

Список литературы

1. Макаров С. Ледокол Ермак / С. Макаров, Н. Кузнецов, С. Долгов. — М.: Паулсен, 2010. — 672 с.
2. Блинов В. М. Ледокол Ленин. Первый атомный / В. М. Блинов. — М.: Паулсен, 2009. — 288 с.
3. Доронин Ю. П. Физика океана / Ю. П. Доронин. — СПб: РГТМУ, 2000. — 305 с.
4. Визе В. Моря российской Арктики / В. Визе. — М.: Европейские издания, 2008. — 664 с.
5. Смирнов В. Н. Динамика процесса разлома дрейфующего ледяного поля станции Северный полюс-38 / В. Н. Смирнов, Л. В. Панов, В. Т. Соколов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 4. — С. 26–45.
6. Степанюк И. А. Методы измерений характеристик динамики ледяного покрова / И. А. Степанюк, В. Н. Смирнов. — СПб.: Гидрометеиздат, 2001. — 135 с.
7. Смирнов В. Н. Особенности динамики и механики деформирования льда Арктического бассейна / В. Н. Смирнов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2007. — № 75. — С. 73–84.
8. M. Sc. THESIS Control Strategies for Maneuvering in Ice Ridge and Multi Ice Regimes., Sindre Ueland & Sverre Slettebo, Trondheim. — 2010. — P. 1–5.
9. Jürgens D. Design Thrusters using CFD / D. Jürgens, M. Palm, A. Amelang, T. Moltrecht // DP Conference. Houston. — October, 7–8, 2008. — P. 1–8.
10. Azipod VI Series Product Introduction . — Helsinki: ABB Oy Marine, 2010. — 36 с.
11. Developing the First Arctic LNG fleet // Arctic Passion News. — 2012. — № 7. — P. 7–9.
12. Цой Л. Г. Обоснование основных параметров перспективных крупнотоннажных газовозов для Арктики / Л. Г. Цой, А. В. Андрияшин, А. А. Штрек // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 3. — С. 46–57.
13. Марченко А. В. Модели торошения морских льдов [Электронный ресурс] / А. В. Марченко. — Режим доступа: <http://www.rusmechanics.ru/3/articles/marchenko> (дата обращения — 20.03.2015). — 20.03.2015.
14. Moukhma L. A. Computation of counterrotating propellers steady and unsteady characteristics / L. A. Moukhma, A. Yu. Yakovlev // ISC'2002 Proceedings, St-Petersburg, Russia, 2002. — P. 137–144.
15. Яковлев А. Ю. Расчет стационарных гидродинамических характеристик тянущей винторулевой колонки / А. Ю. Яковлев // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2008. — Вып. 35 (320). — С. 96–110.
16. Mikko Mattila & Jari Ylitalo. The reliable solution with minimal Thrust Losses / Mikko Mattila & Jari Ylitalo // Dynamic positioning conference. — Finland, September, 17–18. — 2002. — P. 1–9.
17. Сальников А. В. Нефтегазовые трубопроводы на арктическом шельфе: в 2 ч. — Ч. 2. Ледовое воздействие: метод. указания / А. В. Сальников. — Ухта: УГТУ, 2013. — 44 с.

УДК. 656.61.052

В. В. Дерябин,
канд. техн. наук

НЕЧЁТКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА СКОРОСТИ ДРЕЙФА СУДНА

FUZZY INFERENCE VESSEL'S DRIFT SPEED PREDICTION SYSTEM

В статье рассматривается построение нечёткой системы, прогнозирующей скорость дрейфа судна. Входной сигнал составляют величины, характеризующие движение судна в условиях влияния ветра и волнения, режим работы его движительно-рулевого комплекса. Предлагается методика получения набора значений векторов входного и выходного сигналов, которая может использоваться в процессе текущей эксплуатации судна. Формирование эталонных ситуаций для создания базы правил системы и проверки её работоспособности выполняется с использованием имитационной модели движения судна. Приводятся результаты тестирования нечёткой системы в различных навигационных ситуациях, характеризующихся определёнными значениями возмущающих и управляющих воздействий. В рассмотренных модельных ситуациях синтезированная система позволяет определять траекторию движения судна с приемлемой для навигационных целей средней точностью.

