

УДК 519.68:15:681.5

**Б. С. Головченко,**  
инженер;

**В. М. Гриняк,**  
канд. техн. наук, доц.;

**А. С. Девятисильный,**  
д-р техн. наук, проф.

## НЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ ОПАСНОМ СБЛИЖЕНИИ МОРСКИХ СУДОВ

### FUZZY LOGIC DECISION-MAKING SYSTEM FOR SHIPS COLLISION AVOIDANCE

*Статья посвящена проблеме управления коллективным движением морских судов. В работе рассматривается модель относительного движения двух судов и предлагается алгоритм выработки тревожных сигналов различного типа в соответствии с вербальным уровнем опасности «судно-судно». В основу разделения навигационных ситуаций по уровням опасности положены интенсивность маневрирования судов и время, оставшееся до недопустимого сближения. Предложена нечеткая система принятия решения об уровне опасности движения, сочетающая в себе системы нечеткого вывода Сугено и Мамдани. Приведены результаты вычислительного эксперимента, демонстрирующего работу системы в типичных ситуациях и натурных испытаний системы на основе реальных данных о движении судов в акватории, прилегающей к порту Владивосток.*

*The problem of marine vessel traffic control is discussed in this paper. Two ships relative motion model is watched and algorithm of alarm generation is offered. Authors are justifying need separate ships by alarm level in case high intensity of traffic. Ships alarm level estimation based on ship maneuver detector and time to collision. The decision-making system of alarm level based on fuzzy logic system (ANFIS) is offered. It is possible to learn of fuzzy logic system by expert and by training sample for learning. Numerical results are demonstrating decision-making system effectiveness for typical vessel traffic and for traffic of Vladivostok port.*

*Ключевые слова: управление движением судов, опасное сближение, траектория движения, маневрирование судна, нечеткая система.*

*Key words: vessel traffic control, collision avoidance, trace, ship maneuver, fuzzy logic system, ANFIS.*

*Работа поддержана грантом РФФИ, проект №15-08-00234А*

**У**ПРАВЛЕНИЕ коллективным движением судов является исключительно емкой научно-технической задачей, изучение которой представляет собой отдельную самостоятельную часть науки об управлении [1]. На практике такое управление реализуется береговыми системами управления движением судов (СУДС) — специализированными предприятиями, основной задачей которых является предотвращение опасных ситуаций, в частности, недопущение опасного сближения судов. Информационной базой современных СУДС являются двухкоординатные радиолокационные станции (РЛС) кругового обзора, дополняемые средствами спутниковой навигации — транспондерами автоматической идентификационной системы (АИС) [2].

Методологической основой распознавания опасного сближения судов является оценка параметров траектории движения каждого судна (координат, скоростей и т.д.) и их экстраполяция. Если суда идентифицированы как опасно сближающиеся, то система управления движением генерирует тревожный сигнал и рекомендации по изменению их траектории.

Управленческое решение, обеспечивающее безопасное движение, зависит от ряда факторов, а именно: скорости судов, расстояния между ними, их размеров, маневренности, характе-

ристик траектории и др. При этом прогнозирование движения судов всегда несет в себе элемент неопределенности, что требует формализации вербального понятия «опасная ситуация» с выделением различных уровней опасности типа «очень опасный», «опасный», «безопасный» и т.д. Такой подход предоставляет возможность судоводителю и оператору береговой СУДС упорядочить свои действия: принимать различные типы решений в ситуациях с различным уровнем опасности и, тем самым, понизить степень неопределенности при принятии конкретного решения.

В работе [3] авторами рассматривалась трехуровневая система принятия решения об опасном сближении судов, в которой признаком, оказывающим влияние на принятие решения об уровне опасности, является характер движения судов (маневрирующие суда считаются менее опасными, чем движущиеся прямолинейно и равномерно). Существенным недостатком данной системы является дискретность величины, описывающей уровень опасности, что затрудняет ее использование при высокой интенсивности движения судов (слишком большое количество судов одновременно имеют один и тот же уровень опасности).

В настоящей работе проведено исследование системы предупреждения об опасном сближении судов, обеспечивающей распознавание опасных ситуаций, и выполняющей оценку уровня опасности непрерывной величиной с использованием идей систем нечеткой логики.

При моделировании навигационной безопасности движения судов прибегнем к традиционным приближениям. Во-первых, безопасность коллективного движения будем интерпретировать моделью безопасности «судно – судно» для каждой пары судов. Во-вторых, в силу того, что контролируемая СУДС акватория ограничена размерами порядка 20–30 км, моделирование будем осуществлять в местной декартовой системе координат. Такой подход применяется во многих известных алгоритмах предупреждения столкновений судов. Если в качестве информационной базы СУДС используется GPS/ГЛОНАСС, то измерение траектории каждого судна включает его координаты, скорость и курс [2].

