

Влияние параметров рулевой системы на качество управления авторулевого

Е. Б. Амбросовская^{1,2✉}, М. А. Черный¹, Д. В. Ромаев², В. И. Никольский²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² АО «НАВИС», Санкт-Петербург, Россия

✉ e-ambr@mail.ru

Аннотация. Посвящается вопросу влияния параметров рулевой системы на качество движения судна под управлением авторулевого. Рассматривается упрощенная структура математической модели рулевой машины, позволяющая учесть основные нелинейные эффекты. Моделируется электрогидравлический привод, как наиболее распространенный, другие типы рулевых приводов могут быть описаны аналогичными моделями. Ключевым элементом электрогидравлического привода служит трехходовой гидрораспределитель (далее в тексте клапан), выполняющий переключение направления потоков жидкости. Вне зависимости от физической реализации перенаправления потоков рабочей жидкости (трехходовой клапан, непосредственное управление насосом переменной производительности либо реверсивным насосом) математическое описание процессов движения привода может быть сведено к моделированию трехходового клапана и интегрированию скорости перекладки руля. Рассматривается два случая – дискретное и пропорциональное управление клапанами. Особое внимание уделяется именно случаю дискретного управления с учетом динамики открытия-закрытия клапанов. Приведены результаты моделирования динамики перекладки руля и ее влияния на динамику движения судна под управлением авторулевого. Приведены результаты моделирования движения судна на маневре «зигзаг» (маневр используется для идентификации параметров судна и синтеза регуляторов авторулевого) при различных параметрах рулевой машины и отмечено, что в некоторых случаях это может заметно сказаться на результатах идентификации линеаризованной модели по этому маневру. Приведены результаты моделирования движения под авторулевым при постоянном возмущении, показано, как из-за параметров привода возникают нежелательные колебательные режимы, приводящие к ухудшению качества управления по курсу и угловой скорости, и, как следствие, увеличению расхода топлива и быстрому износу рулевой машины».

Ключевые слова: управление движением, авторулевой, рулевая машина, математическое моделирование, идентификация

Для цитирования: Влияние параметров рулевой системы на качество управления авторулевого / Е. Б. Амбросовская, М. А. Черный, Д. В. Ромаев, В. И. Никольский // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 9. С. 45–55. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-9-45-55.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Effect of Ship Steering System Parameters to Quality of Autopilot Control

E. B. Ambrosovskaya^{1,2✉}, M. A. Cherniy¹, D. V. Romaev², V. I. Nikolskiy²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² JSC «NAVIS», Saint Petersburg, Russia

✉ e-ambr@mail.ru

Abstract. The paper is devoted to study the influence of steering system parameters on the quality of vessel motion under autopilot control. A simplified structure of the mathematical model of the steering machine is

considered, which allows taking into account the main nonlinear effects. An electrohydraulic drive is modeled as the most common one; other types of steering drives can be described by similar models. The key element of the electrohydraulic drive is a three-way hydraulic distributor (hereinafter referred to as the valve) that switches the direction of fluid flows. Regardless of the physical implementation of the redirection of working fluid flows (three-way valve, direct control of a variable-capacity pump, or a reversible pump), the mathematical description of the drive motion processes can be reduced to modeling a three-way valve and integrating the rudder shift speed. Two cases are considered: discrete and proportional valve control. Particular attention is paid to the case of discrete control, taking into account the dynamics of opening and closing of the valves. The results of modeling the dynamics of rudder shifting and its influence on the dynamics of vessel motion under autopilot control are presented. The paper presents the results of modeling the vessel's motion during the zig-zag maneuver (the maneuver is used to identify the vessel's parameters and synthesize the autopilot controllers) with different parameters of the steering gear, and notes that in some cases this can significantly affect the results of identifying the linearized model for this maneuver. The paper presents the results of modeling the motion under the autopilot with constant disturbance, and shows how, due to the drive parameters, undesirable oscillatory modes arise, leading to deterioration in the quality of heading control, and, as a consequence, to an increase in fuel consumption and rapid wearout of the steering gear.

Keywords: vessel motion control, autopilots, steering systems, motion simulation, identification

For citation: Effect of Ship Steering System Parameters to Quality of Autopilot Control / E. B. Ambrosovskaya, M. A. Cherniy, D. V. Romaev, V. I. Nikolskiy // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 9. P. 45–55. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-9-45-55.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Одной из основных задач управления судном является удержание его на заданном курсе. Для этого судно оборудовано соответствующими средствами управления – рулями, винторулевыми колонками (ВРК), водометными, крыльчатými движителями и т. п. Для оценки качества управления по курсу можно свести (в достаточном приближении) управление всеми типами средств управления к оценке управления «классическим» рулем, т. е. устройством, создающим желаемый вращающий момент при создании некоторого управляющего воздействия («поворота руля»¹).

Система управления курсом судна включает в себя следующее:

- руль (один или несколько);
- привод руля (далее по тексту рулевая машина – РМ);
- подсистемы управления и автоматизации;
- систему индикации положения руля.

Рассмотрим режимы управления судном по курсу: «Простое» (неследящее, NFU) управление

рулем (судоводитель напрямую управляет рулем²), «следящее» (FFU) заданный угол перекадки руля отрабатывается автоматически; «автоматическое» – судоводитель задает курс (и угловую скорость в поворотах), которые отрабатываются автоматической системой (авторулевой).

К рулевому управлению и его автоматизации предъявляются международные (IMO, SOLAS) и локальные (Регистр) требования классификационных обществ. Требования к РМ содержатся в разделе «Механизмы» [1], вопросы управления (в том числе компьютеризированного) – в разделе «Автоматизация» [2], а вопросы автоматического управления курсом – в разделе «Навигационное оборудование» [3].

