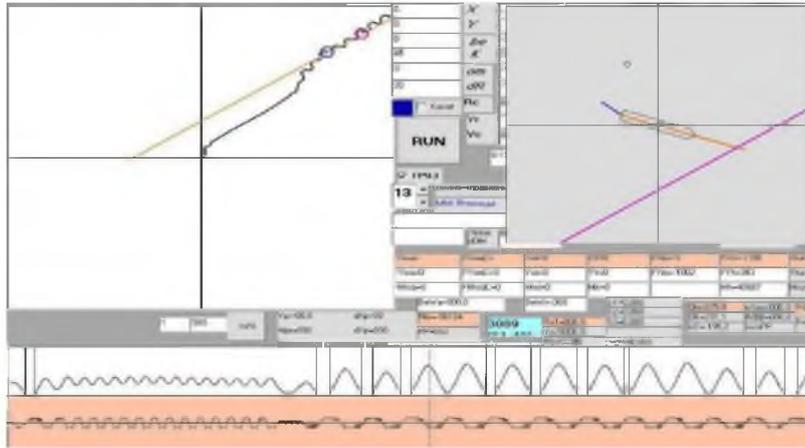


Рисунок 10 – Кадр моделирования манёвров судна при перемещении ЗТ и маятниковом качании ЗЛ

Это программный кадр, подобный рисунку 7, где были даны пояснения по существу представления траекторной информации. Траектория движения судна стала несколько другая. Теперь в большей мере на управлении стало сказываться перемещение ЗТ, а не качание ЗЛ. Именно поэтому вначале траектория судна относительно гладкая. При дальнейшем движении при приближении к ЗТ её значительные перемещения начинают сказываться на управлении, происходят большие перекладки руля. Однако система управления по отклонениям выводит модель в ЗТ, т.е. справляется с поставленной задачей.

На рисунке 10 показано состояние процесса управления на 3089 с, в поле слева видно положение судна (синий кружок), положение ЗТ

(фиолетовый кружок) и ЗЛ (коричневая). Судно следует вдоль ЗЛ и подводится системой управления к ЗТ. На поле справа в увеличенном масштабе показано положение судна относительно ЗЛ на 3089 с. На продольных полях ниже приведены изменения курса судна ψ (вверху) и угол перекладки α_r руля (внизу). Видны высокочастотные перемещения руля с малой амплитудой, что говорит о том, что при конструировании реального устройства управления следует фильтровать эти колебания. Для лучшего представления изменения некоторых параметров движения они показаны на рисунке 11 в увеличенном временном масштабе на протяжении 200 с – от 4100 с до 4200 с.

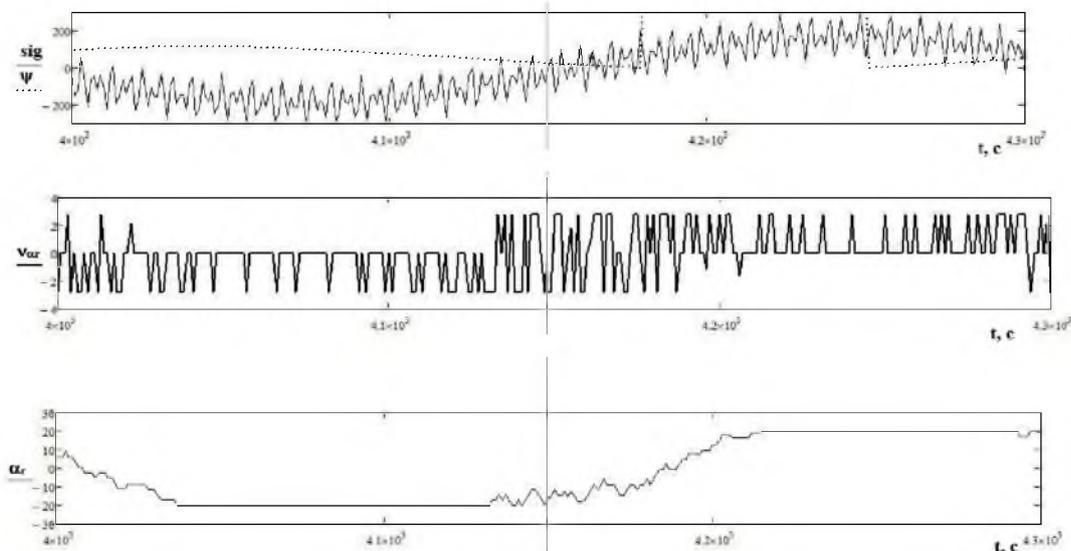


Рисунок 11 – Управляющий сигнал sig, скорость перекладки руля v_{ar} ($^\circ/\text{с}$) и угол перекладки руля α_r ($^\circ$)

