

УДК 656.61.052

**РАЗРАБОТКА РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА КУРСА СУДНА
НА БАЗЕ ТЕОРИИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ****А.Д. Пипченко¹**

В работе предложена структура нейронного регулятора, представляющая собой нейронную сеть прямого распространения. Отличием данного регулятора от ранее известных, является его относительно высокая робастность – при переносе регулятора с линейной модели Номото на нелинейную модель динамики крупнотоннажного судна и изменении режимов управления, качество регулирования курса не ухудшается без дополнительной перенастройки.

Ключевые слова: судно, авторулевой, регулирование курса.

Вступление. Одним из ключевых элементов современных систем управления движением судна является авторулевой. С появлением электронных карт и спутниковых навигационных систем, актуальной стала проблема не только автоматической стабилизации судна на курсе, но и управления судном по заданной траектории, что предусматривает выполнение маневров курсом в автоматическом режиме. В связи с этим, появляется необходимость в разработке алгоритмов оценки эффективности работы и адаптации параметров авторулевого в режиме маневрирования.

Вопросы автоматического регулирования курса судна рассмотрены в работах Т. I. Fossen [1], Л.Л. Вагущенко [3], С. А. Подпорина [7, 8] и многих других авторов, из анализа которых можно выделить два основных направления: традиционный подход, включающий в себя исследование ПИД-регуляторов [1], и «интеллектуальный» подход, базирующийся на основе теорий ИНС (искусственных нейронных сетей) и нечеткой логики [4, 7, 8].

Преимуществом систем, в основе которых заложен ПИД-закон регулирования, является относительная вычислительная простота и надежность. Адаптивность управления в таких системах достигается путем поиска оптимальных значений коэффициентов ПИД-регулятора и эталонной модели, используемой при фильтрации [1], в известных условиях. К недостаткам таких регуляторов относится противоречие между условиями достижения оптимальности по быстродействию и устойчивости, а также присущее всем замкнутым системам противоречие между условиями повышения точности в установившемся динамическом режиме и устойчивости.

¹ © Пипченко А. Д., к.т.н., доцент, Одесская национальная морская академия

В работах [4, 7, 8] рассмотрена проблема синтеза нейросетевого контроллера в задаче управления курсом судна. В целом применение нейросетевого регулятора (Н-регулятор) позволяет повысить качество управления курсом, что обеспечивается его робастностью и способностью учета нелинейной природы объекта управления. Однако адаптация регулятора и проверка системы управления на устойчивость требует значительных вычислительных затрат, что может отрицательно повлиять на отказоустойчивость системы управления судном в целом.

Работа [2] посвящена применению нечеткого регулятора. Результаты моделирования процесса управления судном с применением такого регулятора [6] позволяют сделать следующие выводы: нечеткий регулятор дает достаточно хорошую точность удержания судна на курсе в режиме стабилизации при слабых возмущениях. Однако в соответствии с работой [8] для различных режимов управления требуются различные комбинации функций принадлежности, а адаптация регулятора заключается в варьировании тех же коэффициентов, что и в ПИД-регуляторе, что ведет к неоправданному, по сравнению с ПИД, усложнению алгоритмического аппарата и, как следствие, увеличению вычислительных затрат.

Цель данной работы – продолжение решения классической проблемы оптимального регулирования курса судна, возможное благодаря современному развитию теории управления, в том числе с применением методов теории искусственных нейронных сетей.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Для того чтобы достичь максимума эффективности для заданного объекта управления необходимо определить структуру и параметры регулятора такие, чтобы целевая функция, позволяющая количественно оценить отклонения от задания, была минимальна. При наличии известной структуры закона управления определение оптимальных параметров регулятора может быть произведено как в режиме он-лайн адаптации (подстройка параметров на основе анализа поведения объекта в реальном времени), так и оф-лайн адаптации (подстройка параметров на основе анализа поведения математической модели объекта).

Он-лайн адаптация является приемлемой в режиме стабилизации судна на одном курсе, однако неприменима при выполнении маневра, ввиду относительно быстрого изменения динамического состояния объекта управления.

Для определения параметров и структуры регулятора в режиме оф-лайн в первую очередь необходимо определить структуру и параметры модели объекта управления и модели возмущающих воздействий. При этом ограничения и неточности моделей объекта и окружающей среды отража-

ются на эффективности управления в целом. Ввиду этого, высокий уровень эффективности регулирования курса, рассчитанный по математической модели не всегда адекватен уровню эффективности, достигаемому на реальном объекте. Поэтому важной характеристикой регулятора также является его робастность – устойчивость к неточностям в определении параметров моделей объекта и внешней среды.

В работах [4, 7, 8] показано, что применение нейро-нечеткого подхода в качестве законов управления в регуляторах курса судна дает достаточно высокие результаты. Однако в ряде случаев регуляторы имеют сложную структуру, а качество их работы сильно зависит от точности математических моделей, используемых при их обучении [7].

