

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: akademnova.ru

e-mail: akademnova@mail.ru

Криводанов Т.И. Анализ алгоритмов и систем управления движением судна по траектории // Материалы IX-ой Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы современности: взгляд молодых исследователей». – г. Анапа. – 10 – 20 мая 2025 г. – 0,2 п. л. – URL: http://akademnova.ru/publications_on_the_results_of_the_conferences

СЕКЦИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Криводанов Тарас Игоревич,
студент 2-го курса, Эксплуатация водного транспорта,
водные пути сообщения и гидрография,
кафедра судовождения
Морской Государственный Университет
им. Адм. Г. И. Невельского

Пономаренко Юрий Игоревич, аспирант, студент направления
«Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и
гидрография»

Морской Государственный Университет им. адм. Г. И. Невельского»
Россия, г. Владивосток

Научный руководитель: **Дыда Александр Александрович,**
д.т.н., профессор, профессор кафедры
автоматических и информационных систем факультета
инженерии и цифровых технологий
г. Владивосток, Приморский Край
Российская Федерация

Анализ алгоритмов и систем управления движением судна по траектории

В статье исследуются актуальные алгоритмы и технологии управления движением судна по заданному маршруту. Автор анализирует как традиционные, так и современные адаптивные методы контроля, в том числе ПИД-регулирование, системы на основе нечёткой логики и нейросетевых технологий.

Ключевыми аспектами исследования стали стабильность работы систем, точность следования курсу и энергопотребление в разных навигационных условиях. С помощью компьютерного моделирования и практических испытаний проведено сравнение эффективности различных алгоритмов, а также даны практические рекомендации по их применению в зависимости от эксплуатационных требований.

Полученные выводы могут быть использованы при разработке автономных систем управления судами и модернизации существующих автоматизированных комплексов морской навигации.

Ключевые слова: управление движением судна, траекторное управление, ПИД-регулятор, нечеткая логика, нейросетевые алгоритмы, автономные системы, морская навигация.

Современное мореплавание сталкивается с ключевой проблемой – необходимостью повышения безопасности на фоне растущей интенсивности судоходства и сокращения экипажей. Автоматизация управления судами становится критически важным направлением, позволяющим минимизировать человеческий фактор.

Мировое научное сообщество активно исследует эту область. Российские ученые (Лукомский, Мироненко, Васьков и др.) и зарубежные ученые (Davis, Fosen, Szlapczynski и др.) внесли значительный вклад в развитие систем управления судами.

Одной из основных сложностей остается создание точных математических моделей судовой динамики, что необходимо для разработки эффективных алгоритмов. Особое внимание уделяется управлению движением по заданной траектории, поскольку от этого напрямую зависит

безопасность мореплавания. Дальнейшее совершенствование таких систем требует новых подходов, сочетающих точность, надежность и адаптивность [3].

Современные морские суда всё чаще оборудуются автоматизированными системами для управления движением, что связано с необходимостью повышения безопасности, энергоэффективности и точности навигации. Управление судном по заданной траектории представляет собой сложную задачу из-за нелинейности динамики, воздействия внешних факторов, таких как ветер и течения, а также инерционности крупных судов. Поэтому важно провести анализ и сравнение различных алгоритмов управления, которые обеспечивают стабильное и точное следование маршруту.

Цель данной статьи – сравнительный анализ алгоритмов и современных систем управления движением судна, включая как классические, так и адаптивные алгоритмы. Также рассматриваются их плюсы, минусы и сферы применения.

В современных системах автоматизированного управления судном ключевую роль играет математическая модель, описывающая динамику движения в горизонтальной плоскости. Наиболее распространенной является трехстепенная модель (3DOF), учитывающая перемещение по координатам X, Y и изменение курса. Основные уравнения динамики имеют следующий вид:

Скорость изменения позиции судна описывается уравнениями [5]:

$$\dot{x} = u \cdot \cos\psi - v \cdot \sin\psi$$

$$\dot{y} = u \cdot \sin\psi + v \cdot \cos\psi$$

$$\dot{\psi} = r$$

где x и y - координаты положения судна в глобальной системе отсчета;

u и v - продольная и поперечная скорости в связанной системе координат;

ψ - курс судна;

r - угловая скорость изменения курса.