На рисунке 11 показаны изменения во времени сигнала управления sig и курс судна ψ (верхняя диаграмма), скорости перекладки руля $v_{\text{ор}}$ (средняя диаграмма) и угол перекладки руля α_r (нижняя диаграмма). На этих диаграммах хорошо видны высокочастотные колебания, о которых сказано выше. Но самое главное – система управления оказывается при этих видах возмущений работоспособной и достигает цели управления.

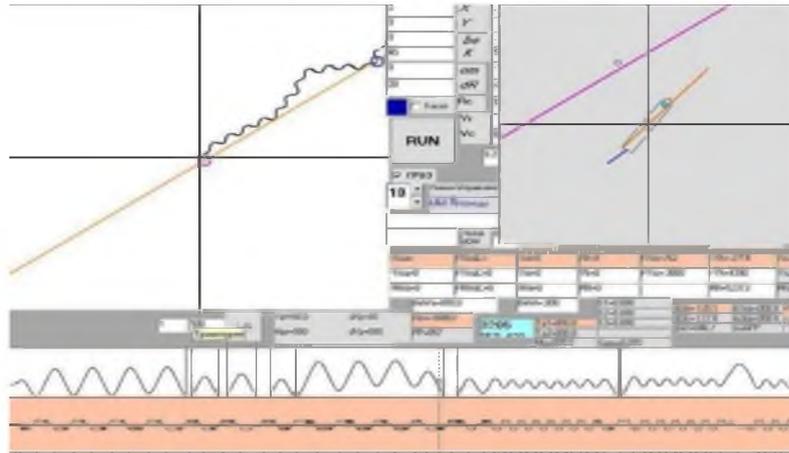


Рисунок 12 – Кадр моделирования манёвров судна при перемещении ЗТ вблизи нуля

Поскольку ЗТ (синий кружок), находится вблизи начальной позиции судна $(0, 0)$, а ЗЛ вращается вокруг неё, то траектория имеет меньшие колебания в начальной части, и большие при удалении от начальной точки. То есть прямо противоположно тому, что мы имели на рисунке 7. Причина понятна – линейные перемещения ЗЛ с центром в окрестности начала координат тем больше, чем дальше судно уходит от центра. На правом поле показано положение судна относительно ЗЛ на 3205 с, на продольных диаграммах ниже – курс судна ψ и угол перекладки руля α_r в течение про-

Пока мы не говорим об эффективности управления, это будет рассмотрено отдельно.

Способ 4. В предыдущих способах формирования переменных параметров, ЗТ выбиралась вдали от судна. Теперь перенесём её ближе к начальному положению судна. Тогда она теряет роль заданной, но через неё проходит ЗЛ, вдоль которой и должно двигаться судно при управлении по отклонениям от неё. На рисунке 12 показан программный кадр, который демонстрирует траекторию судна на левом поле.

цесса маневрирования. Колебания курса означают лишь его переход через значение 360° с обращением в 0° .

Более детально характеристики процесса маневрирования представлены на рисунке 13. В растянутом временном масштабе показан отрезок манёвров длиной в 200 с. Приведены управляющий сигнал sig , скорость перекладки $v_{\text{ор}}$ и угол перекладки руля α_r . Хорошо видны высокочастотные колебания всех характеристик, которые необходимо фильтровать (сглаживать) при реализации принципа управления по отклонениям.