Регуляторы, в основу которых, заложены нейро-нечеткие алгоритмы, по сути являются «черным ящиком», плохо поддающимися математическому анализу и адаптации. Это обусловлено, зачастую, сложностью математических моделей и большим количеством коэффициентов регулятора.

Сравнительный анализ трех видов регуляторов: нейронного, нечетко-логического и ПИД [6] показал, что при обеспечении условий робастности и устойчивости наиболее перспективными, в задачах регулирования курса судна, являются нейронные регуляторы.

В процессе разработки и тестирования различных конфигураций Н-регулятора на нелинейных математических моделях динамики судов различных типов и тоннажа была получена структура, представленная на рис. 1.

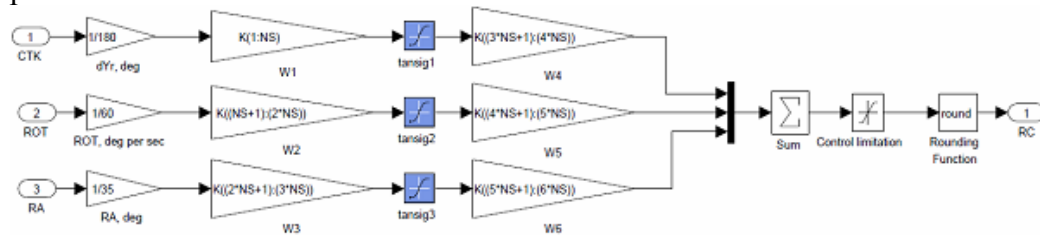


Рис. 1. Блок-схема Н-регулятора

Закон управления представляет собой двухслойную сеть прямого пространства, имеющую три входа: отклонение от курса, угловая скорость и положение пера руля.

Математически закон управления может быть представлен в виде

$$\delta_s = \max \left(-35, \min \left(35, \sum_{i=1}^{NS} a_i^{\Delta\psi} th \left(\frac{\Delta\psi}{180} \cdot b_i^{\Delta\psi} \right) + \sum_{i=1}^{NS} a_i^r th \left(\frac{r}{60} \cdot b_i^r \right) + \sum_{i=1}^{NS} a_i^\delta th \left(\frac{\delta}{35} \cdot b_i^\delta \right) \right) \right) \quad (1)$$

где a, b – коэффициенты; NS – размерность нейрона.

Для обучения Н-регулятора используется тот же алгоритм, что и для настройки ПД регулятора, описанный в работе [5], однако ввиду количества коэффициентов > 6 при их поиске применяется метод генетических алгоритмов. Высоких результатов обучения можно добиться уже при размерности нейрона $NS = 3$, то есть при общем количестве коэффициентов – 18.

С целью апробации Н-регулятора было проведено математическое моделирование динамики контейнеровоза S-175 со скоростями хода 30, 15 и 5 узлов, в трех различных режимах управления: поворот на 90° при порывистом ветре (ветер в борт в момент выхода на курс), стабилизация при порывистом ветре (ветер в скулу), стабилизация при импульсной ветровой нагрузке (ветер в скулу). Математическая модель, разработанная в среде MatLab Simulink приведена на рис. 2.

Осреднение результатов моделирования произведенных в работе [5] позволило получить следующие данные:

- дисперсия отклонений от курса в режиме стабилизации у Н-регулятора в среднем на 60 % меньше, чем у ПД регулятора;
- дисперсия кладок руля в режиме стабилизации у Н-регулятора в среднем на 27 % больше, чем у ПД регулятора;
- дисперсия кладок руля в режиме маневрирования у Н-регулятора в среднем на 12 % меньше, чем у ПД регулятора;
- время выхода на курс в режиме маневрирования у Н-регулятора в среднем на 60 % меньше, чем у ПД регулятора;

Таким образом, при немного более интенсивной работе рулевого устройства Н-регулятор позволяет повысить эффективность маневра и стабилизации на курсе более чем в два раза. При этом с падением скорости разница в эффективности ПД и Н-регуляторов увеличивается в сторону последнего.

Выводы

1. В статье предложена структура Н-регулятора, представляющая собой нейронную сеть прямого распространения.
2. Отличием данного регулятора от ранее известных, является его относительно высокая робастность – при переносе регулятора с линейной модели Номото на нелинейную модель динамики крупнотоннажного судна и изменении режимов управления, качество регулирования курса не ухудшается без дополнительной перенастройки.