К сожалению, такой разрыв в требованиях классификации приводит к утере взаимосвязи между изготовителями РМ и авторулевого еще на этапе проектирования судна. В результате изготовители РМ и проектанты судна зачастую выбирают решения, неоптимальные с точки зрения качества управления судном по курсу. Так, например, вместо выбора, где это уместно, РМ с пропорциональным управлением используют РМ с дискретным ввиду его относительной простоты и

¹ На руле при наличии потока (вызванного гребным винтом или собственным ходом судна) при повороте руля (перекадке) возникает боковая сила, которая и создает момент рыскания. ВРК представляет собой поворотный винт и может разворачивать тягу, создавая момент рыскания в зависимости от угла поворота. Водометный движитель обладает направляющей насадкой либо механизмом разворота сопла, также разворачивающим создаваемую силу и создающее момент при соответствующем управлении. Крыльчатый движитель позволяет создавать чистый момент за счет разворота лопастей.

² Данный вид управления обязателен к установке, но в основном используется как аварийный ввиду повышенной нагрузки на оператора (хотя до сих пор встречаются достаточно крупные суда, на которых данный режим единственный).

дешевизны. При этом не учитываются такие сопутствующие негативные эффекты, как повышенный расход топлива, вызванный увеличением рыскания судна, и ускоренный износ РМ.

Отметим еще одну особенность наименования подсистем. Зачастую в зарубежной практике под термином «Autopilot» понимаются все дистанционные системы управления рулем, при этом необязательно наличие автоматического режима удержания курса. Также под данным термином могут пониматься интегрированные в одном блоке подсистемы «Простого», «Следящего», «Автоматического» управления курсом и «Независимой индикации положения руля».

Примером такого интегрированного устройства в советском и российском судостроении служит авторулевой АИСТ [4].

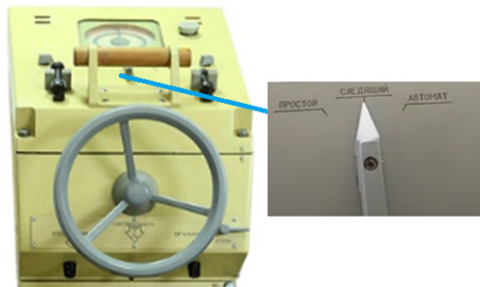


Рис. 1. Авторулевой АИСТ
 Fig. 1. Autopilot AIST

В литературе также встречается термин «штурвально-рулевая система» (ШРС), которая как раз и объединяет управление рулевой машиной в разных режимах.

Здесь же под термином «авторулевой» будет рассматриваться исключительно подсистема автоматического управления курсом судна, удовлетворяющая резолюциям ИМО (А.342, А.861) [5] и требованиям Регистра.

Авторулевой обязателен к применению на судах валовой вместимостью более 10 000 регистровых тонн [6], тем не менее широко применяется и на других судах начиная от маломерных, поскольку за счет уменьшения нагрузки на судоводителя повышает безопасность судовождения, позволяет сократить экипаж, сократить расход топлива за счет оптимизации управления по курсу (уменьшения рыскания) судна по сравнению с ручным управлением.

На рис. 2 приведен обзор рынка таких систем [7].

Поскольку выходным воздействием авторулевого служит заданный угол руля, рассмотрим влияние качества управления приводом «локальной» системы управления рулем на качество управления курсом судна.

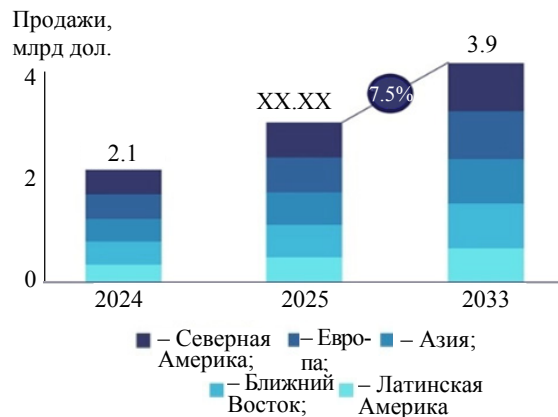


Рис. 2. Рост рынка авторулевых в мире
 Fig. 2. Marine autopilot systems market size

Для этого рассмотрим и обобщим типы приводов и их законы управления.

По типу привода следует выделить следующие основные типы: механический, электрический, электрогидравлический.

Электрогидравлический привод, как наиболее эффективный по многим критериям наиболее часто применяется в настоящее время на широком классе судов от маломерных до крупных. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться только он.

Следует упомянуть, что в качестве непосредственного привода пера руля используются различные типы механизмов, такие как поршневые/плунжерные, роторные, секторные, реечные [4]. Все эти конструкции имеют как преимущества, так и недостатки и в разной степени влияют на отработку скорости и положения руля, но при анализе учет этих эффектов сводится к небольшому изменению коэффициентов модели электрогидропривода. Выбор типа привода и механизма с учетом требований Регистра остается за проектантом судна.

Минимальные обязательные требования к рулевому приводу – требования [1] на время перекадки руля (т. е. достаточной мощности РМ). Так, время перекадки руля на угол с 35° одного борта до 30° другого не должно превышать 28 с при работе одного насосного агрегата, и с 35° одного борта до 30° другого – 14 с при работе двух насосных агрегатов одновременно [1]. Таким образом нормируется минимальная *средняя* скорость перекадки руля от 2.3 до 4.6 %/с.

В большинстве исследований, связанных с управлением движением судна, учитываются, как правило, только данные параметры, а переходные процессы в приводе, его динамика и точность отработки остаются за скобками.

Этот подход, как показывает производственная практика, в 95–98 % случаев дает хотя и не оптимальные в отношении качества управления и связанной с этим экономии топлива и ресурса приводов результаты, но позволяет удовлетворить минимальные требования стандартов к качеству управления судном по курсу.

Однако в рассматриваемых далее 3–5 % случаев устранение ошибок проектирования РМ требует временных и материальных затрат, сопоставимых с затратами на 20–30 % штатных пусконаладок, что в итоге оборачивается затратами судовладельца, заметно превышающими экономию на хороших инженерных решениях при проектировании судна.