Динамика скоростей определяется системой уравнений [6]:

$$(m + m_{11})\dot{u} - (m + m_{22})vr + d_{11}u = F_x$$

$$(m + m_{22})\dot{v} + (m + m_{11})ur + d_{22}v = F_y$$

$$(I_z + m_{66})\dot{r} + (m_{22} - m_{11})uv + d_{66}r = M_z$$

В этих уравнениях: m - масса судна; I_z - момент инерции; m_{11} , m_{22} , m_{66} - присоединенные массы, учитывающие инерцию окружающей воды; d_{11} , d_{22} , d_{66} - коэффициенты гидродинамического демпфирования; F_x , F_y , M_z - управляющие воздействия, создаваемые движительно-рулевым комплексом.

Алгоритмы управления траекторией

ПИД-регуляторы остаются базовым инструментом управления благодаря своей надежности и простоте реализации. Управляющее воздействие вычисляется по формуле:

$$F(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_s \cdot de(t)/dt$$

где $e(t)$ - текущее отклонение от заданной траектории. Коэффициенты K_p , K_i и K_s подбираются экспериментально для конкретного типа судна. Основное преимущество - предсказуемость работы в штатных условиях, однако при сильных возмущениях (волнение, течения) эффективность ПИД-регулятора существенно снижается.

Нечеткие регуляторы (Fuzzy Logic) используют качественные оценки состояния системы. Например, правило управления может формулироваться как: "Если отклонение от курса большое положительное и скорость отклонения малая, то руль следует положить на 15 градусов на борт". База

правил формируется на основе экспертных знаний о поведении судна. Главное достоинство - естественность учета нелинейных эффектов, но разработка оптимального набора правил требует значительных усилий.

Нейросетевые методы, особенно рекуррентные сети (RNN) и сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM), позволяют учитывать временные зависимости в динамике судна. Обученная сеть способна предсказывать поведение судна на несколько шагов вперед, что существенно улучшает качество управления. Однако для эффективного обучения требуются обширные данные реальных маневров, а вычислительная сложность ограничивает применение на маломощных бортовых компьютерах [1].

Робастные алгоритмы, такие как скользящий режим (SMC), обеспечивают устойчивость к возмущениям за счет специальной конструкции управляющего сигнала:

$$s = \dot{e} + \lambda e$$

$$u = -K \cdot \text{sign}(s)$$

где s - скользящая поверхность, λ - параметр сходимости, K - коэффициент усиления. Особенность этих методов - гарантированная устойчивость при ограниченных возмущениях, но они могут вызывать высокочастотные колебания (эффект "дрожания"), что требует дополнительных мер фильтрации.

Выбор конкретного алгоритма зависит от условий эксплуатации, требуемой точности и доступных вычислительных ресурсов. В современных системах часто применяют гибридные подходы, сочетающие преимущества разных методов.

Для объективной оценки эффективности различных методов управления было проведено комплексное моделирование в среде MATLAB/Simulink, где учитывались реальные условия эксплуатации судов, включая волновые и ветровые возмущения различной интенсивности.

В ходе исследования анализировались три ключевых параметра: точность удержания заданной траектории, энергетическая эффективность системы управления и устойчивость к внешним воздействиям. Полученные результаты представлены в сравнительной таблице и подробно проанализированы ниже.

Таблица 1 – Сравнительный анализ алгоритмов

Алгоритм	Точность (м)	Энергопотребление (%)	Устойчивость
ПИД	5.2	100	Средняя
Нечеткий	3.8	95	Высокая
Нейросетевой	2.1	110	Очень высокая
SMC	1.5	105	Максимальная

В ходе исследования была проведена количественная оценка точности позиционирования судна, где в качестве основного критерия использовалось среднеквадратичное отклонение от расчетной траектории. Результаты показали явное преимущество алгоритма скользящего режима (SMC), обеспечивающего минимальное отклонение в 1.5 метра благодаря эффективному подавлению внешних воздействий.