Пусть  $oxy$  — правая ортогональная система координат с осью  $y$ , направленной на север, и осью  $x$ , направленной, соответственно, на Восток. Рассмотрим два судна с координатами  $x^{(1)}$ ,  $y^{(1)}$  и  $x^{(2)}$ ,  $y^{(2)}$ , скоростями  $v^{(1)}$  и  $v^{(2)}$  и курсами  $k^{(1)}$  и  $k^{(2)}$ . Будем описывать их коллективное движение набором величин  $(r_x, r_y, v_x, v_y)^T$  — вектором состояния коллективного движения двух судов, где  $r_x = x^{(2)} - x^{(1)}$ ,  $r_y = y^{(2)} - y^{(1)}$  — компоненты вектора относительного положения судов  $\mathbf{r}$ ,  $v_x = v^{(1)} \sin(k^{(1)}) - v^{(2)} \sin(k^{(2)})$ ,  $v_y = v^{(1)} \cos(k^{(1)}) - v^{(2)} \cos(k^{(2)})$  — компоненты вектора скорости относительного движения судов  $\mathbf{v}$  (рис. 1).

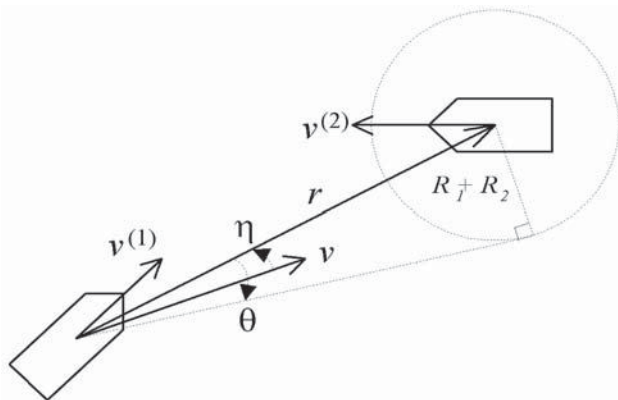


Рис. 1. Модель относительного движения пары «судно – судно»

Примем следующие модельные представления об эволюции вектора состояния коллективного движения:

$$\begin{aligned} r_x(t_{i+1}) &= r_x(t_i) - v_x(t_i)\tau + q_{rx}(t_i); \\ r_y(t_{i+1}) &= r_y(t_i) - v_y(t_i)\tau + q_{ry}(t_i); \\ v_x(t_{i+1}) &= v_x(t_i) + q_{vx}(t_i); \\ v_y(t_{i+1}) &= v_y(t_i) + q_{vy}(t_i). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\tau = t_{i+1} - t_i$  — разность между соседними моментами времени, в течение которых проходят измерения;  $q_{rx}(t_i)$ ,  $q_{ry}(t_i)$ ,  $q_{vx}(t_i)$ ,  $q_{vy}(t_i)$  — случайные не моделируемые параметры движения.

Принятая модель относительного движения судов (1) является кинематической. Такие модели типичны в задачах наблюдения движущихся объектов при отсутствии информации о силах и моментах, обуславливающих движение.

Имеем следующие уравнения измерений:

$$\begin{aligned} z_{rx}(t_i) &= r_x(t_i) + p_{rx}(t_i); \\ z_{ry}(t_i) &= r_y(t_i) + p_{ry}(t_i); \\ z_{vx}(t_i) &= v_x(t_i) + p_{vx}(t_i); \\ z_{vy}(t_i) &= v_y(t_i) + p_{vy}(t_i); \\ i &= \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $z_{rx}(t_i), z_{ry}(t_i)$  — измерения соответствующих проекций вектора относительного положения судов, полученные в момент времени  $t_i$ ;  $z_{vx}(t_i), z_{vy}(t_i)$  — измерения соответствующих проекций вектора относительной скорости движения судов, полученные в момент времени  $t_i$ ;  $p_{rx}(t_i), p_{ry}(t_i), p_{vx}(t_i), p_{vy}(t_i)$  — случайные инструментальные ошибки измерений;  $N$  — число измерений.

Решением систем уравнений (1) и (2) является оценка вектора состояния коллективного движения двух судов  $\hat{\mathbf{s}} = (\hat{r}_x, \hat{r}_y, \hat{v}_x, \hat{v}_y)^T$  в каждый момент времени  $t_i$ .

Совокупность величин  $r_x, r_y, v_x, v_y$  свидетельствует о потенциально опасном движении двух судов в случае выполнения следующих неформальных условий:

- направление вектора скорости относительного движения судов  $\mathbf{v}$  близко к направлению вектора относительного положения судов  $\mathbf{r}$ ;
- время, оставшееся до максимального сближения судов, ниже допустимого.

Формализация этих условий определяется конкретной трактовкой понятия «опасная ситуация».

Опыт практического судовождения показывает, что наибольшее значение для обеспечения безопасного плавания имеет соблюдение некой «зоны безопасности» вокруг судна, называемой также *корабельным доменом* [1], [4], в которую другие суда не допускают вторжения. В настоящей работе рассматривается корабельный домен статического типа, жестко привязанный к судну с номером  $n$  и интерпретируемый окружностью заданного радиуса  $R_n$ .

Введем следующие величины (см. рис. 1):

$$|r| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} \text{ — расстояние между судами;}$$

$$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \text{ — скорость относительного движения судов;}$$

$$\theta = \arcsin \frac{R_1 + R_2}{|r|} \text{ — угол, определяемый расстоянием между судами и размерами их доменов.}$$

Считается, что в безопасном состоянии корабельные домены не должны «вторгаться» в область друг друга;

$$\eta = \arccos \frac{r_x v_x + r_y v_y}{|r| |v|} \text{ — угол между векторами } \mathbf{r} \text{ и } \mathbf{v};$$

$$\frac{d|r|}{dt} = -\frac{r_x v_x + r_y v_y}{|r|} \text{ — скорость изменения расстояния между судами;}$$

$$T = -\frac{|r|^2}{r_x v_x + r_y v_y} \text{ — приближенное время, оставшееся до максимального сближения судов.}$$

Потенциально опасное сближение двух судов может быть формализовано следующим образом (считается, что все функции доопределены для корректного вычисления углов и их разностей):

$$\eta < \theta; \quad (3)$$

$$0 < T < T^*, \quad (4)$$

где  $T^*$  — пороговое значение времени.

