

## РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИКОЙ КУРСА АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

*Гришин Н.Ю.*

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

**Ключевые слова:** автономный подводный аппарат, управление курсом, нечеткий логический контроллер, компенсатор коэффициента усиления по состоянию.

**Аннотация.** В данной статье представлена стратегия управления с использованием подхода на основе нечеткой логики в сочетании с классическим компенсатором усиления на основе размещения полюсов для анализа модели третьего порядка, разработанной для динамики плоскости курса автономного подводного аппарата. Описанный регулятор является самонастраивающимся и адаптивным в том смысле, что после его настройки и адаптации к заданной области входных данных он обеспечивает стабильное управление в различных условиях эксплуатации. Реакция и производительность полученной системы сравниваются с автономным нечетким логическим контроллером и классическим контроллером с обратной связью по состоянию, разработанным для динамики рысканья системы. В заключении даются краткие преимущества адаптивного регулятора.

## DEVELOPMENT OF MULTI-AGENT SYSTEMS USING SPADE

*Grishin N.Yu.*

*MIREA – Russian Technological University, Moscow*

**Keywords:** autonomous underwater vehicle, course control, fuzzy logic controller, state gain compensator.

**Abstract.** This article presents a control strategy using a fuzzy logic approach combined with a classical pole-based gain compensator to analyze a third-order model developed for the dynamics of the course plane of an autonomous underwater vehicle. The described controller is self-adjusting and adaptive in the sense that after it is configured and adapted to a given input data area, it provides stable control in various operating conditions. The response and performance of the resulting system are compared with an autonomous fuzzy logic controller and a classic state feedback controller designed for the yaw dynamics of the system. In conclusion, brief advantages of the adaptive regulator are given.

### **Введение**

Для того чтобы избежать работы человека-оператора, были предложены АНПА, которые были спроектированы таким образом, чтобы гарантировать автоматизацию элементарных действий, таких как слежение за регуляторами и отслеживание траектории движения по заданным точкам. Для усовершенствования технологии были применены различные стратегии управления динамикой подводных аппаратов. Динамическая модель АНПА имеет присущие ей нелинейности. Для борьбы с этими нелинейностями в прошлом применялось несколько методов управления, например, управление в скользящем режиме [1, 2], адаптивное управление [3] и управление с обратным шагом на основе теории устойчивости Ляпунова [4].

В данном исследовании регулятор на основе нечеткой логики в сочетании с компенсатором усиления был разработан на основе формулы Аккермана путем назначения полюсов обратной связи по состоянию таким образом, чтобы замкнутая система удовлетворяла желаемым требованиям. Метод проектирования компенсатора с обратной связью по состоянию основан на модели передаточной функции системы, поэтому размещение всех полюсов замкнутого контура связано с определенными затратами. Однако размещение всех полюсов замкнутого контура требует измерения и обратной связи со всеми переменными состояния системы. Таким образом, был сделан вывод, что алгоритм управления на основе нечеткой логики лучше всего подходит для тех случаев, когда точная математика нам не известна.

### Модель АНПА с шестью степенями свободы

Моделирование АНПА с шестью степенями свободы основано на Аксиоме Ньютона-Эйлера, описанные в [1]. При моделировании АНПА рассматриваются две системы координат. Неподвижная, которая, как предполагается, жестко привязана к АНПА, и эти координаты измеряются относительно другой системы отсчета, которая, как предполагается, фиксирует и известна как неподвижная система отсчета земли или инерциальная система отсчета. Неподвижная система отсчета тела содержит шесть координат скорости, представляющих три скорости поступательного движения и три скорости вращения в направлении X, Y и Z соответственно. Неподвижная местная и глобальная система отсчета тела представлена векторами соответственно:

$$\eta = [xyz\phi\theta\varphi]^T, \quad (1)$$

$$\nu = [uvw\phi\theta\varphi]^T, \quad (2)$$

где  $\eta_1 = [xyz]^T$  – скорости поступательного движения, известные как скорости марша, лага и подъема в глобальной системе координат, и  $\eta_2 = [\phi\theta\varphi]^T$  – скорости углового вращения, известные как углы ориентации судна по крену, дифференту и курсу в глобальной системе координат,  $\nu_1 = [uvw]^T$  – скорости поступательного движения, известные как скорости марша, лага и подъема в местной системе координат, и  $\nu_2 = [pqr]^T$  – скорости углового вращения, известные как углы ориентации судна по крену, дифференту и курсу в местной системе координат.