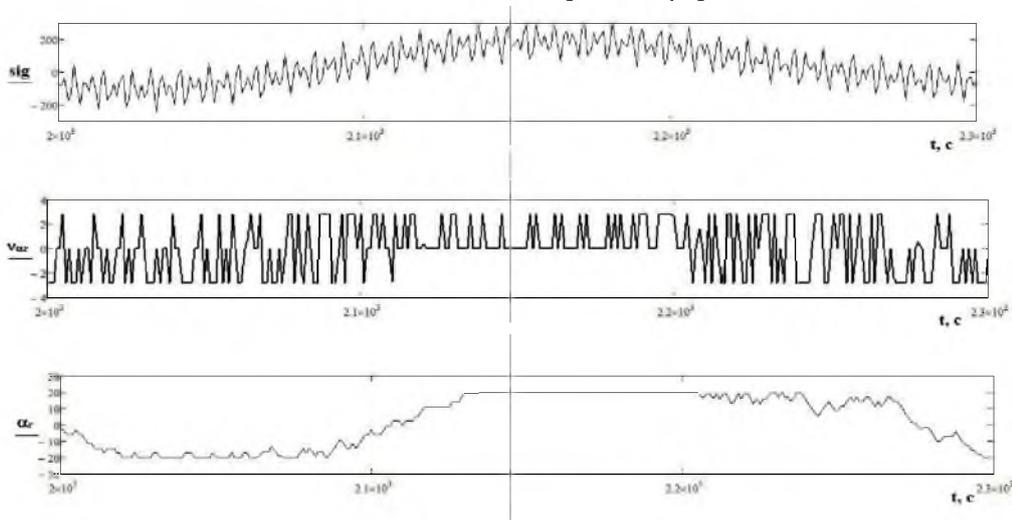


Рисунок 13 – Управляющий сигнал sig , скорость перекладки $v_{\text{ор}}$ ($^\circ/\text{с}$) и угол перекладки руля α_r ($^\circ$)

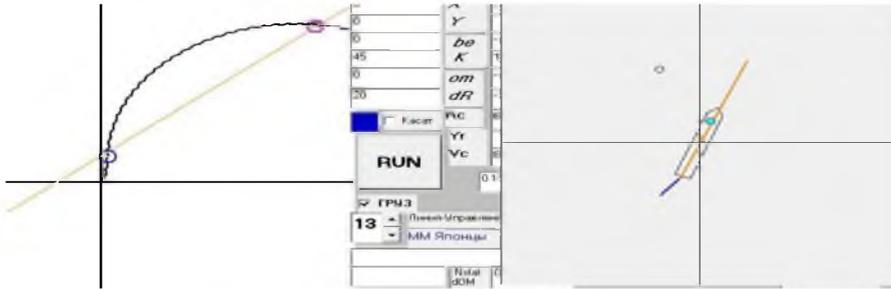
Способ 5. В завершение различных способов проверки работоспособности принципа управления по отклонениям рассмотрим достаточно сложное перемещение ЗЛ. Пусть в окрестности точки ЗТ совершает круговое движение по окружности некоторого радиуса. Касательная к этой окружности, проходящая через ЗТ, выбирается в качестве ЗЛ. Начальное положение точки и касательной выбираются так, чтобы касательная была направлена на судно в его начальной позиции. Конкретно выбраны параметрические по времени t уравнения движения ЗТ:

$$x_{0p} = 20000 + 500 \cos(2\pi t / 30000 + \pi / 4)$$

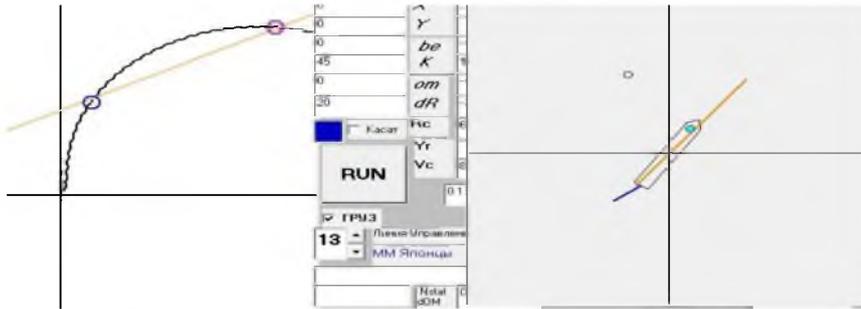
$$y_{0p} = 2000 + 500 \sin(2\pi t / 30000 + \pi / 4)$$

Фазовый сдвиг на $\pi/4$ введён для получения нужного начального направления касательной – ЗЛ. Для представления результатов моделирования показан не один кадр программы, а четыре последовательных кадра, снятые для разных моментов времени. Все они приведены на рисунке 14 а, б, в, г, здесь указаны моменты съёмки скриншота (422, 1515, 2956, 3830 с).