Авторы долгое время работают в области разработки систем управления движением (В. И. Никольский – авторулевой и рулевые системы, Е. Б. Амбросовская и Д. В. Ромаев – система динамического позиционирования и авторулевой АО «НАВИС»), что определило интерес к теме статьи, была поставлена задача и М. А. Черный выполнил вычисления в ходе работы над ВКР бакалавра в СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Был проведен анализ большого количества публикаций, посвященных управлению курсом судна, в большинстве которых влиянием РМ пренебрегают, а в некоторых [8] предпринимаются попытки задать требования к современному рулевому приводу, но без глубокого анализа. Увы, достаточно поздно (по завершении исследования) авторами была найдена не очень известная в отечественной литературе публикация [9], нацеленная на анализ влияния рулевой машины на экономию топлива при движении под управлением авторулевого. В настоящей статье авторы, анализируя 30-летнюю производственную практику АО «НАВИС», независимо от [9] пришли к похожим моделям и выводам, что подтверждает правильность подхода к данному вопросу.

Математическая модель рулевой системы. Рассмотрим рулевой привод как замкнутую следящую систему. Под термином «управление ру-

лем» будем понимать также и управление ВРК, соплом водометных движителей и т. д. Анализируя влияние динамики движения руля под воздействием совокупности сил различной природы (электромагнитных, сил трения, гидродинамических и т. д.) могут быть построены модели различной степени детализации [8]–[10].

При этом динамика перемещения руля описывается дифференциальным уравнением поворота баллера:

$$J_R \ddot{\delta} = M_e(u, \delta) - M_b(v_R, \delta), \quad (1)$$

где M_e – крутящий момент от рулевой машины; u – управляющий сигнал; δ – угол перекадки руля; M_b – момент на баллере; J_R – приведенный к оси баллера момент инерции; v_R – скорость натекания жидкости на перо руля. Если привод спроектирован правильно, то он реализует заданную скорость перекадки, при этом в уравнении (1) моменты уравновешиваются $M_e = M_b$, скорость перекадки $\dot{\delta}$ постоянна.

Для анализа влияния параметров РМ на движение судна сведем ее математическую модель к интегратору, апериодическому звену и нелинейностям типа «зона нечувствительности/гистерезис/насыщение», как это показано на рис. 3, где обозначены: δ^* – заданное значение угла перекадки руля; ε – ошибка слежения; v^* – управляющий сигнал; $v_{\max}$ – максимальная скорость перекадки руля; $\delta_{\max}$ – максимальное значение угла перекадки руля; ΔL – значение зоны насыщения; τ – постоянная времени клапана; s – оператор Лапласа.

В этой статье мы полагаем, что, независимо от реализации (аналоговая/цифровая) обратной связи и сумматора, задержки в них малы по сравнению с постоянными времени привода и не оказывают существенного влияния на качество регулирования.

Возможны два исполнения рулевой машины: с постоянной и с регулируемой скоростью перекадки.

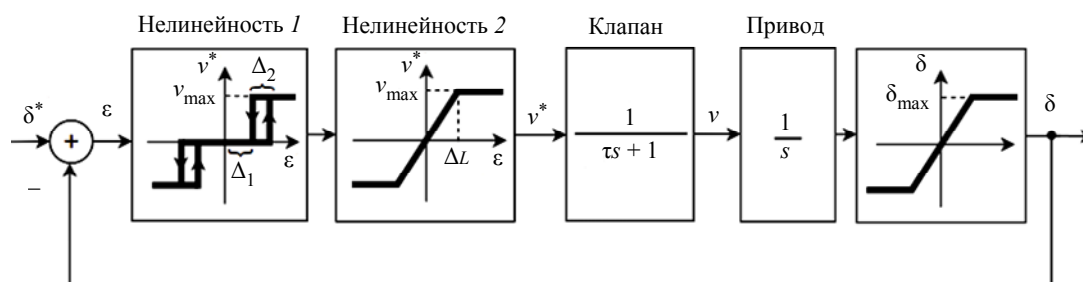


Рис. 3. Следящий рулевой привод
Fig. 3. Steering control system

В первом случае реализуется *дискретное* (bang/bang) управление клапаном двумя сигналами – открыть клапан в каждую сторону. При этом скорость перекладки руля будет либо максимальной, либо нулевой.

Мощность управляющего воздействия (сигнал соленоида) выбирается так, чтобы при открытии все внутренние силы в клапане были скомпенсированы, таким образом, скорость открытия определяется только сигналом управления.

Заккрытие клапана при выключении обоих сигналов управления происходит под действием сил внутри клапана (в типичном случае – электромагнитных сил в соленоиде, сжатой пружины, сил трения, гидродинамических сил).

Динамика закрытия определяется его конструкцией и заметно влияет на поведение РМ. Эффекты и способы их компенсации показаны далее.

Во втором случае применяются *пропорциональные* клапаны, скорость перекладки пропорциональна управляющему сигналу u в линейной зоне и максимальна в зоне насыщения. Управляющий сигнал формируется таким образом, чтобы «внутренние» силы клапана были скомпенсированы и во время его открытия, и во время закрытия, тогда динамика движения клапана определяется только изменением сигнала u .

Положение руля δ ограничено механически (как правило, $35...45^\circ$, при применении рулей высокоподъемной силы до $60...65^\circ$).

Зона нечувствительности РМ, обозначенная как Δ_1 , обусловлена ее физической природой – силами трения, зазорами в механизмах, сжимаемостью рабочей жидкости и т. д. Она присутствует в любых механических системах и является их неотъемлемым свойством. Эта величина при выключении обоих сигналов управления определяет

максимальную теоретически достижимую точность отработки заданного положения руля.

Зона нечувствительности Δ_2 определяется в основном динамикой клапана (наиболее критично время его закрытия) и искусственно вводится в следящую систему для придания ей устойчивости.

В итоге точность отработки ограничена значениями $\Delta_1 + \Delta_2$, приведенными к положению руля в градусах.

Поскольку Δ_1 должна быть значительно меньше Δ_2 (иначе следует полагать привод неисправным), то далее под зоной нечувствительности будем понимать Δ_2 . Влияние данного параметра на качество управления курсом детально показано далее.