Условие (3) формализует опасную ситуацию при последующем равномерном и прямолинейном движении судов; условие (4) отбирает из общего массива лишь те суда, время до сближения которых меньше порогового.

Что касается маневрирующих судов, то опыт практического судовождения показывает, что при внешнем наблюдении маневрирующие и не маневрирующие суда, с точки зрения

коллективной безопасности их движения, имеют принципиальные различия. Во-первых, при внешнем наблюдении достоверный прогноз траектории маневрирующего объекта невозможен [5]. Во-вторых, на практике маневрирование судна, как правило, свидетельствует о попытке судоводителя придать движению безопасный характер и о его контроле над ситуацией. Поэтому с точки зрения внешнего наблюдения для маневрирующего объекта вербальный уровень опасности заведомо ниже, чем для не маневрирующего. Эта особенность задачи является побудительным мотивом оценки не только набора величин  $r_x, r_y, v_x, v_y$  и условий (3), (4), но и дополнительного определения характера движения судов (прямолинейное и равномерное или маневренное).

Таким образом, в настоящей работе ставится задача нахождения по измерениям координат, скоростей и курса каждого судна вектора состояния коллективного движения двух судов  $(r_x, r_y, v_x, v_y)^T$ , определения характера движения судов и формулировки вывода о той или иной степени опасности сложившейся навигационной ситуации.

Запишем уравнения (1) и (2) в обобщенном виде «состояние – измерение»:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(t_{i+1}) &= \Phi \mathbf{s}(t_i) + \mathbf{q}(t_i); \\ \mathbf{z}(t_i) &= H \mathbf{s}(t_i) + \mathbf{p}(t_i). \end{aligned} \quad (5)$$

Модель оценки вектора состояния  $\mathbf{s}(t)$  по измерениям  $\mathbf{z}(t)$  может быть представлена следующим уравнением:

$$\hat{\mathbf{s}}(t_{i+1}) = \Phi \hat{\mathbf{s}}(t_i) + K(\mathbf{z}(t_{i+1}) - H\Phi \hat{\mathbf{s}}(t_i)). \quad (6)$$

Здесь  $\hat{\mathbf{s}}(t_i)$  — оценка вектора состояния;  $\Phi, H$  — матрицы, определяемые уравнениями (1) и (2) соответственно,  $K$  — матричный параметр.

Известно множество подходов к заданию матрицы  $K$ . В настоящей работе выбор сделан в пользу популярного в практических приложениях алгоритма Калмана [6]. В этом алгоритме коэффициенты матрицы  $K$  зависят от порядкового номера момента времени, прошедшего с начала итерационной процедуры (6). Применительно к рассматриваемой задаче коэффициенты матрицы  $K$  будут уменьшаться от итерации к итерации. Это приведет к тому, что с ростом числа итераций алгоритм (6) будет успешно оценивать параметры траектории судов, движущихся прямолинейно и равномерно, но он не сможет быть использован для качественной оценки траектории маневрирующих судов. Данная особенность алгоритма позволяет наряду с оценкой координат и скорости движения судна определить характер его движения. Идея такого определителя маневра была предложена авторами в работе [7].

Пусть  $\hat{\mathbf{s}}^{(j)}(t_i)$  — оценка вектора состояния  $\mathbf{s}(t_i)$ , полученная итерационным алгоритмом (6) при обработке  $J$  последних измерений. Если при этом задача одновременно решается при  $J, J-1, J-2, \dots$ , и, наконец, только при одном измерении, то в момент времени  $t_i$  будем иметь кортеж векторов оценки:

$$\hat{S}^{(j)}(t_i) = \{\hat{\mathbf{s}}^{(1)}(t_i), \hat{\mathbf{s}}^{(2)}(t_i), \dots, \hat{\mathbf{s}}^{(j-1)}(t_i), \hat{\mathbf{s}}^{(j)}(t_i)\}. \quad (7)$$

Введем вектор  $\delta \mathbf{z}(t_{i+1}) = \mathbf{z}(t_{i+1}) - H\Phi \hat{\mathbf{s}}(t_i)$ , характеризующий невязку измерения при оценке вектора состояния уравнением (6). Пусть  $\|\delta \mathbf{z}(t_i)\|^{(j)}$  — евклидова норма вектора невязки, полученного в момент времени  $t_i$  при реализации итерационного алгоритма (6), обрабатывающего  $J$  последних измерений. Таким образом, при сопровождении объекта в каждый момент времени  $t_i$  наряду с кортежем векторов оценки (7) будем иметь кортеж норм векторов невязок:

$$d^{(j)}(t_i) = \{\|\delta \mathbf{z}(t_i)\|^{(1)}, \|\delta \mathbf{z}(t_i)\|^{(2)}, \dots, \|\delta \mathbf{z}(t_i)\|^{(j-1)}, \|\delta \mathbf{z}(t_i)\|^{(j)}\} \quad (8)$$

элементы которого являются основным информативным признаком, характеризующим качество оценки алгоритмом с тем или иным значением  $J$ . Для дальнейшего анализа качества оценки целесообразно перейти к кортежу относительных величин:

$$\Delta^{(j)}(t_i) = \{L^{(1)}(t_i), L^{(2)}(t_i), \dots, L^{(j-1)}(t_i), L^{(j)}(t_i)\} \quad (9)$$

где  $L^{(j)}(t_i) = \frac{\|\delta \mathbf{z}(t_i)\|^{(j)}}{\sigma}$ ;  $\sigma$  — величина, характеризующая среднеквадратичное отклонение евклидовой нормы вектора погрешностей измерений  $\mathbf{p}(t_i)$  в уравнении (5).