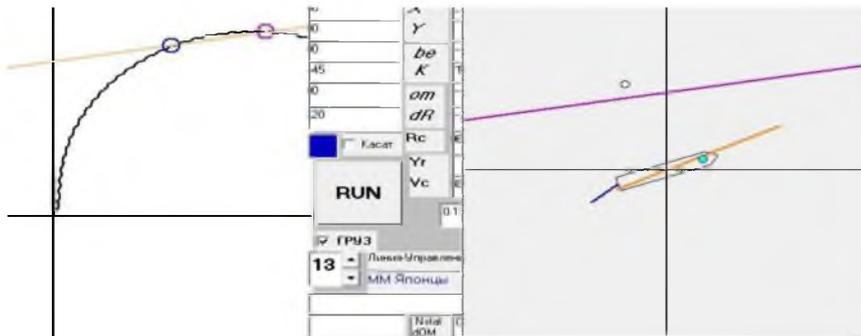
а) $t = 422$ с.



б) $t = 1515$ с.



в) $t = 2956$ с.



г) $t = 3830$ с.

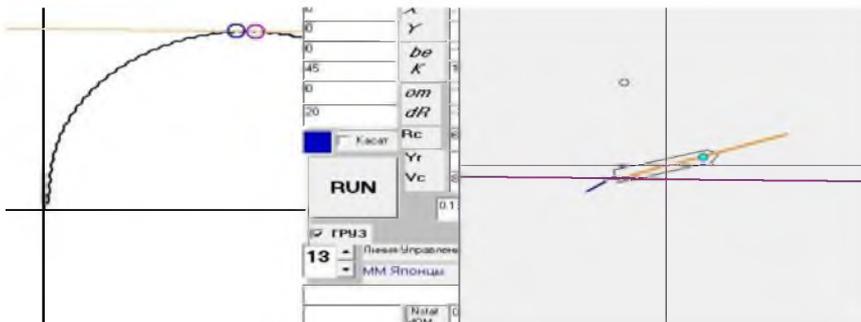


Рисунок 14 – Кадры программы моделирования манёвров судна при сложном формировании ЗЛ

Кадры демонстрируют движение судна (синий кружок) по кривой под действием системы управления по отклонениям от ЗЛ, при этом оно следует за ЗЛ (коричневая линия на правом поле). В данном случае расстояние до неё достаточно большое, поэтому на кадрах 14 а и 14 б, на правом поле в крупном масштабе ЗЛотсутствует. По мере продвижения судна к ЗЛ расстояние до ЗЛ уменьшается и ЗЛ входит в правое поле (кадры 14 в и 14 г). Все это говорит о том, что поставленная задача управления выполнена и остаётся только оценить качество её выполнения.

Оценки качества управления швартуемым судном

Существует множество подходов к такой оценке, которые можно найти в литературе, например, [1], [2], [8]. При моделировании движения судна вдоль ЗЛ нами были выбраны различные критерии оценки качества Q. В качестве первого критерия рассматривается потеря скорости хода судна v при изменении его курса ψ , выразим его через интеграл:

$$Q_1 = \int_0^t |v \times \sin(\psi - \beta - \psi_0)| dt \quad (19)$$

Естественно, что при численном моделировании интеграл переходит в суммирование, которое производится по всем точкам траектории маневрирования с дискретностью 1 с:

$$Q_1 = \sum_k |v_k \times \sin(\psi_k - \beta_k - \psi_0)| \quad (20)$$

В выражениях (19), (20) для критерия Q_1 фигурируют ψ – курс судна, ψ_0 – его начальное значение, v , β – линейная скорость и угол дрейфа судна. При этом ψ_0 может быть и переменным, если ЗЛ в процессе подхода к месту швартовки меняет свое положение. По самому смыслу введённого критерия он должен быть тем меньше, чем выше качество управления судном. Такой критерий позволяет сравнивать различные варианты управления, например, изменяя в них пределы $\lim 1$, $\lim 2$ управляющего сигнала для переключения рулевого устройства, или коэффициенты усиления k_F , k_A для отклонений при формировании управляющего сигнала. Однако при этом траектории подхода будут различными, и более протяжённая траектория будет способствовать накоплению суммы вида (20). Поэтому логично отнести качество к одной точке траектории, поделив сумму на число слагаемых. Кроме того, сумму следует нормировать, разделив её на начальную скорость судна v_0 .

