

5. Астреин В.В., С.И. Кондратьев, Хекерт Е.В. Алгоритм самоорганизации групп судов для предупреждения столкновений [Текст] //Эксплуатация морского транспорта.– 2016.– № 2 (79).– С. 45-50.

#### References

1. Zav'jalov, V. V. Sudovynavigacionnyeholoty. V 2 ch. Ch. I. Teorija: ucheb. posobie / V. V. Zav'jalov, V. F. Polkovnikov, A. I. Saranchin. – Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2012. – 93 s.  
2. Skipper GDS 102 Dual Channel Graphic Depth Sounder (10-265 kHz). OperationAndInstallationManual. Edition: 20051116 sw 1.10.1. – 311 s.

3. Kondrat'ev S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnyimi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energosberezheniya. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Novorossiysk, 2004.

4. Astrein V.V., Kondrat'ev S.I., Boran-Keshish'yan A.L. Zadacha samoorganizacii grupp sudov dlya preduprezhdeniya stolknovenij. Ekspluataciya morskogo transporta. 2016. № 1 (78). S. 32-38.

5. Astrein V.V., S.I. Kondrat'ev, E.V. Hekert Algoritm samoorganizacii grupp sudov dlya preduprezhdeniya stolknovenij [Tekst] //Ekspluataciya morskogo transporta. 2016. № 2 (79). S. 45-50.

УДК 656.61.0524

DOI: 10.34046/aumsuomt92/7

## АВТОРУЛЕВОЙ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДНА

*Я.В. Бурьлин, кандидат технических наук*

*А.Н. Попов, кандидат технических наук*

Предлагается способ построения авторулевого, предназначенного для автоматической проводки безэкипажных судов по заданным траекториям. Представлен алгоритм выработки управляющих воздействий на судно на основе его текущих кинематических характеристик по иерархически организованному ПИД и ПИ законам. Предложен способ выбора точки начала маневра как расстояния до пересечения линий пути в зависимости от угла поворота. Представлены результаты практических испытаний автоматически пилотируемого судна.

**Ключевые слова:** безэкипажное судно, автоматическое управление, программная траектория.

Proposed a method for constructing an autopilot designed for crewless vessels along program trajectories. An algorithm for generating ship control signals based on its current kinematic parameters due to hierarchically organized PID and PI regulators is presented. The method of selection of point of maneuvering commence due to distance to course lines cross depending on turning angle value is presented. The results of maneuvering tests of an automatically manned vessel are presented.

Keywords: unmanned vessel, automatic control, programmed trajectory.

Отрасль судоходства переживает в настоящее время научно-техническую революцию в результате внедрения концепции e-Навигации, результатом которой становится постепенное усиление интеллектуальной поддержки действий человека-оператора в процессе маневрирования судна. В связи с этим возникает потребность в исследовании последствий внедрения технологии безэкипажных судов [4]. Такие исследования предлагается производить на малогабаритных дистанционно управляемых и автономных морских подвижных объектах (ММПО) [2].

В июле 2019 года на базе образовательного центра «Сириус» в рамках научно-технологической образовательной программы «Большие вызовы» под непосредственным руководством авторов были произведены натурные исследования управления безэкипажным флотом. Проект «Безэкипажное судно с системой поддержки принятия решений на основе дополненной реальности», представленный авторами, первенствовал в номинации «Морской интеллект» [5].

В процессе управления судном по траектории, традиционно заданной точками на координатной секте земного эллипсоида, возникает проблема перехода с одного плеча траектории на другое [1, 3], когда не ясно в какой момент времени начинать маневр и по какой траектории будет двигаться судно в период маневрирования. Проблема может быть решена заданием траектории помощью траекторной функции [3] либо учетом табличных маневренных характеристик судна. Оба метода имеют свои недостатки: в первом случае сложно определять отклонение от траектории, во втором нельзя учесть одерживание судна при выходе на следующее плечо траектории.

Необходимо найти либо табличную, либо функциональную зависимость расстояния от положения ММПО до точки поворота на котором необходимо начинать маневр от угла поворота и текущих кинематических характеристик судна.

$$S \leq f(X, \Delta K), \quad (1)$$

где  $X, \Delta K$  – вектор состояния судна, угол поворота.