In the article fuzzy inference vessel's drift speed prediction system is considered. Input signal is formed by variables which perform vessel's motion in wind and wave disturbances, its propulsion and steering system mode. Method of registration of input and output vector values which is applicable during routine vessel's operation is proposed. Forming necessary sets for creating rules base and validation of system is performed on basis of imitation model of ship motion. The results of fuzzy inference testing in different navigational situations characterized by certain values of control and disturbance influences are performed in the paper. In considered model situations constructed system demonstrates applicable for navigational purposes mean trajectory prediction accuracy.

Ключевые слова: система нечёткого вывода, скорость дрейфа судна, имитационная модель, численные пути, тестирование.

Key words: fuzzy inference system, vessel speed of drift, imitation model, dead reckoning, testing.

3

ЗАДАЧА прогнозирования скорости дрейфа судна возникает при ведении счисления пути, когда в качестве автономной навигационной системы используется относительный лаг, измеряющий только продольную составляющую скорости, и гироскоп. Традиционный подход к решению этой задачи состоит в применении аппарата теории дифференциальных уравнений. Однако правые части этих уравнений содержат в своих слагаемых силы, воздействующие на корпус судна со стороны движительно-рулевого комплекса, ветра, волнения и течений, а также силы сопротивления. Методики вычисления данных сил основаны на положениях той или иной теории либо вычисления выполняются на основе обработки данных испытаний моделей судов. В том и другом случае способ расчёта может не соответствовать действительности при моделировании динамики конкретного судна.

В связи с этим особое значение приобретает разработка альтернативных методов прогноза дрейфа судна. В настоящей статье предлагается построение модели прогноза скорости дрейфа на основе системы нечёткого вывода. Рассмотрена методика проведения натурного эксперимента, по результатам которого выполняется идентификация модели, а также приводятся результаты тестирования нечёткой системы при движении судна в различных условиях плавания.

При ведении счисления измерение исходных величин происходит в условиях значительной неопределённости. Так, параметры волнения (длина, высота, курсовой угол волн) определяются лишь приближённо, на основе визуальной оценки. Нечёткие модели как раз и ориентированы на построение на их основе систем, работающих в условиях существенной неопределённости и неполноты исходных данных.

Определим сначала вид входных и выходных сигналов системы нечёткого вывода. Для имитации движения судна в условиях влияния ветра и волнения используется предложенная в статье [1] модель движения судна в горизонтальной плоскости. В соответствии с указанной моделью дифференциальное уравнение для скорости дрейфа судна имеет следующий вид:

$$m \cdot (1 + k_{22}) \cdot \frac{dV_{y1}}{dt} = -m \cdot (1 + k_{11}) \cdot V_{x1} \cdot \omega + F_{vy1} + F_{py1} + F_{ry1} + F_{ay1} + F_{wy1}, \quad (1)$$

где m – масса судна; V_{x1} – продольная составляющая относительной скорости судна; V_{y1} – скорость дрейфа; ω – угловая скорость поворота; k_{11} , k_{22} – коэффициенты присоединённых масс; F_{y1} – проекция сил на поперечную ось, а их индексы относятся: v – к силам и моментам вязкостного трения, P – к поперечной силе гребного винта, R – к влиянию руля; A , W – индексы, характеризующие воздействие ветра и волнения.

Анализ уравнения (1) и выражений для расчёта отдельных сил показывает, что его непосредственное интегрирование приводит к тому, что выходная величина $Y = V_{y1}$ (скорость дрейфа судна) зависит от интеграла суммы слагаемых правой части. В соответствии с этим в конце промежутка времени длительностью Δt значение выходного сигнала будет зависеть от входа, имеющего следующий вид:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 = \int_0^{\Delta t} V_{x1} dt; \\ x_2 = \int_0^{\Delta t} V_{y1} dt; \\ x_3 = \int_0^{\Delta t} (V_{x1} w) dt; \\ x_4 = \int_0^{\Delta t} \delta dt; \\ x_5 = \int_0^{\Delta t} n dt; \\ x_6 = \int_0^{\Delta t} V_R^2 \sin \alpha_R dt; \\ x_7 = \int_0^{\Delta t} pg(h^2 / \lambda) \sin \gamma dt, \end{pmatrix}$$

где δ – угол перекадки руля; n – число оборотов винта; V_R , α_R – соответственно скорость и курсовой угол относительного ветра; p – плотность воды; g – ускорение свободного падения; h – высота волны; λ – длина волны; γ – угол между направлением, противоположным бегу волн, и диаметральной плоскостью судна.