Возможен другой критерий, который интересен с практической точки зрения. Это критерий, в который входит отклонение курса судна от некоторого среднего значения (зарыскивание) и угла перекладки руля от нулевого положения в ДП. Вид этого критерия следующий:

$$Q_2 = \sqrt{\sum_k [\psi_k - \psi_0]^2 + \rho \times \alpha_r^2} \quad (21)$$

Здесь критерий представлен сразу в виде суммы, минуя форму интегральную. Эту сумму также следует нормировать. Для этого делим первое слагаемое на квадрат начального курса ψ_0 , а второе – на квадрат модуля предельного положения руля. Так как слагаемые носят квадратичный характер, то из результирующей суммы извлекается в итоге квадратный корень. Естественно здесь, как и в первом критерии, отнести результат к одной точке, для чего сумма делится на число слагаемых. В этом критерии используются сразу две характеристики – зарыскивание и угол перекладки руля, т.е. критерий носит комплексный характер. Поэтому в выражение (21) входит весовой множитель ρ , позволяющий уравновесить эти два показателя. Исходя из требований к зарыскиванию ($\approx 17^\circ - 18^\circ$) и зная порядок предельного значения угла перекладки руля ($\approx 35^\circ$) можно взять этот множитель как $(35/17.5)^2 \approx 0.25$. После введения предложенных критериев можно производить непосредственно моделирование различных вариантов подхода к цели, используя разные управления и сравнивая их эффективность.

Поскольку нами исследуется новый принцип управления по отклонениям, то логично ввести другой критерий, который использует явно параметры, по которым управляется судно. Естественно минимизировать суммарные отклонения носа и кормы судна от ЗЛ, выполнив это в классическом стиле средних квадратических оценок, тогда:

$$Q_3 = \sqrt{\sum_k [d_{Fk}^2 + d_{Ak}^2]} \quad (22)$$

Как и в случае критериев Q_1 и Q_2 результат следует разделить на количество точек суммирования, а также сделать его безразмерным, поделив на характерный размер судна. В качестве его мы взяли половину длины судна между перпендикулярами $0.5 \cdot L_{pp}$.

Критерий Q_3 можно обобщить, включив в него угол перекладки руля от ДП судна. Тогда получим ещё один критерий оценки качества управления:

$$Q_4 = \sqrt{\sum_k [\rho_1 (d_{Fk}^2 + d_{Ak}^2) + \rho_2 \times \alpha_r^2]} \quad (23)$$

В эту оценку входят разнородные показатели, поэтому в неё введены весовые множители ρ_1 и ρ_2 . Мы выбрали их равными: ρ_1 - квадрату половины длины судна $0.5 \cdot L_{pp}$ и ρ_2 - предельному значению угла перекадки руля $\alpha_r \approx 35^\circ$ в радианах. Проведённые модельные испытания показали, что при таких весовых множителях положение руля сказывается на показателе качества незначительно. Поэтому увеличили второй весовой множитель ρ_2 в 57.3^2 раз, переведя второе слагаемое из радиан в градусы. Именно такие оценки мы используем далее для подбора параметров $a_1(k_F)$ и $a_2(k_A)$ в законе формирования управляющего сигнала sig.

Таблица 1

	$a_1 = 1.1$ $a_2 = 0.9$	$a_1 = 1.15$ $a_2 = 0.85$	$a_1 = 1.05$ $a_2 = 0.95$	$a_1 = 1.2$ $a_2 = 0.8$
Q ₁	0,5410	0,5434	0,5323	0,5482
Q ₂	3,7423	3,6322	3,7849	3,3914
Q ₃	6,0841	4,5382	11,2064	4,2424
Q ₄	16,5085	16,15782	18,8714	16,2228
Q ₅	0,5357	0,5413	0,5301	0,5466

Лучшие критериальные показатели в среднем среди четырех оценок мы имеем во втором столбце, он выделен заливкой зелёного цвета.

В связи с этим были выбраны для дальнейшей работы по моделированию управления по отклонениям значения $a_1 = 1.1$ и $a_2 = 0.9$. Естественно, что это предварительные расчёты, в то время как при создании реальных систем управления потребуется более детальная работа по их синтезу.

Приведенным в таблице 1 значениям параметров a_1 и a_2 соответствуют разные траектории маневрирования. Они показаны на рисунке 15 для трёх комбинаций параметров, формирующих сигнал управления.