Основываясь на уравнениях Ньютона и Эйлера, система уравнений движения с шестью степенями свободы для АНПА может быть записана в переменных местных координатах тела:

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] &= \sum X_{ext}, \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] &= \sum Y_{ext}, \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] &= \sum Z_{ext}, \\ I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_q(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] &= \sum K_{ext}, \\ I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_q(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] &= \sum M_{ext}, \\ I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_q(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vq + wq)] &= \sum N_{ext}. \end{aligned} \quad (3)$$

В этой статье предложена схема управления угла курса АНПА. Поэтому можно пренебречь внеплоскостными составляющими уравнения, чтобы вывести следующие три члена вектора состояния, как указано в [5], которые описывают только динамику плоскости курса.

Вычисляя параметры системы путем подстановки значений параметров, приведенных в таблице 1 для АНПА SNAME 1950 [3] получаем передаточную функцию системы по курсу:

$$\frac{\psi}{\delta_r} = \frac{(s(-0,482) + (-0,223))}{(s^3 + s^2(1,005) + s(0,119))}. \tag{4}$$

Вычисляя параметры системы путем подстановки значений параметров, приведенных в таблице 1 для АНПА SNAME 1950 [6] получаем передаточную функцию системы по курсу:

Табл. 1. Массогабаритные характеристики АНПА SNAME 1950

Параметр	Значение	Единицы измерения	Описание
$I_{zz}$	3,45	кг·м <sup>2</sup>	Момент инерции относительно оси Z
$Y_{\dot{v}}$	-35,5	кг	Присоединенная масса
$Y_{\dot{r}}$	2,89	кг·м/рад	Присоединенная масса
$N_{\dot{v}}$	1,93	кг·м	Присоединенная масса
$N_r$	-0,23	кг·м <sup>2</sup> /рад <sup>2</sup>	Сопrotивление поперечного потока
$Y_r$	38,37	кг·м/рад <sup>2</sup>	Сопrotивление поперечного потока
$Y_v$	-68,27	кг·м	Сопrotивление поперечного потока
$N_v$	-3,46	кг	Сопrotивление поперечного потока

### Разработка регулятора системы управления

Проектирование управления на основе нечеткой логики не зависит от точности модели системы, поскольку оно основано на человеческом опыте. Это явление очень полезно для нашего рассмотрения, поскольку очень сложно найти точную конструкцию модели АНПА. В этой статье были использованы семь лингвистических переменных, а именно NL (отрицательный большой), NM (отрицательный средний), NS (отрицательный маленький), ZE (ноль), PS (положительный маленький), PM (положительный средний) и PL (положительный большой) для входных данных и двух дополнительных нечетких переменных NVL (отрицательный очень большой) и PVL (положительный очень большой) используется для вывода управляющего сигнала. На рисунке 1 показаны нечеткие переменные и соответствующие им треугольные функции принадлежности. База правил приведена в таблице 2.

В этой статье дефаззификация была выполнена методом нахождения центра тяжести. Первым шагом дефаззификации обычно служит "отсечение части графика так чтобы получилась трапеция. Затем получившиеся трапеции накладываются одна на другую, образуя единую геометрическую фигуру. После вычисляется центр тяжести этой фигуры. Полученная координата  $x$  центра тяжести – это значение нечеткой переменной.

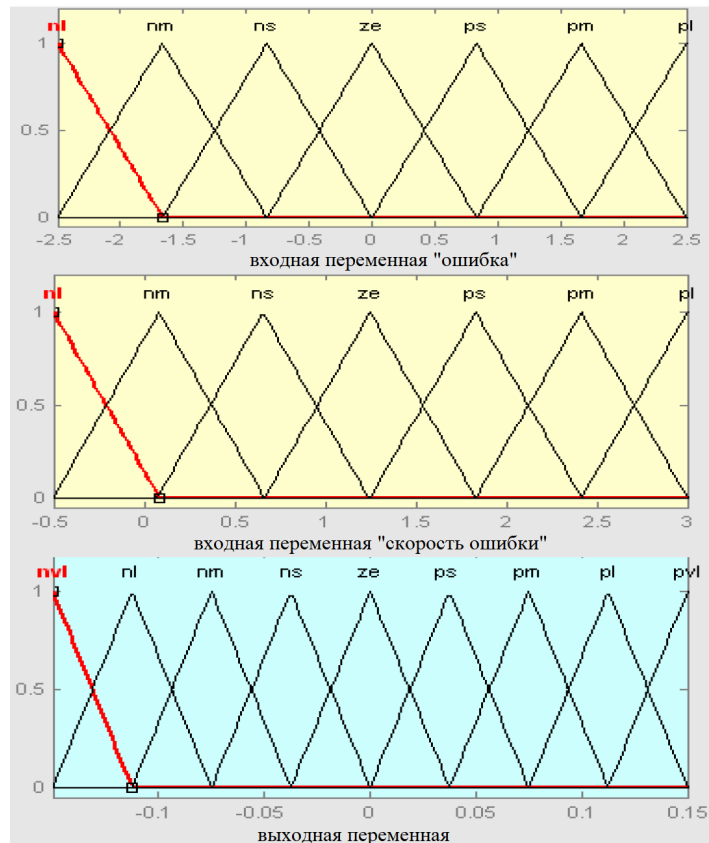


Рис. 1. Нечеткие переменные и соответствующие им треугольные функции принадлежности