Отметим, что при использовании пропорционального управления Δ_1 скомпенсирована с помощью изменения формы управляющего сигнала u (рис. 4).

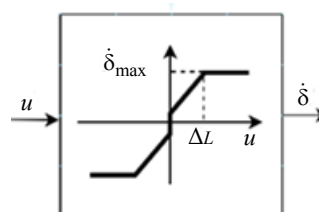


Рис. 4. Компенсация зоны нечувствительности при пропорциональном управлении
Fig. 4. Deadband compensation for proportional control

В результате модели систем с дискретным и пропорциональным управлением можно представить структурными схемами на рис. 5, 6.

Динамика РМ описывается в общем случае уравнениями высоких порядков [10], но, соглашаясь с авторами упомянутой статьи, используем

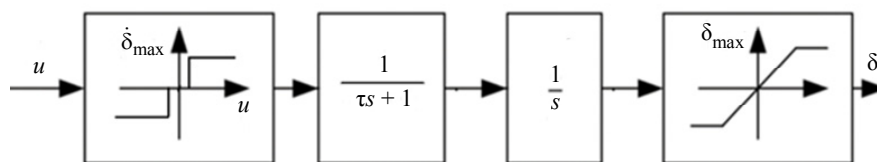


Рис. 5. РМ с дискретным управлением
Fig. 5. Steering system with bang-bang control

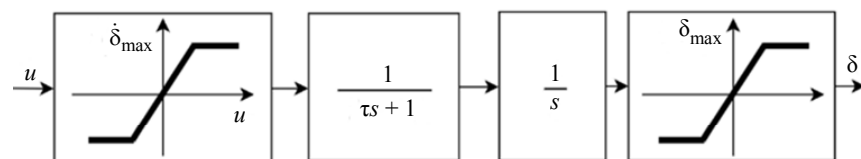


Рис. 6. РМ с пропорциональным управлением
Fig. 6. Steering system with proportional control

аппроксимацию апериодическим звеном первого порядка как модель, которая качественно и с достаточной точностью воспроизводит эффект влияния времени открытия/закрытия клапана на скорость и положение руля – рис. 7.

Рассмотрим факторы, влияющие на время закрытия клапана при дискретном управлении.

При перекрытии потока рабочей жидкости клапаном в гидросистеме происходит повышение давления $p \sim dQ/dt$, (где p – давление; Q – расход жидкости), что приводит к так называемому гидроудару³ – в результате чего увеличиваются механические нагрузки в приводе и происходит нежелательный нагрев клапана и рабочей жидкости.

На практике типовое время открытия/закрытия клапана 3τ составляет порядка 0.1 с. Однако иногда во избежание вышеупомянутого гидроудара конструкторы РМ применяют клапан с демпфированием, увеличивая время его закрытия до 0.5 с. Данное решение вместо применения пропорционального управления, в основном, обусловливается сиюминутными экономическими соображениями и не учитывает дальнейших последствий.

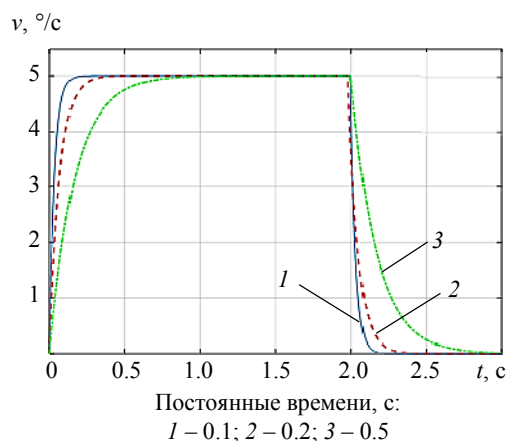


Рис. 7. Процесс работы клапана (модель 1-го порядка)
Fig. 7. The valve movement process (first-order model)

Рассмотрим влияние времени срабатывания клапана (дискретное управление). На рис. 8 показаны процессы, соответствующие различному времени срабатывания дискретных клапанов (от мгновенного $3\tau = 0$ до $3\tau = 0.5$ с), максимальная скорость перекадки руля $5^\circ/\text{с}$.

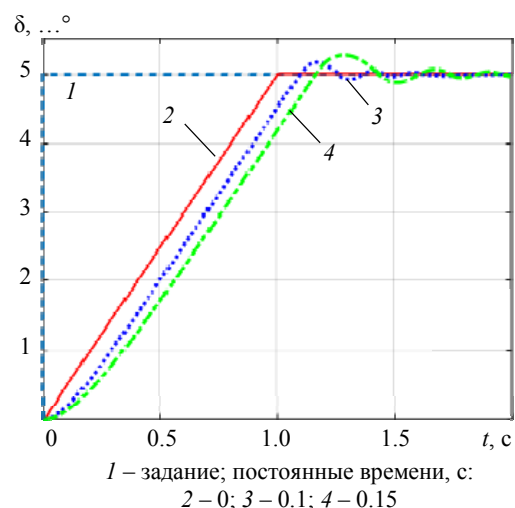


Рис. 8. Перекадка руля на 5° , дискретное управление, различная скорость работы клапана

Fig. 8. Rudder position change by 5° , bang-bang control, different valve operating speeds

Видно, что при увеличении времени закрытия клапана в замкнутой системе происходит колебательный процесс, который устраняют введением зоны нечувствительности Δ_2 . Ее значение выбирается таким образом, чтобы обеспечить устойчивость замкнутой системы и достаточную точность отработки заданного положения (рис. 9).