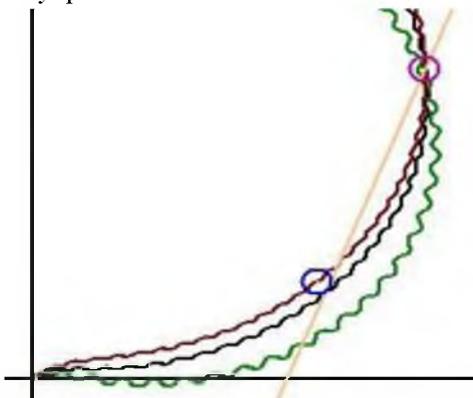


Рисунок 15 – Траектории судна при различных параметрах формирования управляющего сигнала a_1 и a_2 (1.1, 0.9 - чёрная), (1.05, 0.95 - коричневая), (1.2, 0.8 - зелёная)

Чёрная траектория соответствует именно тем значениям a_1 и a_2 , которые мы выбрали как

Наконец, последняя критериальная оценка, которая учитывает только угол перекадки руля α_r

$$Q_5 = \sqrt{\sum_k [\alpha_r^2]} \quad (24)$$

Используя выбранные критерии оценки качества управления, повторим последние испытания, когда система управления работала в наиболее сложных условиях. ЗТ совершала движение по окружности, ЗЛ являлась касательной к этой окружности. Результаты этих испытаний приведены в таблице 1, где показаны значения критериев качества для различных значений коэффициентов a_1 и a_2 формирования управляющего сигнала.

оптимальные. Две другие траектории – зелёная и коричневая соответствуют изменённым значениям параметров. Даже на глаз видно, что качество зелёной траектории хуже – она уходит в сторону и зарыскивания судна вдоль неё существенно больше, что численно подтверждает оценка $Q_2 = 1.2369$.

Выбрав параметры формирования управляющего сигнала sig, нам следует перейти к закону формирования скорости перекадки руля как функции управляющего сигнала

$$v_{cr} = 0 \quad \text{sig} = < \text{lim}1$$

$$v_{cr} = v_{cr \max} \frac{\text{sig} - \text{lim}1}{\text{lim}2 - \text{lim}1} \quad \text{lim}1 < \text{sig} < \text{lim}2$$

$$v_{cr} = v_{cr \max} \quad \text{sig} \geq \text{lim}2$$

Изначально параметры этой стратегии управления выбраны такими: $\text{lim}1 = 3$, $\text{lim}2 = 14$. В данном случае задача заключается в том, чтобы, используя критерии качества управления, исследовать указанные параметры на оптимальность. Они найдены путём подбора, при этом управление оптимизируется с помощью критериев $Q_1 - Q_5$. Процедура этого подбора и её результаты приведены ниже. Фактически, процедура эта – метод градиентного спуска.

Было проведено 7 опытов моделирования работы системы управления на базе предыдущей траектории с изменениями параметров $\text{lim}1$ и $\text{lim}2$. Результаты такого моделирования приводятся в таблице 2.

Таблица 2

lim1	lim2	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Итого
3	14	0,5410	3,7423	6,0841	16,5085	0,53576	59,0443
10	20	0,5404	3,6615	6,2934	16,6871	0,5395	59,3673
2	10	0,5418	3,7785	6,0024	16,4500	0,5346	58,9597
6	10	0,5409	3,7397	6,0674	16,5187	0,5363	59,0033
9	10	0,5406	3,7251	6,1069	16,5599	0,5374	59,0766
20	25	0,5424	3,5885	6,5943	16,8927	0,5429	60,0033
2	3	0,5430	3,7928	5,8970	16,3361	0,5318	58,6410
Вес		8	5	2,5	1	8	

Как всегда, при многокритериальной ситуации выбор оптимального варианта затруднен. Поэтому, не пренебрегая никакой информацией, введём для каждого критерия свой весовой коэффициент, их значения показаны в последней строке таблицы 2. Эти веса выбраны так, чтобы влияния всех критериев на вывод были примерно равны. Умножая каждый критерий на свой вес и суммируя результаты, получим общий критерий, занесённый в крайний правый столбец таблицы 2. Данные последнего столбца таблицы 2 позволили выбрать набор параметров из предпоследней строки таблицы 2 (залита зелёным цветом), а именно: $lim1 = 2$, $lim2 = 3$. Это соответствует очень короткой зоне линейного изменения скорости перекадки руля и короткой зоне нечувствительности. С этими значениями проводились все остальные опыты по моделированию работы системы управления судном по отклонениям.

Важно отметить следующее обстоятельство. При всех вариациях различных параметров, входящих в формирование управляющего сигнала, система никогда не теряла устойчивости, всегда судно следовало вдоль ЗЛ, и даже качественные показатели эффективности управления не претерпевали существенного изменения. Все это говорит о работоспособности предлагаемого принципа управления – управления по отклонениям от выбранной тем или иным способом ЗЛ. Эти позитивные выводы сделаны в отсутствие внешних воздействий, поэтому следует провести ряд отдельных исследований по анализу работы системы управления по отклонениям при действии ветра и волнения.