Табл. 2. Таблица правил нечеткого регулятора

$e \backslash \Delta e$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NVL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PVL

Для стабилизации системы был разработан компенсатор коэффициента усиления, который позволяет поместить собственные значения замкнутой системы в заранее заданные положения. Этот компенсатор последовательно с нечетким логическим контроллером обеспечивает достижение желаемых динамических характеристик всей системы в контуре управления курсом.

Размещение полюсов было произведено по формуле Аккермана.

$$K = [001]M_c^{-1}\Phi_d(A). \tag{5}$$

После произведенных вычислений получена следующая матрица:

$$K = [4,99 \ 14,13 \ 12,5].$$

На рисунке 2 показана общая схема системы управления углом курса с синтезированным нечетким регулятором и компенсатором коэффициента

усиления. На рисунке 3 показан график переходной функции по ступенчатому задающему воздействию в 1 градус.

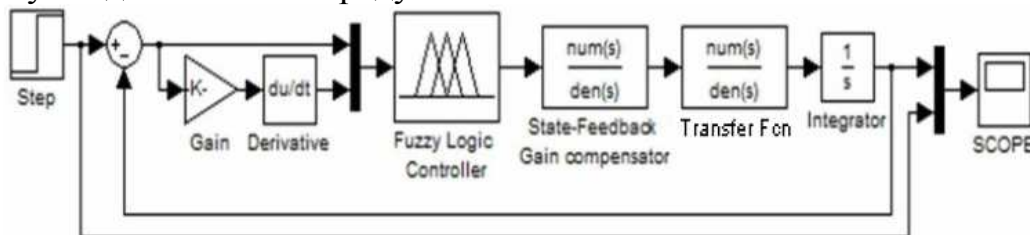


Рис. 2. Схема системы управления углом курса

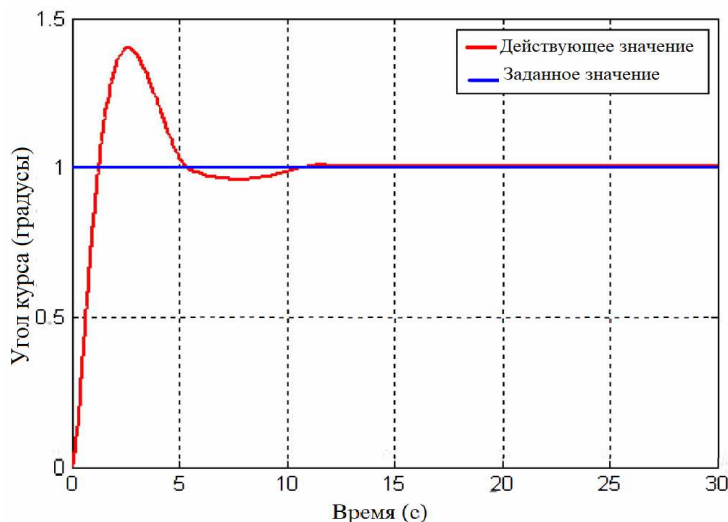


Рис. 3. График переходной функции по ступенчатому воздействию

### Заключение

В этой работе применен новый метод проектирования контроллера путем объединения аналитического управления с обратной связью с нечетким управлением. Из результатов следует, что производительность подхода оказалась лучше по сравнению только с нечетким управлением и автономным управлением с обратной связью по состоянию. Однако желаемая производительность была достигнута, поскольку модель системы была хорошо управляемой и наблюдаемой, а также исключала импульсные режимы путем смещения полюсов замкнутого контура.

### Список литературы

1. Лукомский Ю.А. Системы управления морскими подвижными объектами. – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.
2. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 789 с.
3. Кокорев Ю.А. Теория электромеханического привода. – М.: МГТУ, 2002. – 230 с.
4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: МГТУ, 2002. – 230 с.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления. – М.: МГТУ, 1982. – 700 с.
6. Wikipedia. Трёхмерная графика: свободная энциклопедия – / Wikipedia. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Движение\\_кораблей](https://ru.wikipedia.org/wiki/Движение_кораблей).

### Сведения об авторе:

Гришин Никита Юрьевич – аспирант.