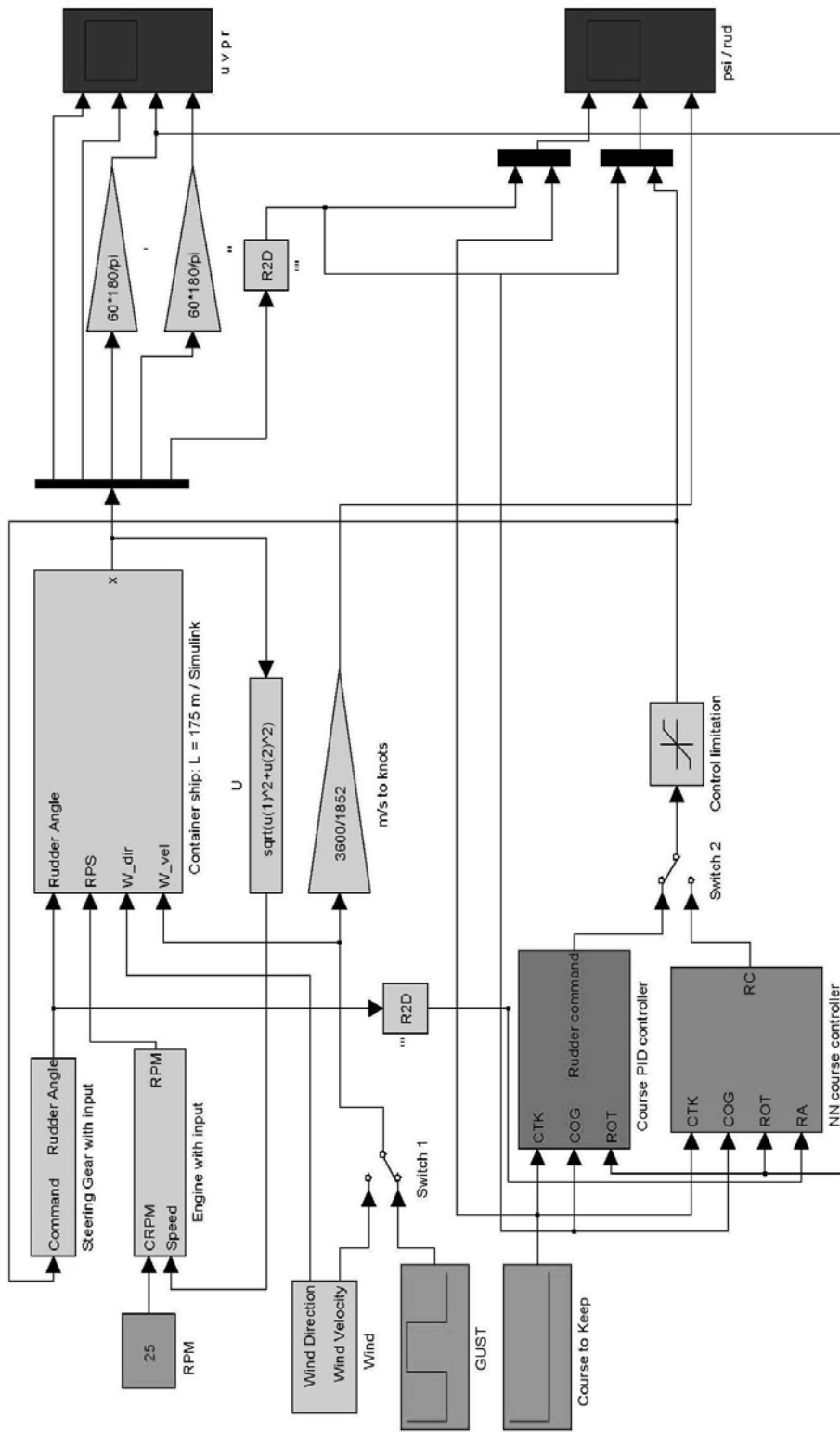


Рис. 2. Вид математической модели для апробации регуляторов курса судна

3. Во многом это достигается благодаря предложенной форме целевой функции и функции задания, используемых при настройке.
4. Сравнение результатов моделирования показало, что эффективность предложенного регулятора практически в два раза выше, чем эффективность настроенного на один режим хода ПД регулятора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fossen T. I. Marine Control Systems. Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles – Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002 – 570 p.
2. Velagica J., Vukicb Z., Omerdicc E.. Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping. Control Engineering Practice 11, 2003. – P. 433–443.
3. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна. 2-е изд., перераб. и доп.– Одесса: Латстар, 2002 – 310 с.
4. Виткалов Я.Л. Исследование проблем синтеза нейросетевого контроллера в задаче управления курсом судна: Автореферат дис. ... к.т.н.: 05.22.19. Владивосток, 2006.—25 с.
5. Пипченко А. Д., Сикирин В. Е. Поиск оптимального закона в задаче автоматизированного регулирования курса судна // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА. – Одесса: ИздатИнформ, 2011. – Вып. 20. – С. 165-174.
6. Пипченко А. Д., Шевченко В. А. К вопросу автоматизированного управления судном на траектории // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА. – Одесса: ИздатИнформ, 2011. – Вып. 19. – С. 149-155.
7. Подпорин С. А. Нейронный управляющий контроллер в задаче автоматического управления судном на меняющемся курсе// Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА. – Одесса: ИздатИнформ, 2011. – Вып. 19. – С. 156-165.
8. Подпорин С.А. Развитие методов интеллектуального управления движением судна на курсе. Диссертация ... к.т.н.: 05.22.13. – Одесса: ОНМА, 2009. – 180 с.

Рукопись поступила в редакцию 29.12.2012 г.