Введем лингвистическую переменную  $Q^{(j)}(t_i)$  «качество оценки алгоритмом (6) по  $j$  последним измерениям» с термами «Good» («хорошее») и «Bad» («плохое»). Пусть термы имеют следующие функции принадлежности типа «дополнение», определенные на универсальном множестве  $L = [0,3]$ :

$$\mu_{\text{Good}}(L) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_L(L - c_L))},$$

$$\mu_{\text{Bad}}(L) = \frac{1}{1 + \exp(-a_L(L - c_L))},$$

где  $a_L, c_L$  — настраиваемые параметры.

Пусть переменные  $Q^{(j)}(t_i)$  обрабатываются машиной нечеткого вывода Сугено [8], на вход которой подается кортеж величин (9), а на выходе формируется числовое значение  $m \in [1, J]$  — вещественное число, соответствующее максимальному количеству измерений, дающих качественную оценку вектора состояния  $s(t_i)$  и характеризующее степень интенсивности маневрирования судов (чем меньше  $m$ , тем интенсивнее маневр). Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в табл. 1.

Таблица 1

**Система правил машины нечеткого вывода Сугено**

Правило	$Q^{(1)}(t_i)$	$Q^{(2)}(t_i)$	$Q^{(3)}(t_i)$	...	$Q^{(j-1)}(t_i)$	$Q^{(j)}(t_i)$	$m$
1	Good	Good	Good	...	Good	Good	$J$
2	Good	Good	Good	...	Good	Bad	$J-1$
3	Good	Good	Good	...	Bad	Bad	$J-2$
...	...	...	...	...	...	...	...
$J-1$	Good	Good	Bad	...	Bad	Bad	2
$J$	Good	Bad	Bad	...	Bad	Bad	1
$J+1$	Bad	Bad	Bad	...	Bad	Bad	1

Введем лингвистическую переменную  $P(t_i)$  «характер движения судна в момент времени  $t_i$ » с термами «Maneuverable» (маневренное) и «Constant» (равномерное). Пусть термы имеют следующие функции принадлежности типа «дополнение», определенные на универсальном множестве  $m \in [1, J]$ :

$$\mu_{\text{Maneuverable}}(m) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_m(m - c_m))},$$

$$\mu_{\text{Constant}}(m) = \frac{1}{1 + \exp(-a_m(m - c_m))},$$

где  $a_m, c_m$  — настраиваемые параметры.

Введем величину  $\alpha = \frac{\eta}{\theta}$  — оцененное отношение угла между векторами  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{v}$  к углу  $\theta$ . Введем лингвистическую переменную  $D(t_i)$  «оценка отношения  $\alpha$  в момент времени  $t_i$ » с термами «Big» («большая») и «Little» («малая») и функциями принадлежности типа «дополнение», определенными на универсальном множестве  $\alpha \in [0,2]$ :



$$\mu_{\text{Little}}(\alpha) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_\alpha(\alpha - c_\alpha))};$$

$$\mu_{\text{Big}}(\alpha) = \frac{1}{1 + \exp(-a_\alpha(\alpha - c_\alpha))}.$$

Здесь  $a_\alpha, c_\alpha$  — настраиваемые параметры. Терм «Little» соответствует ситуации, когда возможно опасное сближение судов, терм «Big» — безопасной ситуации.

Для описания величины  $T$  (приближенное время, оставшееся до максимального сближения судов) введем лингвистическую переменную  $F(t)$  «оценка величины  $T$  в момент времени  $t$ » с термами «Little» («малое»), «Average» («среднее») и «Large» («большое») и функциями принадлежности типа «кластер», определенными на универсальном множестве  $T \in [0, 2000]$  с:

$$\mu_{\text{Little}}(T) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_1^T(T - c_1^T))};$$

$$\mu_{\text{Average}}(T) = \exp\left(-\frac{(T - c_2^T)^2}{a_2^T}\right);$$

$$\mu_{\text{Large}}(T) = \frac{1}{1 + \exp(-a_3^T(T - c_3^T))}.$$

Здесь  $a_1^T, c_1^T, a_2^T, c_2^T, a_3^T, c_3^T$  — настраиваемые параметры.

Описание лингвистической переменной  $F(t)$  тремя термами соответствует трем принятым на практике состояниям времени максимального сближения [9]. В данном случае терм «Little» определяет время, когда существует возможность принятия только одного решения, которое поможет избежать столкновения, терм «Average» — время, необходимое для грамотного проведения оптимального маневра, т.е. время, когда начинать маневр уже не рано, но еще есть время исправить результат ошибочного маневрирования, сделать «вторую попытку»; это период, когда критическая ситуация пока еще не возникла. Терм «Large» описывает время, когда еще нет никакого смысла предпринимать какие-либо действия, так как ситуация может измениться и это потребует, возможно, выполнения совсем другого маневра.