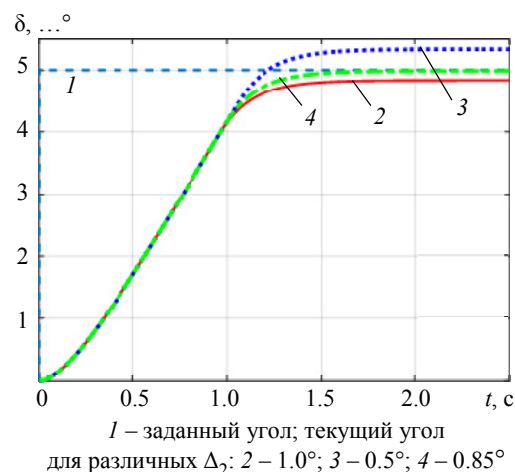


Рис. 9. Перекадка руля на 5° , дискретное управление, клапан $3\tau = 0.5$, различные значения Δ_2

Fig. 9. Rudder position change by 5° , bang-bang control, $3\tau = 0.5$, different values Δ_2

³ Полностью явление гидроудара описывается более сложными уравнениями [Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М., Л.: Гос. изд.-во Технико-теоретической лит.-ры, 1949. 108 с.]. Но, поскольку здесь главная мысль – показать влияние времени перекрытия потока, при том, что в случае дискретного управления используются насосы постоянной производительности с $Q = \text{const}$, уместно упрощение $p \sim dQ/dt$.

Эта вынужденная мера приводит к дискретизации отработки положения руля при линейном задании (рис. 10), что негативно сказывается на качестве управления курсом. Влияние данного эффекта будет рассмотрено в п. «Движение судна под авторулевым».

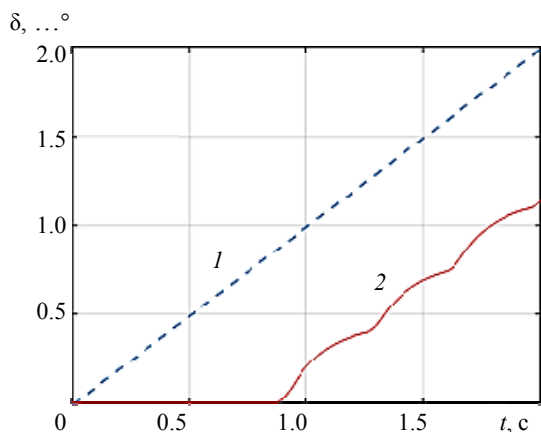


Рис. 10. Перекладка руля: 1 – при линейном задании; 2 – при дискретном управлении, клапан $3\tau = 0.5$, $\Delta_2 = 0.85^\circ$

Fig. 10. Rudder position in response: 1 – to a linear command input; 2 – discrete control, $3\tau = 0.5$, $\Delta_2 = 0.85^\circ$

Пропорциональные клапаны обеспечивают более высокую точность перекладки (рис. 11). Основным параметром управления служит выбор линейной зоны Δ_L . Типичные значения $2...6^\circ$ рассогласования заданного и текущего положения руля (зависят от мощности РМ, максимальной конструктивной скорости перекладки, типа привода).

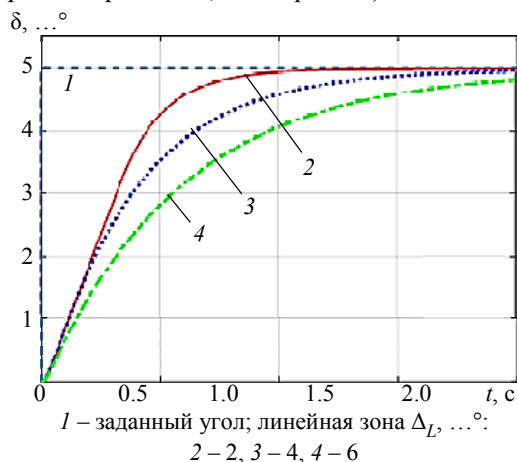


Рис. 11. Перекладка руля на 5° , пропорциональное управление, различные значения линейной зоны Δ_L
 Fig. 11. Rudder position change by 5° , proportional control, different values Δ_L

Рассмотрим влияние, которое указанные особенности оказывают на динамику судна по курсу.

Алгоритмы авторулевого. Авторулевой как автоматическая подсистема служит для вывода судна на заданный курс и удержания его, а также для управления движением по маршруту на таких скоростях, где руль обеспечивает необходимую эффективность.

Алгоритмы авторулевого в общем случае нелинейные. Они могут быть робастными к возмущению, адаптивными, основанными на нечеткой логике, с использованием нейросетей [11], [12], но в целом представляют собой нелинейную динамическую систему управления рулевым приводом с обратной связью по углу курса.

На рис. 12 показана структурная схема управления судном по курсу в режиме авторулевого. Здесь в объект управления входит как динамика судна, так и динамика РМ (блоки 1 и 2).

При малых изменениях курса ϵ_ϕ относительно заданного ϕ^* (и в режиме градусных поправок $5...10^\circ$) авторулевой можно рассматривать как линейную следящую систему. Поэтому рассмотрим авторулевой как ПИД-регулятор и проанализируем влияние параметров привода на качество управления на этом примере.

Математическая модель рыскания судна.

Для исследования влияния параметров РМ на динамику рыскания используется модель Номото 1-го порядка [13], [14]

$$T_1 \dot{\omega} + \omega = K_\omega \delta, \quad \dot{\phi} = \omega, \quad (2)$$

где T_1 и K_ω характеризуют динамику рыскания и эффективность руля; ω – угловая скорость судна; ϕ – курс судна.

Данная модель (2) удовлетворительно описывает динамику различных классов судов и широко применяется для синтеза закона управления авторулевого. Параметры T_1 и K_ω идентифицируются в процессе настройки авторулевого. Одним из маневров для идентификации этих параметров служит маневр «зигзаг» [15]. Процедуры автонастройки авторулевого по маневру «зигзаг» реализованы во многих авторулевых, в частности в авторулевом AP5000 (АО «Навис») [16].

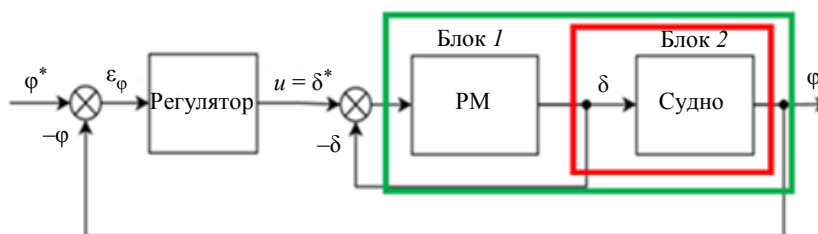


Рис. 12. Управление судном по курсу
 Fig. 12. Ship heading control

Маневр выполняется автоматически – судно в это время находится под управлением авторулевого. В процессе маневра накапливаются следующие данные: текущее положение руля, угловая скорость судна, линейная скорость судна и др.