Первым этапом построения системы нечёткого вывода является формирование её базы правил [2]. Нечёткая система имеет семь входных и одну выходную лингвистических переменных. В ней используется система правил нечётких продукций следующего типа:

$$\text{ЕСЛИ } x_1 = x_1^* \text{ И } x_2 = x_2^* \text{ И } x_3 = x_3^*, \dots, \text{ И } x_7 = x_7^* \text{ ТО } y = y^*(F), \quad (2)$$

где символом $*$ обозначены конкретные значения компонентов входного и выходного сигналов, а F – вес соответствующего правила. Выбор логической операции «И», связывающей посылки правил, объясняется тем, что составляющие вектора входного сигнала оказывают совместное влияние на величину скорости дрейфа судна. Назначение веса F каждого правила может исходить из степени надёжности информации, на основе которой было сформировано данное правило. Считая все измерения равноточными, будем в выражении (2) величине веса приписывать значение, равное единице.

Вторым этапом синтеза системы является фаззификация лингвистических переменных. Причем каждая лингвистическая переменная характеризуется N_i термами, с каждым из которых сопоставляется определённая функция принадлежности. На рис. 1 приведены графики функций принадлежности для семи термов лингвистической переменной x_1 , область возможных значений которой представлена промежутком $[x_{1\min}, x_{1\max}]$. Для терма «1», соответствующего наименьшему значению лингвистической переменной, назначается Z-образная функция принадлежности, для терма «7» – S-образная. Все остальные термы характеризуются треугольными функциями принадлежности. Выбор типа функций принадлежности выполнен с учётом практики синтеза нечётких регулирующих устройств, рассматриваемых в [3] – [7].

Агрегирование условий в правилах нечётких продукций осуществляется с использованием операции нечёткой конъюнкции «ИЛИ», т. е. если хотя бы одна посылка в каком-либо правиле имеет степень истинности, отличную от нуля, то это правило считается активным и используется при дальнейших расчетах. Активизация подзаключений в правилах нечётких продукций представляет собой min-активизацию, причём для ускорения расчётов используются лишь активные правила.

Аккумуляция заключений нечётких правил осуществляется по формуле для объединения нечетких множеств, которые относятся к термам подзаключений для одних и тех же лингвистических переменных [2]. Деффагификация выходной переменной выполняется с использованием метода центра тяжести. Следует отметить, что рассматриваемая система нечёткого вывода построена по алгоритму Мамдани, который был предложен английским учёным Е. Мамдани в 1975 г. [8].