Уровень опасности ситуации  $U$  будем описывать лингвистической переменной  $A(t)$  «уровень опасности в момент времени  $t$ » с термами «Green» («безопасно»), «Yellow» («почти безопасно») и «Red» («опасно») и функциями принадлежности типа «кластер», определенными на универсальном множестве  $U[0, 2]$ :

$$\mu_{\text{Green}}(U) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_1^U(U - c_1^U))};$$

$$\mu_{\text{Yellow}}(U) = \exp\left(-\frac{(U - c_2^U)^2}{a_2^U}\right);$$

$$\mu_{\text{Red}}(U) = \frac{1}{1 + \exp(-a_3^U(U - c_3^U))}.$$

Здесь  $a_1^U, c_1^U, a_2^U, c_2^U, a_3^U, c_3^U$  — настраиваемые параметры. Переменные  $P(t_i), D(t_i)$  и  $F(t_i)$  обрабатываются машиной нечеткого вывода Мамдани [8], на вход которой подаются величины  $m, \alpha$  и  $T$ , а на выходе формируется числовое значение  $U \in [0, 2]$  — уровень опасности навигационной си-

туации «судно – судно»; значение  $U = 0$  соответствует наименьшему уровню опасности,  $U = 2$  — наибольшему.

Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в табл. 2. Так, *правило 8* табл. 2 соответствует ситуации, когда суда могут недопустимо сблизиться, если не изменят траекторию движения, но имеется достаточный запас времени для выбора наиболее подходящего маневра, *правило 9* — ситуации, когда нужно начинать маневр уклонения как можно быстрее, *правило 12* — ситуации, когда суда могут недопустимо сблизиться, если не изменят траекторию, однако, скорее всего, они уже начали маневр уклонения.

Таблица 2

Система правил машины нечеткого вывода Мамдани

Правило	$D(t_i)$	$P(t_i)$	$F(t_i)$	$P_U$
1	Big	Constant	Large	Green
2	Big	Constant	Average	Green
3	Big	Constant	Little	Green
4	Big	Maneuverable	Large	Green
5	Big	Maneuverable	Average	Green
6	Big	Maneuverable	Little	Green
7	Little	Constant	Large	Green
8	Little	Constant	Average	Yellow
9	Little	Constant	Little	Red
10	Little	Maneuverable	Large	Green
11	Little	Maneuverable	Average	Green
12	Little	Maneuverable	Little	Yellow

Работу нечеткой системы предупреждения об опасном сближении судов можно, таким образом, окончательно представить схемой, приведенной на рис. 2.

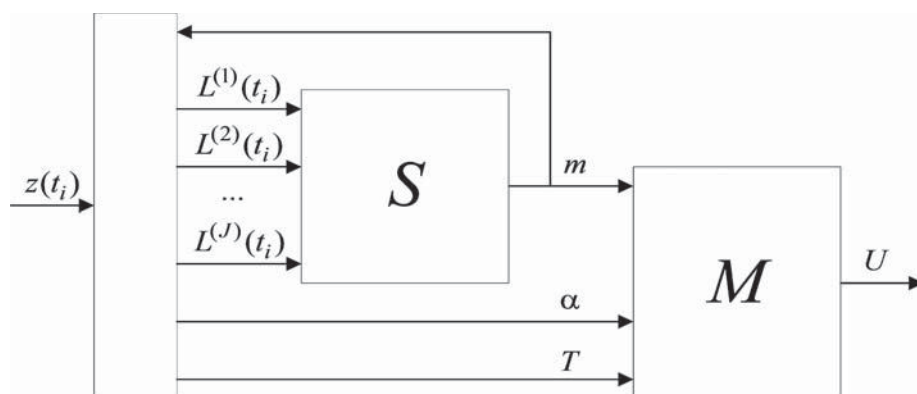


Рис. 2. Схема работы нечеткой системы предупреждения об опасном сближении судов

Измеренные данные об относительном движении судов  $z(t_i)$  поступают на вход алгоритма, оценивающего вектор состояния  $s(t_i)$  системы (6) и формирующего кортеж (9). Далее машина нечеткого вывода Сугено  $S$  оценивает степень интенсивности маневрирования судов  $m$ . С учетом этого значения из кортежа (8) выбирается вектор  $\hat{s}^{(m)}(t_i)$ , на основе которого вычисляются величини-

ны  $\alpha$  и  $T$ . Затем величины  $m$ ,  $\alpha$  и  $T$  подаются на вход машины нечеткого вывода Мамдани  $M$ , выходом которой является уровень опасности ситуации  $U \in [0,2]$ .

Настройка рассмотренной системы состоит в задании максимального количества измерений  $J$ , параметров функций принадлежности  $a_m, c_m, a_\alpha, c_\alpha, a_1^T, c_1^T, a_2^T, c_2^T, a_3^T, c_3^T, a_1^U, c_1^U, a_2^U, c_2^U, a_3^U, c_3^U$  и величины  $\sigma$ , характеризующей погрешность измерений.