Параметры судов
Ship parameters

Тип судна	K_{ω} , с^{-1}	T_1 , с	Длина, м	Скорость хода max, уз.
Сухогруз	0.069	44	95	12
Парусная яхта	0.250	30	50	20

Для демонстрации эффектов влияния привода на идентификацию параметров модели и качество управления авторулевого были выбраны два характерных примера (см. таблицу).

Исследование влияния параметров рулевой машины на движение при маневре «зигзаг». Маневр «зигзаг» [5] – это последовательность входов в циркуляцию, он не вводит судно в глубокое маневрирование и служит хорошим выбором при идентификации линейной динамики судна; некоторые особенности идентификации по зигзагу рассматривались в [15].

Динамика РМ оказывает существенное влияние на движение судна в маневре «зигзаг» – изменяются период и амплитуда зигзага (рис. 13, результаты моделирования). Кривая 1 соответствует клапанам без задержки, $3\tau = 0$; кривая 2 –

демпфированным клапанам, $3\tau = 0.5$; кривая 3 – заданный угол перекладки руля.

Авторулевой зачастую не получает от СУ РМ фактическое положение руля от датчика обратной связи. Тогда идентификация параметров судна, (например, методом наименьших квадратов) проводится по заданному значению угла. В этом случае, для наиболее точного определения параметров судна необходимо дополнительно идентифицировать параметры рулевой машины (см. рис. 12 блок 1), иначе ошибка идентификации будет существенна.

Движение судна под авторулевым. При движении судна в режиме удержания постоянного курса или небольших градусных поправок задача авторулевого – сформировать управляющее воздействие $\delta^*(t)$ на руль так, чтобы обеспечить удержание заданного курса $\varphi^*(t)$, и мы рассматриваем ПИД-закон управления рулем:

$$\delta^*(t) = k_p \Delta\varphi(t) + k_i \int_0^t \Delta\varphi(t) dt + k_d \frac{d\Delta\varphi(t)}{dt}, \quad (3)$$

где $\Delta\varphi(t) = \varphi^*(t) - \varphi(t)$ – отклонение курса судна от заданного; k_p – коэффициент при пропорциональной составляющей; k_i – коэффициент при интегральной составляющей; k_d – коэффициент при дифференциальной составляющей.

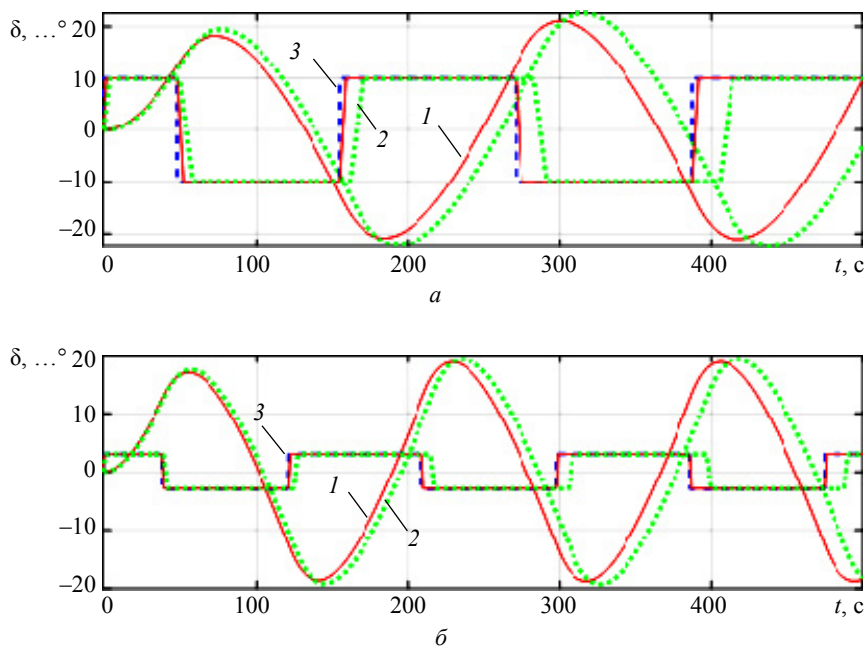


Рис. 13. Влияние параметров рулевой машины на рыскание (маневр «зигзаг», а – сухогруз, б – парусная яхта)

Fig. 13. Influence of steering gear parameters on yawing (zigzag maneuver, a – cargo ship, б – sailing yacht)

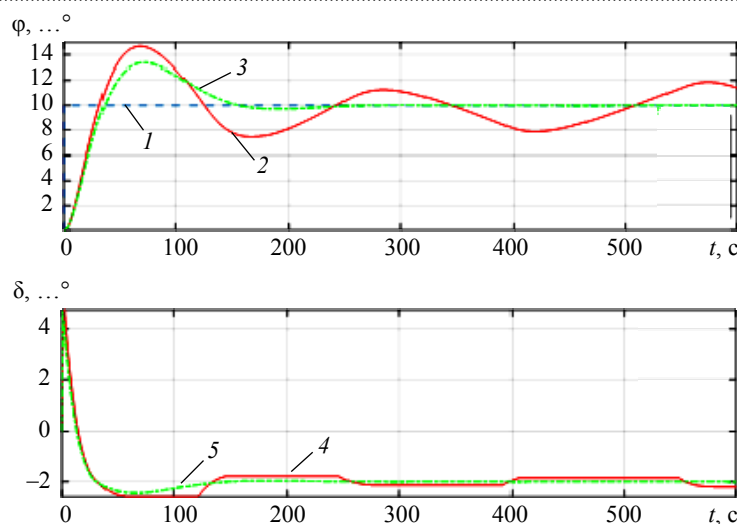


Рис. 14. Движение под авторулевым, постоянное возмущение
 Fig. 14. Autopilot-controlled motion under constant disturbance

При этом основной нелинейный фактор – ограничение на угол перекладки руля:

$$|\delta| \leq \delta_{\max}.$$

Рассмотрим влияние параметров управления рулем на качество удержания курса при отсутствии внешних возмущений. В этом случае движение судна описывается системой уравнений с регулятором (3)

$$\begin{cases} T_1 \dot{\omega} + \omega = K_{\omega} \delta + f, \\ \dot{\phi} = \omega, \end{cases}$$

где f – внешнее возмущение.