Выводы

На основании проведённых модельных испытаний с моделью контейнеровоза проекта ARCTICCONTAINERSHIPACS 650 с различными стратегиями управления, можно сделать несколько принципиальных выводов.

Подход судна к объекту швартовки разделен на два этапа с разными способами управления судном.

Этап 1: Движение вдоль переменной задан-

ной линии, которая определяется как линия, проходящая через ЦТ объекта швартовки и имеющая направление её ДП. Управление ведётся по отклонению курса судна от направления этой линии. Управление может быть дополнительно усложнено учётом скорости ухода курса судна от этого направления. Может непосредственно формироваться скорость поворота руля судна, или формироваться управляющий сигнал, влияющий на скорость перекадки руля. Этот закон управления имеет зону нечувствительности и зону насыщения, т.е. является сугубо нелинейным. Скорость судна на этом этапе соответствует скорости среднего хода.

Этап 2: Движение вдоль ЗЛ, которая определяется как линия, параллельная курсу объекта швартовки и удалённая от него на заданное расстояние. Управление происходит при формировании управляющего сигнала по отклонениям носовой и кормовой точек ДП судна от ЗЛ. Скорость на этом этапе уменьшается до скорости швартовки.

На этапах 1 и 2 производилась оценка качества управления, для чего было предложено пять критериев качества управления.

В реальных условиях можно выделить ключевой этап швартовки - подход к борту объекта швартовки. На этом этапе предложенные стратегии управления, использованные на этапах 1 и 2, не работают вследствие фактического движения судна лагом с малой продольной скоростью, когда эффективность руля низка. Поэтому управление судном происходит вручную, следуя каждый раз конкретной обстановке. Автоматизация швартовки на этом этапе возможна, для чего необходима технический комплекс, определяющий расстояния и скорости точек швартовящегося судна от объекта швартовки с индикацией их на мониторе. Пользуясь этими данными можно существенно упростить процесс швартовки. Дальнейшая автоматизация требует дополнительных движителей для большей манёвренности на этом сложном этапе. Например, носовых и кормовых подруливающих устройств, или поворотных колонок на корме танкера. Однако третий этап не входил в задачи данного исследования и потому не рассматривался подробно.

Решена главная задача - показана возможность и эффективность управления судном на двух первых этапах швартовки с помощью отклонений курса от направления на объект швартовки (этап 1) и отклонений двух разнесённых точек танкера от заданной линии (этап 2).

Литература

1. Антомонов, Ю.Г. Расчёт систем, оптимальных по быстродействию/ Ю.Г. Антомонов - Л.: Судостроение, 1964. – С.273.
2. Карасёв, А.В. О критерии оптимального управления курсом судна/А.В. Карасёв, Ю.Л. Лукомский, Е.А. Мусин. //Судостроение.– № 4.– 1967.– С. 36-40.
3. Соболев, Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения/Г.В. Соболев. – Л.: Судостроение, 1976.– С.478.
4. Пат. 2475410 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/00 (2006.01). Способ управления судном при выполнении им швартовной операции к борту судна партнера / Юдин Ю.И., Холичев С.Н., Петров С.О.; заявитель и патентообладатель Мурманский гос. техн. ун-т.- № 2011137696/11; заявл. 13.09.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5. - 7 с.: ил.
5. Пат. 2500572 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/52 (2006.01). Способ определения поперечной гидродинамической силы и ее момента при выполнении сложного маневрирования судна / Юдин Ю.И., Холичев С.Н., Петров С.О.; заявитель и патентообладатель Мурман. госуд. техн. ун-т.- № 2012106685/11; заявл. 22.02.2012; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 34. – 10 с.: ил.
6. Пат. 2501064 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/52 (2006.01). Способ управления траекторией движения судна / Юдин Ю.И., Холичев С.Н., Петров С.О.; заявитель и патентообладатель Мурман. госуд. техн. ун-т.- № 2012108992/11; заявл. 11.03.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34. – 9 с.: ил.
7. Пат. 2509031 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/52 (2006.01). Способ управления судном при выполнении им швартовной операции к борту судна партнера, стоящего на якоре / Юдин Ю.И., Иванов В.В., Холичев С.Н., Петров С.О.; заявитель и патентообладатель Мурман. госуд. техн. ун-т.- № 2012143196/11; заявл. 09.10.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7. – 9 с.: ил.
8. Фельдбаум, А.А. Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования/А.А. Фельдбаум// Автоматика и телемеханика.– 1953.– т. 14.– № 6.– С.712-728.
9. Юдин, Ю.И. Способ управления судном при выполнении им швартовной операции к борту объекта швартовки [Текст]/ Ю.И. Юдин, Б.В. Дабижа, Г.М. Соловьёв, С.О. Петров // Эксплуатация морского транспорта. – 2019. - № 3(92). - С. 84-89.
10. Юдин, Ю.И. Идентификация математической модели контейнера проекта ARCTIC