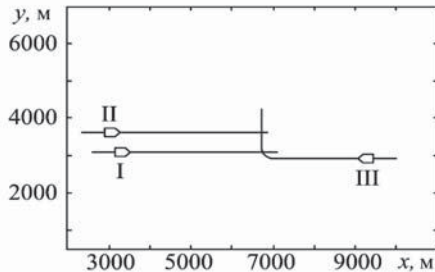


Рис. 3. Моделируемые траектории движения судов

Для демонстрации работы описанной системы рассмотрим модельный пример для трех судов. Два из них (*I* и *II*) движутся со скоростью 5 м/с прямолинейно и равномерно, третье (*III*) — маневрирует (рис. 3).

Было принято, что измерения поступают каждые  $\tau = 3$  с. С учетом типичных измерительных погрешностей GPS  $\sigma$  было принято равным 15. Максимальное количество измерений для оценки траектории  $j$  было взято равным 10. Значения коэффициентов функций принадлежности были взяты таким образом, что функции приобрели вид, показанный на рис. 4. В данном случае все функции принадлежности задаются экспертом, нечеткая система не подвергается настройке на обучающей выборке, хотя такой вариант обучения принципиально возможен.

система не подвергается настройке на обучающей выборке, хотя такой вариант обучения принципиально возможен.

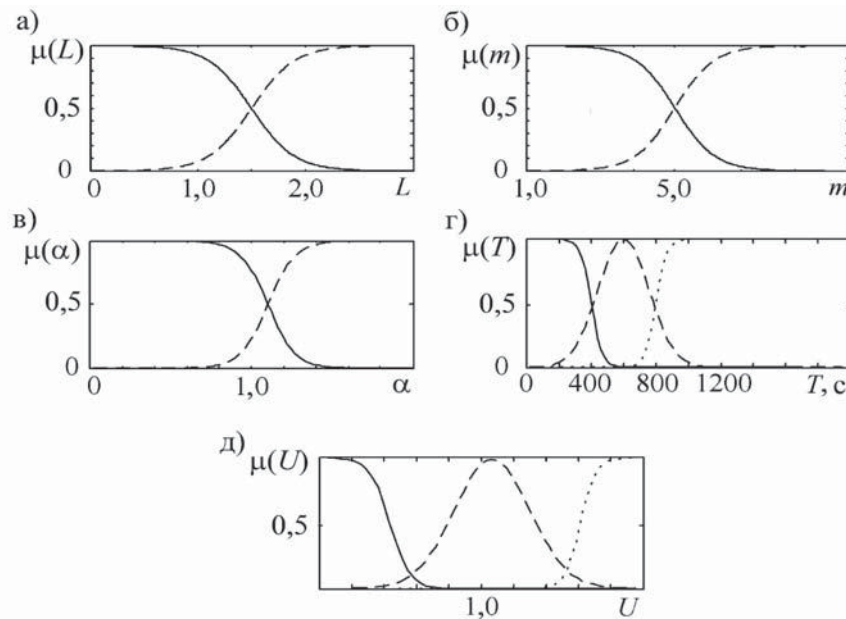


Рис. 4. Функции принадлежности нечеткой системы:

$a$  —  $\mu_{\text{Good}}(L)$  — сплошная;  $\mu_{\text{Bad}}(L)$  — пунктир;  $b$  —  $\mu_{\text{Maneuverable}}(m)$  — сплошная;  $\mu_{\text{Constant}}(m)$  — пунктир;  
 $v$  —  $\mu_{\text{Little}}(\alpha)$  — сплошная;  $\mu_{\text{Big}}(\alpha)$  — пунктир;  $г$  —  $\mu_{\text{Little}}(T)$  — сплошная;  $\mu_{\text{Average}}(T)$  — пунктир;  
 $\mu_{\text{Large}}(T)$  — точки;  $d$  —  $\mu_{\text{Green}}(U)$  — сплошная;  $\mu_{\text{Yellow}}(U)$  — пунктир;  $\mu_{\text{Red}}(U)$  — точки

На рис. 5а и б показаны значения  $\alpha$ , на рис. 5в и г — значения  $m$ , на рис. 5д и е — значения  $T$ , на рис. 5ж и з — значения  $U$ . Штриховкой на рис. 5ж и з обозначена зона уровня опасности «Yellow», ниже нее — зона уровня «Green», выше — зона уровня «Red». Из рис. 5д видно, что уровень опасности для пары судов *I* — *III* постоянно повышается, по мере их сближения, достигая уровня «Red» при  $t = 350$  с. При  $t = 600$  с судно *III* начинает маневр уклонения поворотом вправо, после чего уровень опасности для пары судов *I* — *III* быстро снижается до уровня «Yellow» и затем до уровня «Green». Из рис. 5з видно, что суда *II* и *III* вначале движутся безопасно. Однако после начала судном *III* маневра уровень опасности для пары судов *II* — *III* скачко-



образно увеличивается до «Yellow», а, затем, по мере продолжения поворота судна III, снижается до уровня «Green».

Снижение уровня тревоги с максимального «Red» до «Yellow» происходит почти сразу после начала маневрирования (рис. 5ж), для судов II и III генерация уровня тревоги «Yellow» также происходит заблаговременно (рис. 5з). Это свидетельствует о способности предлагаемой нечеткой системы как к предупреждению об опасности, так и к фильтрации ложных тревог. Подтверждается ожидаемый эффект разделения уровней опасности в зависимости от траекторных свойств движения судов.