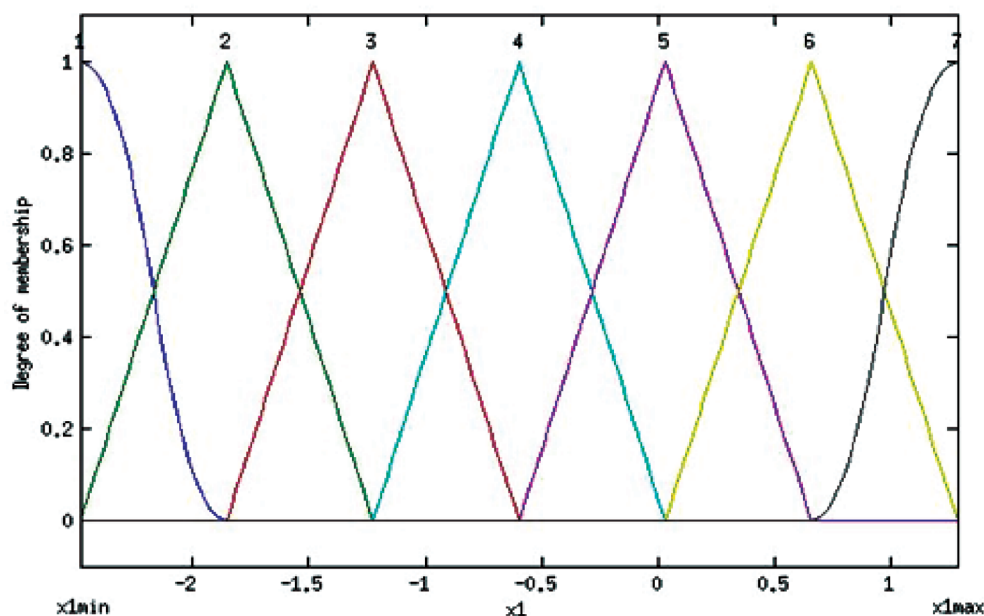


Рис. 1. Графики функций принадлежности термов лингвистической переменной x_1

После того как структура системы полностью определена, можно приступить к формированию базы правил нечётких продукций на основе данных, полученных по результатам проведения натурных наблюдений. Каждая лингвистическая переменная, как входная, так и выходная, принимает значение, соответствующее определенному терму. Степень соответствия переменной определяется модулем разности между её фактическим значением и величиной, в которой функция принадлежности того или иного терма принимает наибольшее значение. Например, если входная переменная x_1 принимает значение, равное $-0,5$, то по рис. 1 можно определить, что она относится к терму «4». Таким образом, в результате рассмотрения конкретной эталонной ситуации можно сформировать набор номеров для всех термов переменных системы. В среде MATLAB R2014b правила нечётких продукций хранятся в виде матрицы, каждая строка которой соответствует определённому правилу. Первый элемент в строке соответствует первому входу, второй – второму и т. д. После указанных элементов следует номер терма выходного сигнала. Иными словами, на основе обработки данных эталонных ситуаций формируется «матрица правил» системы нечеткого вывода, элементы которой принимают целые значения от 1 до N_i .

Для построения базы правил системы необходим набор эталонных ситуаций (X, Y), на основе которого формулируются правила нечёткого вывода. Возможны два пути формирования указанных ситуаций. Первый заключается в накоплении определённого количества различных пар «вход-выход», наблюдаемых в ходе длительной эксплуатации судна. Применение такого подхода на практике возможно, так как вид входных и выходных сигналов позволяет проводить независимые во времени наблюдения, результаты которых можно хранить в виде базы данных. Второй путь предполагает проведение натурных испытаний по определённой программе, содержащей инструкции по управлению судном в тех или иных условиях плавания. В [9] предлагается проведение подобных испытаний на основе модельных ситуаций, каждая из которых представляет собой плавание судна с удерживаемыми постоянными значениями угла перекладки руля и числа оборотов винта.

При формировании базы правил системы нечёткого вывода следует учитывать два обстоятельства. Первое из них состоит в том, что число правил не должно быть слишком большим, так как увеличение их количества приводит к снижению скорости вычислений системы. Второе заключается в том, что используемые правила должны отображать основные свойства судна как динамической системы. Указанные два условия противоречивы и нахождение оптимального соотношения между количеством и качеством эталонных сигналов возможно при помощи использования результатов моделирования динамики конкретного судна.

Приступим к моделированию условий плавания, среди которых наблюдаются различные варианты движения судна в ходе его продолжительной эксплуатации. Введём понятия гидрометеорологической и навигационной ситуаций – соответственно ГС и НС. Под ГС понимается совокупность характеристик ветра и волнения в неподвижной географической системе координат, которыми эти внешние факторы определяются безотносительно к судну. Такими характеристиками являются направление и скорость истинного ветра, направление распространения волн, их длина, высота и истинный период. Воздействие ветра и волнения на конкретное судно определяется его гидро- и аэродинамикой, а также величинами действующих на него управляющих воздействий – сил со стороны руля и винта. НС есть совокупность относительных характеристик ветра и волнения, а также управляющих воздействий, определяющих движение судна. Иными словами, НС характеризуется совокупностью возмущающих воздействий (ВВ) и управляющих воздействий (УВ) на судно. К относительным характеристикам внешних факторов относятся курсовой угол и скорость относительного ветра, курсовой угол волны, длина и высота волн, их кажущийся период.

Рассмотреть все навигационные ситуации принципиально невозможно, поэтому следует ограничиться лишь их возможными вариантами, для формирования которых необходима классификация навигационных ситуаций. В её основу положен принцип постоянства во времени управляющих и возмущающих воздействий. С позиции данного принципа возможны четыре варианта НС:

1. УВ изменяются, и ВВ изменяются с течением времени.
2. УВ изменяются, а ВВ постоянны во времени.
3. УВ постоянны во времени, а ВВ изменяются.
4. УВ постоянны во времени, и ВВ постоянны во времени.