В качестве примера рассматриваем парусную яхту, данные приведены в таблице. Для такого соотношения параметров будут хорошо заметны эффекты нелинейностей (зон нечувствительности) в РМ.

На рис. 14 показано, как ведет себя «идеальная» (кривые 3 и 5) РМ без зоны нечувствительности и реальная (кривые 2 и 4) РМ с дискретным клапаном: $3\tau = 0.5$; $\Delta_2 = 0.85$. Видно, что в этом случае (кривая 2), система перестает удовлетво-

рять требованиям по точности удержания курса. Колебания по курсу и увеличение числа переключений руля, приводит к повышенному расходу топлива и быстрому износу РМ.

Закключение. Исследование выявило существенное влияние динамики РМ на качество управления курсом судна. Предложена математическая модель, позволяющая проанализировать это влияние.

На предложенной математической модели показан характерный пример работы замкнутой системы для случая плохого проектирования РМ (без учета ее влияния на управление курсом).

Показано преимущество пропорционального управления перед дискретными.

Авторы полагают целесообразным дополнить учебный курс «Системы управления морскими подвижными объектами» разделом, детально рассматривающим эффекты, проанализированные в данной статье. Регистру будет предложено дополнить требования к РМ «Механизмы» [1], «Автоматизация» [2] с учетом взаимосвязи влияния РМ на управление курсом «Навигационное оборудование» [3].

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. IX. «Механизмы». СПб., 2021. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=3D2A6A38-33B4-4F7D-B061-61C500BA9E76&f=2-020201-0204-9> (дата обращения: 14.06.2025).
2. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XV. «Автоматизация». СПб., 2021. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=7BFB573B-2455-4F4A-A169-56E8243685F8&f=2-020101-174-15> (дата обращения: 14.06.2025).
3. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. V «Навигационное оборудование». СПб.,

2021. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=48C4DFA0-0871-44F8-8659-86B02657EA02&f=2-020101-171-5> (дата обращения: 14.06.2025).
4. Березин С. Я., Тетюев Б. А. Системы автоматического управления движением судна по курсу. Л.: Судостроение, 1990. 256 с.
5. IMO сайт. Резолюции A.342, A.861, A.601. URL: <https://wwwcdn.imo.org/> (дата обращения: 14.06.2025).
6. SOLAS chapter V regulation 19 Международные правила безопасности навигации. URL: <https://www.iomshipregistry.com/media/1866/sd2018-0187-merchan>

tshipping-solaschapterv-safetyofnavigation-regulations-2018.pdf (дата обращения: 14.06.2025).

7. Verified Market Reports. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/marine-autopilot-systems-market/> (дата обращения 14.06.2025).

8. Analysis of steering gear under the requirements of modern navigation / G. Samoilescu, D. Iorgulescu, R. Mitrea, L. Cizer // Intern. conf. KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION. 2018. Vol. 24, no. 3. P. 70–77. doi: 10.1515/kbo-2018-0139.

9. The impact of analog and bang-bang steering gear control on ship's fuel economy / J. C. Nørtoft Thomsen, M. Blanke, R. E. Reid, M. Youhanaie // 4th Intern. Symp. on Ship Operation Automation (ISSOA-82). Genova, Italy, 1982. P. 51–63.

10. Tchakala Kh., Jianjun Y., Racheal S. Numerical design of electro-hydraulic servo system for a ship rudder using PID-FLQR controller // Intern. J. of Engin. Sci. Inv. (IJESI). 2022. Vol. 10, no. 12. P. 7–17. doi: 10.7-17.10.35629/6734-1012010717.

11. Синтез робастного авторулевого по критерию степени устойчивости / А. А. Дыда, П. А. Дыда, Е. Б. Осокина, Д. А. Оськин // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3–2(37). С. 151–155.

12. Дыда А. А., Нгуен Ван Тхань, Оськин Д. А. Система управления курсом судна с компенсацией действия внешних возмущений на работу рулевой машины // Вестн. Астраханского ГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2021. № 4. С. 34–42. doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-34-42.

13. On the Steering Quality of Ships / K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, S. Hirano // Intern. Shipbuilding Progress. 1957. Vol. 4, no. 35. P. 354–370. doi: 10.3233/isp-1957-43504.

14. Амбросовская Е. Б. Упрощенные математические модели для судовых систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3–1(65). С. 156–165.

15. Вакуленко А. В., Амбросовская Е. Б. Особенности проведения калибровочных маневров для идентификации параметров модели авторулевого // Мат. междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт России: проблемы и перспективы». Т. 2. СПб.: Ин-т проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2022. С. 199–203.

16. АО «НАВИС». Авторулевой AP5000. URL: <https://navis.spb.ru/katalog/avtorulevoj-ap5000/> (дата обращения: 14.06.2025).

Информация об авторах

Амбросовская Елена Борисовна – канд. техн. наук, доцент кафедры корабельных систем управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; ведущий специалист по разработке программно-аппаратных комплексов АО «НАВИС», 22-я линия В. О., д. 3, корп. 5, лит. Е, Санкт-Петербург, 199106, Россия.
E-mail: e-ambr@mail.ru

Черный Максим Андреевич – студент гр. 1494 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: maxch367@gmail.com

Ромаев Дмитрий Владимирович – ведущий инженер-исследователь АО «НАВИС», 22-я линия В. О., д. 3, корп. 5, лит. Е, Санкт-Петербург, 199106, Россия.
E-mail: d.romaev@navis.spb.ru

Никольский Вадим Игоревич – ведущий инженер-алгоритмист АО «НАВИС», 22-я линия В. О., д. 3, корп. 5, лит. Е, Санкт-Петербург, 199106, Россия.
E-mail: v.nikolsky@navis.spb.ru

Вклад авторов:

Амбросовская Е. Б. – литературный обзор, структуры математических моделей, графический материал, проверка результатов.