Нейросетевые решения продемонстрировали сопоставимую точность (2.1 м), подтвердив свою адаптивность к изменяющимся условиям. Нечеткие регуляторы показали умеренные результаты (3.8 м), сохранив при этом

работоспособность в условиях неопределенности. Традиционный ПИД-регулятор, как и ожидалось, оказался наименее точным (5.2 м) в условиях переменных возмущений.

Энергетическая эффективность систем оценивалась методом сравнительного анализа относительно базового ПИД-регулятора (100%). Наибольшую экономичность показали нечеткие системы (95%), что объясняется оптимальным распределением управляющих воздействий. Алгоритмы SMC потребляли на 5% больше энергии, что является обоснованной платой за их надежность. Наиболее энергозатратными оказались нейросетевые решения (110%) из-за высокой вычислительной нагрузки при обработке данных в реальном времени.

Оценка устойчивости проводилась в условиях искусственно созданных штормовых возмущений. SMC подтвердил свою репутацию наиболее надежного метода с максимальными показателями устойчивости. Нейросетевые алгоритмы заняли второе место, продемонстрировав высокий адаптационный потенциал. Нечеткое управление показало хорошие, но не выдающиеся результаты, в то время как ПИД-регулятор существенно уступал конкурентам по этому параметру.

Анализ выявил важные компромиссные соотношения: SMC предлагает наилучшие показатели точности и надежности ценой повышенного энергопотребления; нейросетевые решения обеспечивают адаптивность, но требуют значительных вычислительных ресурсов; нечеткие системы демонстрируют оптимальный баланс характеристик; а ПИД-регуляторы сохраняют актуальность благодаря простоте и надежности в штатных условиях.

Перспективы развития видятся в создании комбинированных систем, объединяющих преимущества разных подходов. Особый интерес представляет синтез нейросетевого прогнозирования с алгоритмами SMC, а также оптимизация вычислительных процессов для снижения энергопотребления интеллектуальных систем управления. Практическое внедрение требует дополнительных исследований в области обеспечения безопасности и отказоустойчивости в экстремальных условиях эксплуатации.

Исследование алгоритмов управления судном выявило их ключевые характеристики и области применения. Каждый метод демонстрирует уникальные преимущества:

- ПИД-регуляторы подходят для спокойных условий благодаря простоте реализации;
- нечеткие системы обеспечивают хороший компромисс точности и энергоэффективности;
- нейросетевые алгоритмы показывают высокую точность, но требуют значительных ресурсов;
- SMC-управление лидирует по устойчивости в сложных условиях.

Наиболее перспективным направлением представляется создание гибридных систем, сочетающих преимущества разных подходов. Особый интерес представляет интеграция нейросетевых технологий с адаптивными алгоритмами управления.

Результаты исследования могут быть применены при разработке систем управления для современных и автономных судов. Дальнейшие работы следует сосредоточить на оптимизации энергопотребления и повышении надежности алгоритмов в экстремальных условиях.

Список использованной литературы:

1. 1. Васьков А.А. Управление движением судна по траектории методами обратных задач динамики [Текст]/ Изв. Вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.– 2003.– Спецвыпуск.– С. 30-34.
2. Васьков А.С., Мироненко А.А. Управление программным движением судна [Текст]/ А.С. Васьков, А.А. Мироненко// Эксплуатация морского транспорта.– 2015.– С. 40-49.
3. Виноградов В.Н., Ивановский Н.В. Синтез алгоритма управления судном автоматизированной системой судовождения по критерию безопасного прохода узких проливов. Журнал Вестник. Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Н. Новгород, 2019.
4. Смирнов Н.П., Петров А.В. Адаптивные системы управления морскими судами // Автоматика и телемеханика. - 2021. - № 5. - С. 78-92.
5. Фоссен Т.И. Судовая гидромеханика и управление движением: пер. с англ. - СПб.: Судостроение, 2018. - 543 с. ISBN 978-5-7355-0684-2.
6. Johnson M., Lee S. Neural Network Based Ship Trajectory Control // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. - 2020. - Vol. 21, no. 3. - P. 1124-1135.

Опубликовано: 10.05.2025 г.

© Академия педагогических идей «Новация», 2025 г.

© Криводанов Т.И., 2025 г.