Согласно [9], рассмотренные варианты навигационных ситуаций можно объединить в три класса, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Классы навигационных ситуаций

Номер класса	Характеристика	Правила моделирования навигационной ситуации
I	ВВ приближённо постоянны, а УВ могут как изменяться, так и нет (в зависимости от настройки системы управления на курсе)	ГС постоянна. Судно удерживается на заданном курсе, обороты винта постоянны
II	УВ постоянны во времени, а ВВ изменяются	ГС постоянна или носит переменный характер. Задаётся число оборотов винта и угол перекладки руля, которые остаются неизменными во время плавания судна
III	УВ и ВВ изменяются с течением времени	ГС постоянна или носит переменный характер. Число оборотов винта и угол перекладки руля изменяются в течение времени по определённому закону

При моделировании навигационных ситуаций первого класса следует рассмотреть структуру системы автоматического регулирования курса судна. В настоящем исследовании используется ПИД-регулятор, коэффициенты которого определяются с учётом характеристик: постоянной времени и коэффициента усиления, а также скорости движения судна [10], [11].

Методика моделирования гидрометеорологической ситуации состоит в следующем. В случае её постоянного характера, параметры действующих на акватории ветра и регулярного волнения выбираются случайным образом в соответствии с табл. 2 и сохраняются постоянными по мере плавания судна в данной модельной ситуации.

Таблица 2

Параметры гидрометеорологической ситуации

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Промежуток возможных значений
Направление истинного ветра	K_{tr}	°	[0; 360)
Скорость истинного ветра	V_{tr}	м/с	[0; 30]
Направление волнения (откуда приходят волны)	K_w	°	[0; 360)
Длина волны	λ	м	[10; 250]
Высота волны	h	м	[0; 10]

Регулярное волнение моделируется на основе линейной теории волн, существенным допущением которой является предположение о малости крутизны волны h / λ . В настоящем исследовании значение крутизны не превышает 0,1. Связь между длиной волны и её истинным периодом τ выражается следующей зависимостью:

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}.$$

Переменный характер гидрометеорологической ситуации выражается в том, что величины, характеризующие ветер и волнение, изменяются во времени по следующему закону:

$$x(t) = x_0 + A_1 \sin(2\pi t / \tau_1) + A_2 \sin(2\pi t / \tau_2) + A_3 \sin(2\pi t / \tau_3), \quad (3)$$

где x_0 – среднее значение моделируемой величины, выбираемое случайным образом в соответствии с табл. 2; $A_1, A_2, A_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3$ – соответственно амплитуды и периоды первой, второй и третьей гармоник.

Границы возможных значений данных величин приведены в табл. 3. Предполагается, что при моделировании в соответствии с выражением (3) значения величин находятся в промежутках, границы которых указаны в табл. 2.

Таблица 3

Характеристики изменяющихся гидрометеорологических факторов

Наименование величины	Обозначение	Единицы измерения	I гармоника		II гармоника		III гармоника	
			A	τ	A	τ	A	τ
Модуль истинного ветра	V_{tr}	м/с	[0; 30]	2–10 ч	[0; 5]	10 мин – 1 ч	[0; 2]	10 с – 1 мин
Направление истинного ветра	K_{tr}	град.	[0; 360]	*	[0; 30]	*	[0; 10]	*
Высота волны	h	м	[0; 5]	**	–	–	–	–
Направление волнения	K_w	град.	[0; 90]	***	–	–	–	–
Длина волны	λ	м	[30; 100]	1–10 ч	–	–	–	–

* – период направления ветра может отличаться для соответствующих гармоник от его модуля не более, чем соответственно, на 1 ч, 1000 и 30 с.

** – период изменения высоты волнения может отличаться от периода изменения первой гармоники модуля истинного ветра на величину, не превосходящую по модулю 1 ч.

*** – период изменения направления волнения может отличаться от периода изменения первой гармоники направления истинного ветра на величину, не превосходящую по модулю 1 ч.