Черный М. А. – вычисления, графический материал.

Ромаев Д. В. – методология исследования, проверка результатов.

Никольский В. И. – общее руководство, введение и заключение.

References

1. Pravila klasifikacij i postrojki morskih sudov. Ch. IX. «Mehanizmy». SPb., 2021. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument?type=rules3&d=3D2A6A38-33B4-4F7D-B061-61C500BA9E76&f=2-020201-0204-9> (data obrashhenija: 14.06.2025). (In Russ.).

2. Pravila klasifikacij i postrojki morskih sudov. Ch. XV. «Avtomatizacija». SPb, 2021. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument?type=rules3&d=7BFB573B-2455-4F4A-A169-56E8243685F8&f=2-020101-174-15> (data obrashhenija 14.06.2025). (In Russ.).

3. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Ch. V «Navigacionnoe oborudovanie». SPb. 2021. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rule&s3&d=48C4DFA0-0871-44F8-8659-86B02657EA02&f=2-02101-171-5> (data obrashhenija: 14.06.2025). (In Russ.).
4. Berezin S. Ja., Tetjuev B. A. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija dvizheniem sudna po kursu. L.: Sudostroenie, 1990. 256 s. (In Russ.).
5. IMO sajt. Rezolucii A.342, A.861, A.601. URL: <https://wwwcdn.imo.org/> (data obrashhenija: 14.06.2025). (In Russ.).
6. SOLAS chapter V regulation 19 Mezhdunarodnye pravila bezopasnosti navigacii. URL: <https://www.iomshipregistry.com/media/1866/sd2018-0187-merchantshipping-solaschapterv-safetyofnavigation-regulations-2018.pdf> (data obrashhenija 14.06.2025).
7. Verified Market Reports. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/marine-autopilot-systems-market/> (data obrashhenija: 14.06.2025).
8. Analysis of steering gear under the requirements of modern navigation / G. Samoilescu, D. Iorgulescu, R. Mitrea, L. Cizer // Intern. conf. KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION. 2018. Vol. 24, no. 3. P. 70–77. doi: 10.1515/kbo-2018-0139.
9. The impact of analog and bang-bang steering gear control on ship's fuel economy / J. C. Nørtoft Thomsen, M. Blanke, R. E. Reid, M. Youhanaie // 4th Intern. Symp. on Ship Operation Automation (ISSOA-82). Genova, Italy, 1982. P. 51–63.
10. Tchakala Kh., Jianjun Y., Racheal S. Numerical Design of electro-hydraulic servo system for a ship rudder using PID-FLQR controller // Intern. J. of Engin. Sci. Inv. (IJESI). 2022. Vol. 10, no. 12. P. 7–17. doi: 10.7-17.10.35629/6734-1012010717.
11. Sintez robustnogo avtorulevogo po kriteriju stepeni ustojchivosti / A. A. Dyda, P. A. Dyda, E. B. Osokina, D. A. Os'kin // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2017. № 3–2(37). S. 151–155. (In Russ.).
12. Dyda A. A., Nguen Van Than', Os'kin D. A. Sistema upravlenija kursom sudna s kompensaciej dejstvija vneshnih vozmushhenij na rabotu rulevoj mashiny // Vestn. Astrahanskogo GTU. Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. 2021. № 4. S. 34–42. doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-34-42. (In Russ.).
13. On the Steering Quality of Ships / K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, S. Hirano // Intern. Shipbuilding Progress. 1957. Vol. 4, no. 35. P. 354–370. doi: 10.3233/isp-1957-43504.
14. Ambrosovskaja E. B. Uproshhennye matematicheskie modeli dlja sudovyh sistem upravlenija dvizheniem // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2024. № 3–1(65). S. 156–165. (In Russ.).
15. Vakulenko A. V., Ambrosovskaja E. B. Osobennosti provedenija kalibrovocnyh manevrov dlja identifikacii parametrov modeli avtorulevogo // Mat. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Transport Rossii: problemy i perspektivy». T. 2. SPb.: In-t problem transporta im. N. S. Solomenko RAN, 2022. S. 199–203. (In Russ.).
16. AO «NAVIS». Avtorulevoj AP5000. URL: <https://navis.spb.ru/katalog/avtorulevoj-ap5000/> (data obrashhenija 14.06.2025). (In Russ.).

Information about the authors

Elena B. Ambrosovskaya – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Ship Control Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University; Leading Specialist, Development of Software and Hardware Complexes, JSC «NAVIS», 22nd line, V. O., 3, build. 5, lit. E, Saint Petersburg, 199106, Russia.
E-mail: e-ambr@mail.ru

Maksim A. Cherniy – student of gr. 1494, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: maxch367@gmail.com

Dmitriy V. Romaev – Leading research engineer, JSC «NAVIS», 22nd line, V. O., 3, build. 5, lit. E, Saint Petersburg, 199106, Russia.
E-mail: d.romaev@navis.spb.ru

Vadim I. Nikolsky – Leading algorithmic engineer, JSC «NAVIS», 22nd line, V. O., 3, build. 5, lit. E, Saint Petersburg, 199106, Russia.
E-mail: v.nikolsky@navis.spb.ru

Author contribution statement:

Ambrosovskaya E. B. – literary review, structures of mathematical models, graphic material, verification of results.

Cherniy M. A. – calculations, graphic material.

Romaev D. V. – research methodology, verification of results.

Nikolsky V. I. – general guidance, introduction and conclusion.

Статья поступила в редакцию 21.06.2025; принята к публикации после рецензирования 08.09.2025; опубликована онлайн 28.11.2025.

Submitted 21.06.2025; accepted 08.09.2025; published online 28.11.2025.