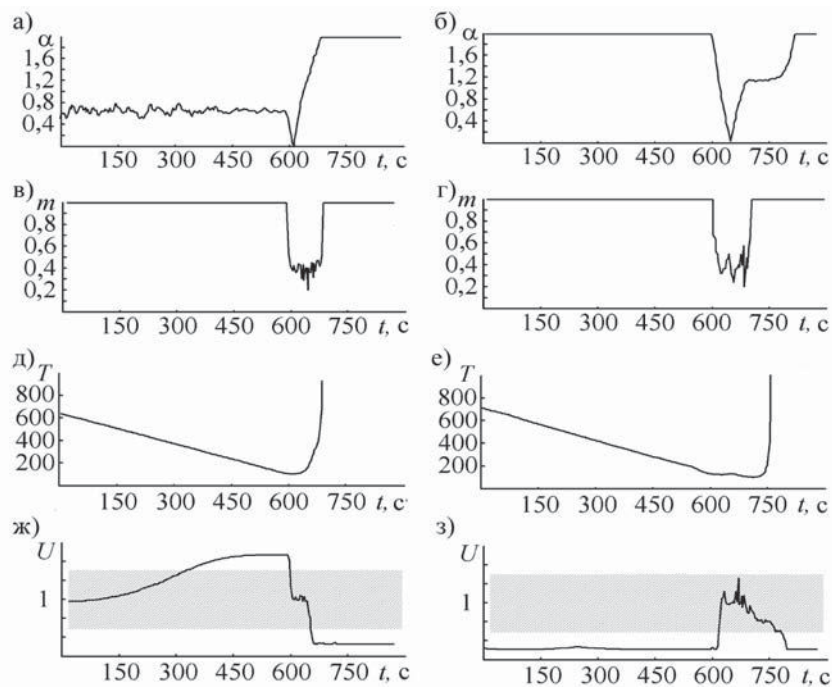


Рис. 5. Работа нечеткой системы предупреждения об опасном сближении морских судов для судов I-III (левая колонка рисунков) и II-III (правая колонка рисунков)

Испытание разработанной системы проводилось на основе реальных данных о движении судов по акватории, прилегающей к порту Владивосток [10]. Приведенный на рис. 6 типичный пример был получен по результатам анализа данных о движении судов в течение одних суток летом 2013 г. В это время в зоне ответственности СУДС одновременно находилось около 80 судов. На рис. 6 показано положение судов на акватории в те моменты времени, когда для них был сгенерирован тревожный сигнал уровня «Yellow» (желтые кружки) или «Red» (красные кружки). Видно, что наибольшее количество тревог возникает во внутренних портовых водах, где суда располагаются близко друг к другу и высока интенсивность движения малых плавсредств (катеров, буксиров). Оба уровня тревоги имеют место также при движении судов вне портовых вод: Амурском (слева) и Уссурийском (справа) заливах, проливе Босфор Восточный. Доля тревожных сигналов уровня «Yellow» составляет около 20 %, места их генерации не образуют устойчивых зон.

Для оператора (диспетчера) СУДС генерация тревожного сигнала уровня «Red» означает, что необходимо немедленно обратить внимание на ситуацию и принять решение о вмешательстве/невмешательстве в действия судоводителя. Генерация тревожного сигнала уровня «Yellow» означает, что хотя ситуация не является полностью безопасной, вмешиваться в нее немедленно не следует: скорее всего, судоводитель сам контролирует обстановку. Другими словами, если одновременно с ситуацией уровня «Yellow» для других судов имеются ситуации уровня «Red», то оператор СУДС должен работать, прежде всего, с ними. Тот факт, что на конкретной акватории доля

ситуаций уровня «Yellow» достаточно значительна (20 %), свидетельствует о том, что их выделение способно существенно снизить нагрузку на операторов СУДС.