При моделировании навигационной ситуации третьего класса следует предположить, что угол перекладки руля и число оборотов винта изменяются в соответствии с выражениями:

$$\delta(t) = 35^\circ \sin(2\pi t / \tau_\delta); \quad (4)$$

$$n(t) = 40 \text{ об./мин} + 40 \text{ об./мин} \times \sin(2\pi t / \tau_n),$$

где τ_δ и τ_n – соответственно периоды изменений угла перекладки руля и числа оборотов винта (значения данных величин выбираются в соответствии с ограничениями движительно-рулевого комплекса судна).

Если скорость перекладки руля составляет 3 град./с, то 47 с – наименьшее значение величины τ_δ . Если обороты винта могут измениться на максимальную величину (80 об/мин) в течение 5 мин, то 10 мин – минимальное значение периода τ_n . Наибольшие значения периодов в выражении (4) выбираются равными удвоенному времени плавания.

Для навигационной ситуации первого класса значение курса, удерживаемого авторулевым, выбирается случайным образом из промежутка от 0 до 360°, значение оборотов винта – из диапазона 40–80 об/мин. При моделировании навигационной ситуации второго класса значение числа оборотов винта выбирается из промежутка от 0 до 80 об/мин, угол перекладки руля – из диапазона -35 – +35.

Прежде чем приступить к имитации движения судна в различных условиях плавания, необходимо определиться с выбором промежутка времени Δt , в течение которого происходит интегрирование величин, формирующих входной сигнал нечёткой системы. Величина данного промежутка в настоящей работе принимается равной 5 мин. Кроме того, необходимо выбрать количество наблюдений, в ходе которых формируются образцы. Каждое наблюдение представляет собой плавание судна в течение одного часа в определённых условиях. В данном исследовании было решено использовать 1000 таких часовых наблюдений.

Навигационные ситуации второго и третьего класса имеют ещё по два подкласса, соответствующих постоянному или переменному характеру гидрометеорологической ситуации. Было рассмотрено 200 навигационных ситуаций первого класса и по 200 ситуаций каждого подкласса НС второго и третьего классов. Моделирование движения судна выполнялось с использованием параметров балкера серии «584Е» водоизмещением 31795 т при осадке по летнюю грузовую ватерлинию.

Как отмечалось ранее, при формировании вариантов навигационных ситуаций возникает проблема их классификации, имеющая некоторые особенности. Одна заключается в том, что в процессе эксплуатации судна могут встречаться образцы, «похожие» друг на друга, их компоненты отличаются незначительно, и влияние на скорость дрейфа таких сигналов можно считать практически эквивалентным. Поскольку подобные «близкие» сигналы образуют определённый класс, для формирования системы правил следует ограничиться только одним представителем такого класса. Другая особенность классификации состоит в том, что теоретически следует рассмотреть все возможные классы, но на практике, как правило, приходится ограничиваться только их конечным числом. Возникает следующий вопрос: «Какие классы должны быть рассмотрены обязательно, а какими можно пренебречь, чтобы обеспечить гарантированную точность системы?» Для ответа на него зададимся следующими условиями: пусть каждый компонент входного сигнала принимает значение, принадлежащее одному из семи классов, центральными точками которых служат точки максимума функций принадлежности соответствующих термов. В таком

случае насчитывается $7^7 = 823543$ возможных классов для вектора входного сигнала. В ходе рассмотренных 1000 модельных ситуаций было сформировано 1708 входных образцов, соответствующих такому же количеству классов. Распределение входных сигналов по классам приведено на рис. 2, откуда видно, что несмотря на значительное число рассмотренных ситуаций, их распределение по классам носит неравномерный характер.