CONTEINER SHIP ACS 650 для различных этапов швартовки [Текст]/ Ю.И. Юдин, С.В. Пашенцев, Б.В. Дабижа, Г.М. Соловьёв, С.О. Петров // Эксплуатация морского транспорта. - 2019. - № 3(92). - С. 89-107.

Reference

1. Antomonov, YU.G. Raschyot sistem, optimal'nyh po bystrodejstviiu/ YU.G. Antomonov - L.: Sudostroenie, 1964. – S.273.
2. Karasyov, A.V. O kriterii optimal'nogo upravleniya kursom sudna/A.V. Karasyov, YU.L. Lukomskij, E.A. Musin. //Sudostroenie.– № 4.– 1967.– S. 36-40.
3. Sobolev, G.V. Upravlyaemost' korablya i avtomatizaciya sudovozhdeniya/G.V. Sobolev. – L.: Sudostroenie, 1976.– S.478.
4. Pat. 2475410 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/00 (2006.01). Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoj operacii k bortu sudna partnera / YUdin YU.I., Holichev S.N., Petrov S.O.; zayavitel' i patentooblada-tel' Murmanskij gos. tekhn. un-t.- № 2011137696/11; zayavl. 13.09.2011; opubl. 20.02.2013, Byul. № 5. - 7 s.: il.
5. Pat. 2500572 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/52 (2006.01). Sposob opredeleniya pope-rechnoj gidrodinamicheskoj sily i ee momenta pri vypolnenii slozhnogo manevrirovaniya sud-na / YUdin YU.I., Holichev S.N., Petrov S.O.; zayavitel' i patentoobladatel' Murman. gosud. tekhn. un-t.- № 2012106685/11; zayavl. 22.02.2012; opubl. 27.08.2013, Byul. № 34. – 10 s.: il.
6. Pat. 2501064 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/52 (2006.01). Sposob upravleniya traekto-riej dvizheniya sudna / YUdin YU.I., Holichev S.N., Petrov S.O.; zayavitel' i patentooblada-tel' Murman. gosud. tekhn. un-t.- № 2012108992/11; zayavl. 11.03.2012; opubl. 10.12.2013, Byul. № 34. – 9 s.: il.
7. Pat. 2509031 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/52 (2006.01). Sposob upravleniyasudnom pri vypolnenii im shvartovnoj operacii k bortu sudna partnera, stoyashchego na yakore / YUdin YU.I., Ivanov V.V., Holichev S.N., Petrov S.O.; zayavitel' i patentoobladatel' Murman. gosud. tekhn. un-t.- № 2012143196/11; zayavl. 09.10.2012; opubl. 10.03.2014, Byul. № 7. – 9 s.: il.
8. Fel'dbaum, A.A. Optimal'nye processy v si-stemah avtomaticheskogo regulirovaniya/A.A. Fel'dbaum// Avtomatika i telemekhanika.– 1953.– t. 14.– № 6.– S.712-728.
9. YUdin, YU.I. Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoj operacii k bortu ob"ekta shvartovki [Tekst]/ YU.I. YUdin, B.V. Dabizha, G.M. Solov'yov, S.O. Petrov // Eksplu-ataciya morskogo transporta. – 2019. - № 3(92). - S. 84-89.
10. YUdin, YU.I. Identifikaciya matematicheskoy modeli kontejnerovoza proekta ARCTIC CONTEINER SHIP ACS 650 dlya razlichnyh etapov shvartovki [Tekst]/ YU.I. YUdin, S.V. Pashencev, B.V. Dabizha, G.M. Solov'yov, S.O. Petrov // Ekspluataciya morskogo transporta. - 2019. - № 3(92). - S. 89-107.