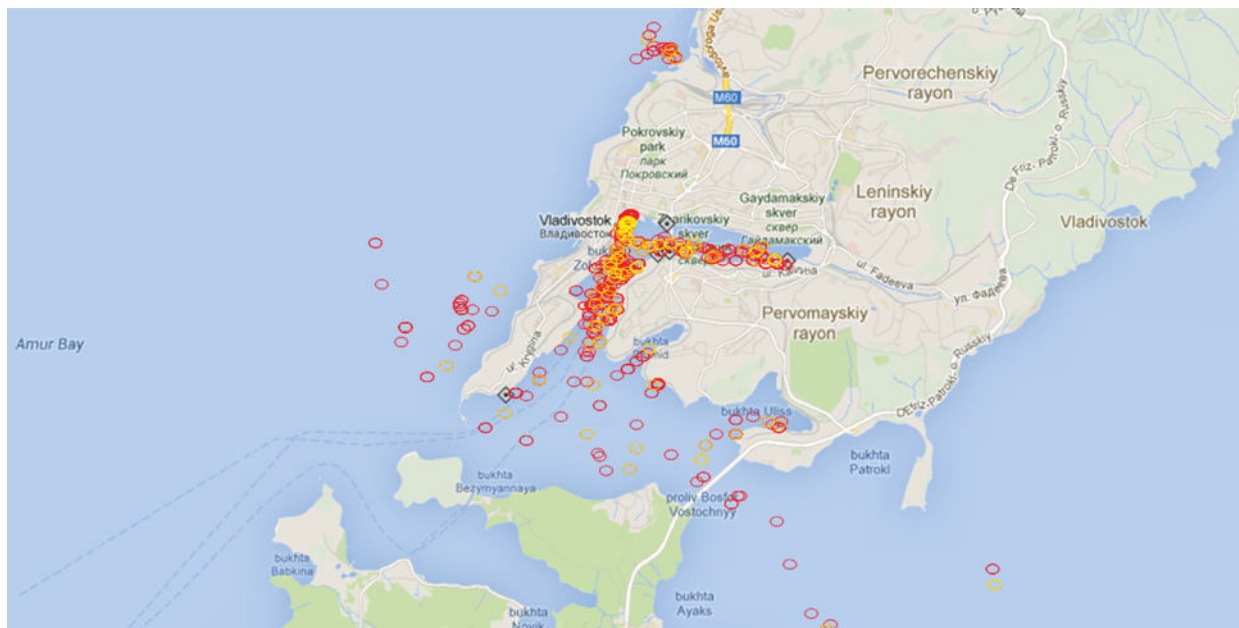


Рис. 6. Движение судов по акватории порта Владивосток

Таким образом, испытание разработанной системы на основе реальных данных о движении судов подтвердило ее работоспособность и эффективность, а также перспективность практического использования. Предложенная цветовая интерпретация уровней тревоги интуитивно понятна судоводителям и операторам СУДС, она способствует принятию адекватных управленческих решений и направлена на повышение безопасности движения. Результаты работы ориентированы на расширение навигационных функций современных систем управления движением судов.

### Список литературы

1. Tam Ch. K. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / Ch. K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // J. of Navigation. — 2009. — Vol. 62. — № 3. — P. 455–471.
2. Маринич А. Н. Судовая автоматическая идентификационная система АИС / А. Н. Маринич. — М.: Судостроение, 2004. — 180 с.
3. Гриняк В. М. Прогнозирование опасных ситуаций при управлении движением на море / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2004. — № 3. — С. 127 — 136.
4. Егоров И. Б. Концепция зон навигационной безопасности и ее применение в судовождении / И. Б. Егоров, В. А. Логиновский // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3. — С. 13 — 17.
5. Мироненко А. А. Модель программного движения судна в стесненных водах / А. А. Мироненко // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 2. — С. 65–70.
6. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление / Дж. Медич. — М.: Энергия, 1973. — 440 с.
7. Гриняк В. М. Нечеткое сопровождение траектории движения судна / В. М. Гриняк, М. В. Трофимов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 119–124.
8. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. — М.: Физматлит, 2001. — 224 с.

9. Коноплев М. А. Применение аппарата нечеткой логики для определения уровня опасности столкновения / М. А. Коноплев // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 2. — С. 34–39.

10. Головченко Б. С. Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории / Б. С. Головченко, В. М. Гриняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2. — С. 156–162.

**УДК 656.61.052**

**В. Е. Львов,**  
ассист.

## **КОМПЕНСАЦИЯ ВОЛНОВОГО И ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА**

### **COMPENSATION OF WAVE AND WIND EFFECTS ON THE SHIP'S COURSE MANAGEMENT SYSTEM**

*Рассмотрена система управления курсом в шторм, в которую введены новые элементы и установлены функциональные связи по ветру и волнению, которые позволяют повысить надежность работы системы, ее быстродействие и экономичность, особенно в штормовых условиях. Выполнено введение в контур регулирования устройств расчета угла ветрового и волнового дрейфа и введение их значений в датчик курса, что позволило повысить точность управления по заданному курсу. Рассмотрен способ повышения точности определения угла компенсации за счет учета волновой составляющей, что позволяет уменьшить нагрузку на рулевую машину и создает условия для оптимизации ее использования в шторм и автоматизации управления судном при движении по криволинейным траекториям. Приведённые результаты могут быть использованы в бортовых системах управления на судне, учебном процессе на старших курсах морских учебных заведений и на курсах повышения квалификации.*

*Achieved an introduction to the control circuit device for calculating the angle of wind and wave drift and the introduction of their values in the course of the dial, thus improving the accuracy of control for a given course. Look at ways to improve the accuracy of determining the angle compensation by taking into account the wave component, which reduces the load on the steering apparatus and creates conditions for the optimization of its use in a storm and automation control of the vessel when driving through curves.*

*These results can be used in on-board control systems on board, the educational process in the senior class of maritime education and training courses.*

*Ключевые слова: система управления курсом, новые функциональные связи, расчет угла ветрового и волнового дрейфа, угол компенсации, оптимизация работы рулевой машины в шторм.*

*Key words: control system by a course, new functional connections, calculation of corner of wind and wave drift, corner of indemnification, optimization of work of steering machine in a storming weather.*

**В**НЕШНИЕ возмущения на судно как объект управления движением формируются в условиях ветра, волнения, течения и воздействия мелководья. Проявление внешних возмущений связано с увеличением сопротивления движению, существенным ухудшением управляемости, падением скорости хода и изменением посадки судна. Расчетные алгоритмы по учету их влияния на процесс маневрирования в настоящее время созданы не для всех видов возмущений.

Оценка внешних сил волновой природы представляет сложный теоретико-экспериментальный процесс. Известен ряд исследований в этой области, выполненный специалистами в области гидромеханики судна. Полученные результаты могут быть использованы при создании систем автоматической стабилизации судов на курсе.