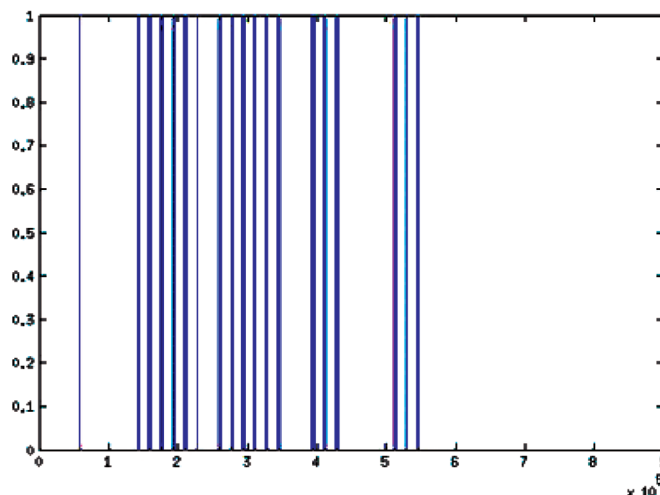


Рис. 2. Распределение векторов входного сигнала по классам

На основе полученных образцов была сформирована база правил нечётких продукций, после чего построение нечёткой системы можно считать завершённым. Тестирование системы нечёткого вывода выполняется с использованием имитационной модели движения судна по методике, используемой для формирования эталонных ситуаций. Единственным отличием при этом является то, что количество навигационных ситуаций выбирается равным ста. Особенность использования нечёткой системы в рабочем режиме состоит в том, что входной сигнал x^2 представляет собой интеграл от скорости дрейфа, т. е. выхода системы. Для расчёта указанного сигнала используются спрогнозированные нечёткой системой значения до предыдущего момента времени включительно. Иными словами, синтезированная нечёткая система является рекуррентной.

Точность системы нечёткого вывода может зависеть от количества термов и вида их функций принадлежности. Поэтому были рассмотрены четыре нечёткие системы, лингвистические переменные которых описаны двумя, тремя, пятью и семью термами. Результаты тестирования приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Результаты тестирования нечёткой системы (по скорости)

Класс навигационной ситуации		Количество модельных ситуаций	Точность прогноза скорости							
			Наибольший модуль погрешности, м/с				Средний модуль ошибки, м/с			
		2	Количество термов			Количество термов				
			3	5	7	2	3	5	7	
I		20	2,48	3,33	2,12	2,08	1,62	0,60	0,50	0,58
II	ГС пост.	20	2,28	1,95	1,84	2,49	1,19	0,44	0,40	0,60
	ГС перем.	20	8,71	7,76	7,74	7,85	3,56	0,47	0,53	0,44
III	ГС пост.	20	3,36	3,39	3,33	5,21	1,93	0,69	0,52	0,52
	ГС перем.	20	8,52	7,54	8,87	8,74	3,47	0,65	0,61	0,49
Общий результат		100	8,71	7,76	8,87	8,74	0,70	0,57	0,51	0,52

Таблица 5

Результаты тестирования нечёткой системы (по невязке)

Класс навигационной ситуации		Количество модельных ситуаций	Точность расчёта координат							
			Наибольший максимум невязки, мили				Средний максимум невязки, мили			
		2	Количество термов				Количество термов			
			3	5	7	2	3	5	7	
I		20	10,30	15,1	4,1	10,38	4,13	3,06	1,79	3,2
II	ГС пост.	20	10,67	7,42	6,33	9,2	3,39	2,09	2,18	3,23
	ГС перем.	20	5,79	4,33	5,16	3,31	1,67	1,50	1,63	1,08
III	ГС пост.	20	13,92	8,97	8,50	5,58	2,46	3,06	1,61	1,51
	ГС перем.	20	8,47	6,06	3,97	1,85	2,11	1,60	1,03	0,90
Общий результат		100	13,92	15,1	8,50	10,38	2,75	2,26	1,65	1,99

Результаты тестирования подтверждают предположение о зависимости точности нечёткой системы от количества термов входных и выходных лингвистических переменных. Так как предполагается использование системы для счисления пути судна, то первостепенный интерес представляет именно точность расчёта координат. Наименьшую погрешность в этом отношении демонстрирует система нечёткого вывода, лингвистические переменные которой характеризуются пятью термами. В среднем невязка прогноза траектории составляет 1,65 мили в течение четырех часов плавания. Наибольшее её значение в рассмотренных модельных ситуациях составляет 8,5 миль в течение четырех часов плавания. Что касается прогноза скорости, то лучшие результаты по критерию наибольшего модуля ошибки демонстрирует система, входные и выходные лингвистические переменные которой характеризуются тремя термами.

Следует отметить, что точность прогноза нечёткой системой траектории, как правило, выше в случаях, когда изменение величин, характеризующих гидрометеорологическую ситуацию, носит во времени переменный характер. При этом для скорости дрейфа характерна противоположная ситуация: меньшие значения максимума модуля погрешности её прогноза в рассмотренных модельных ситуациях наблюдаются, как правило, при постоянном характере гидрометеорологической ситуации. Данное явление можно объяснить тем, что задачи прогноза траектории и скорости дрейфа судна представляют собой хоть близкие по цели, но всё же различные задачи. Так, наибольший модуль погрешности скорости дрейфа может принимать большие значения во время плавания в какие-то единичные моменты времени, что в процессе численного интегрирования не окажет существенного влияния на точность счисляемых координат.

Предлагаемый в данной статье вариант использования нечёткой модели для прогноза скорости дрейфа судна основан на алгоритме Мамдани. База правил нечётких продукций формируется на основе эталонных ситуаций, получение которых возможно в ходе натурных наблюдений по мере повседневной эксплуатации судна и основано на классификации вектора входного сигнала. Тестирование нечёткой системы выполнялось на основе 100 модельных ситуаций, характеризующихся различными значениями величин, определяющих управляющие и возмущающие воздействия на судно, а также его кинематических характеристик.

Результаты тестирования показали, что синтезированная нечёткая система позволяет в рассмотренных модельных ситуациях определять траекторию движения судна с приемлемой для навигационных целей средней точностью. При этом предельная ошибка в невязке, фиксируемая в ходе тестирования, достигает значительной величины. Также в результате эксперимента была установлена зависимость погрешности определения при помощи системы параметров движения

судна от количества термов её лингвистических переменных, а также от характера изменения величин, согласно которым формируется входной сигнал. Дальнейших исследований требуют вопросы выбора вида функций принадлежности для термов и их количества, алгоритма формирования базы правил и типа самой нечёткой системы, ответы на которые позволят подойти к решению задачи синтеза нечёткой системы, обладающей заданным уровнем точности. Наиболее перспективными в этом отношении являются гибридные нейронечёткие системы, параметры которых настраиваются в соответствии с особенностями моделируемой динамики объекта.

Список литературы

1. *Дерябин В. В.* Модель движения судна в горизонтальной плоскости / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2013. — № 6. — С. 60–67.
2. *Леоненков А. В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH: науч. изд. / А. В. Леоненков. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 736 с.
3. *Грязнов И. Е.* Особенности построения нечеткого регулятора / И. Е. Грязнов, И. Р. Кравченко // Известия ВОЛГГТУ. — 2008. — № 4. — С. 63–66.
4. *Игнатъев В. В.* Применение нечетких регуляторов, в которых в качестве эталонных используются системы управления с промышленными регуляторами / В. В. Игнатъев, И. С. Коберси // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 2 (139). — С. 123–127.
5. *Кудинов Ю. И.* Нечеткие регуляторы и системы управления / Ю. И. Кудинов, И. Н. Дорохов, Ф. Ф. Пашенко // Проблемы управления. — 2004. — № 3. — С. 2–14.
6. *Усков А. А.* Системы с нечеткими моделями объектов управления: монография / А. А. Усков — Смоленск: Изд-во Смоленского филиала Российского ун-та кооперации, 2013. — 153 с.
7. *Riid A.* Transparent Fuzzy Systems: Modeling and Control: PhD Thesis / A. Riid. — Tallinn Technical University: Department of Computer Control. Tallinn (Estonia). — 2002. — 227 p.
8. *Mamdani E. H.* An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller / E. H. Mamdani // Int. J. Man-Machine Studies. — 1975. — Vol. 7. — P. 1–13.
9. *Дерябин В. В.* Прогнозирование скорости дрейфа судна на основе нейронной сети / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2014. — № 5. — С. 3–7.
10. *Fossen T. I.* Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control / Thor I. Fossen. — Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. — 575 p.
11. *Hana S.* Design of a Heading Autopilot for an Oil Tanker / S. Hana, S. Lansing // ECE147C/ME106 Project. — 2007. — № 2. — P. 1–10.

УДК 656.61.052, 551.465.553

Н. Д. Крюков,
асп.;

В. А. Шматков,
д-р техн. наук, проф.

УЧЁТ ТЕЧЕНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВЕТРОМ, ПРИ ПЛАВАНИИ СУДОВ

ACCOUNT OF WIND CURRENTS IN NAVIGATION

Рассмотрены вопросы учёта течений при плавании судов в открытом море, в том числе учёт течений, генерируемых ветром. Описана классическая теория Экмана. Показано, что в течение последнего