В упрощенном случае необходимо найти зависимость  $S \leq f(\Delta K)$ , тогда закон управления авторулевого должен компенсировать неучтенные кинематические составляющие вектора состояния судна.

В качестве испытательной модели предлагается использовать ММПО, описанный в работе [1]. Обновленный интерфейс управления и индикации ММПО, учитывающий возможность использования моделей с двумя винторулевыми комплексами, показан на рисунке 1.

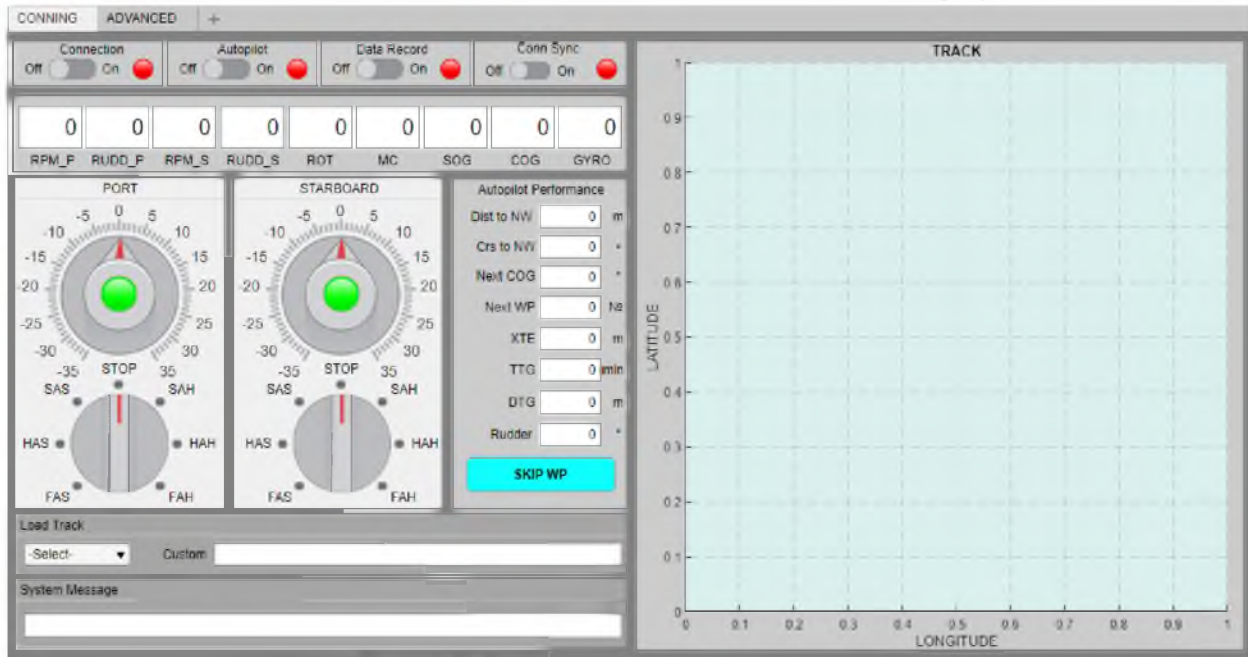


Рисунок 1 – Интерфейс управления и индикации

На основе таблицы 2.21 МТ-2000 для данного ММПО эмпирически была определена зависимость (1), показавшая хорошие результаты на маневровых испытаниях:

$$S \leq e^{\Delta K/36} / 10;$$

Таким образом, по достижении судном дистанции (1) начинается управление по следующему плечу траектории независимо от текущего отклонения от курса или траектории, рисунок 2.

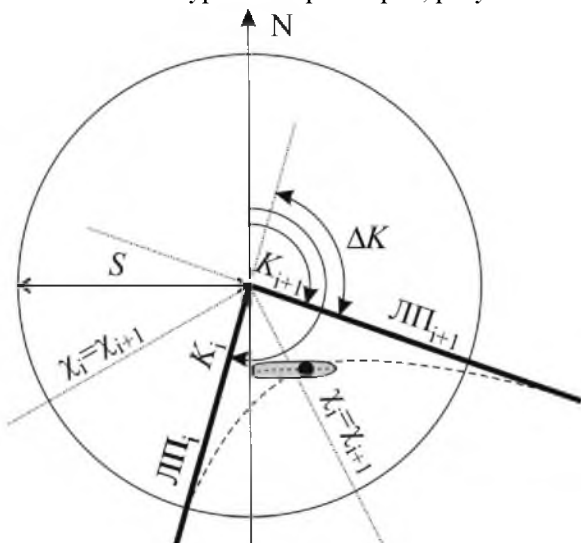


Рисунок 2 – Элементы траектории

Поэтому в качестве еще одного условия, обуславливающего переход на следующее плечо траектории, предлагается неравенство:

$$\chi_i > \chi_{i+1}, \quad (2)$$

где  $\chi$  – отклонение от текущего плеча траектории;  $i$  – индекс текущего плеча траектории.

Это обеспечит автоматический переход на следующее плечо траектории, даже когда условие (1) недостижимо ввиду сильных отклонений от траектории и выходить обратно на текущее плечо траектории не целесообразно.

В общем случае закон управления предлагается рассматривать в виде:

$$\begin{cases} \delta_p = a_{pr}(K_p + \Delta K_\chi - K) + a_m \int (K_p + \Delta K_\chi - K) dt + a_d \omega, \\ \Delta K_\chi = b_{pr} \chi + b_m \int \chi dt, \end{cases} \quad (3)$$

где  $K, K_p$  – курсы исполняемый и заданный;

$\Delta K_\chi$  – поправка к заданному курсу за отклонение от траектории;

$a_{pr}, a_m, a_d, b_{pr}, b_m$  – коэффициенты;

$\omega, \chi$  – угловая скорость и отклонение от траектории.

При этом учитывается, что как бы ни было велико отклонение от траектории, величина поправки к заданному курсу за отклонение от траектории не превышает угла, при повороте на который, судно будет направлено в кратчайшую точку до текущего плеча траектории.

Регулятор (3) представляет собой два иерархически организованных ПИД и ПИ регулятора по курсу и отклонению от траектории соответственно. Результат применения регулятора (3)

совместно с условиями переключения плеч траектории (1), (2) при натурных испытаниях представлен на рисунке 3. При передаче команд переключки на исполнение сервоприводом пера руля значения углов переключки более 35 градусов каждого бортов принимаются равными 35 градусам соответственно. Принципиальная схема авторулевого показана на рисунке 3.

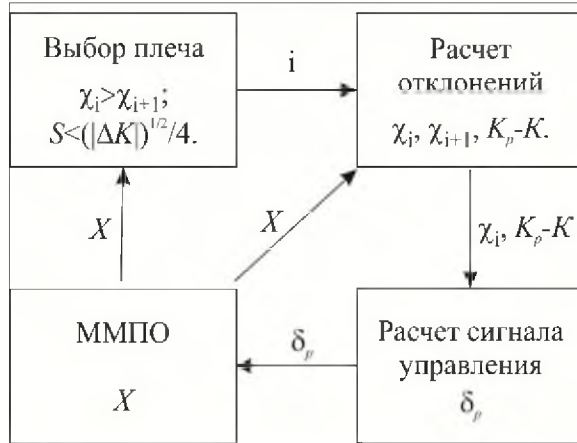


Рисунок 3 – Принципиальная схема авторулевого

Маневрирование ММПО при натурных испытаниях происходило в следующем порядке. ММПО начал движение в точке 1 рисунка 4. Отклонение по курсу составило более 90 градусов. До достижения первой точки (точка 2 на рисунке) заданной траектории отклонение по траектории не учитывается регулятором. ММПО совершил первый поворот по заданной траектории (точка 3) с минимальным отклонением, допустив небольшое перерегулирование. Второй поворот (точка 4) ввиду большого угла поворота начался заблаговременно, выход на следующее плечо выполнен с небольшим отклонением и перерегулированием. В точке 5 ММПО запоздал с набором угловой скорости т.к. сказалось локально действующее течение, выход на следующее плечо выполнен без отклонений и перерегулирования. По достижению конечной точки траектории ММПО застопорил двигатель, переложил руль прямо и лег в дрейф (точка 6), согласно заложенной программы. Программа может быть изменена на полное гашение продольной скорости работой на задний ход по достижении конечной точки.

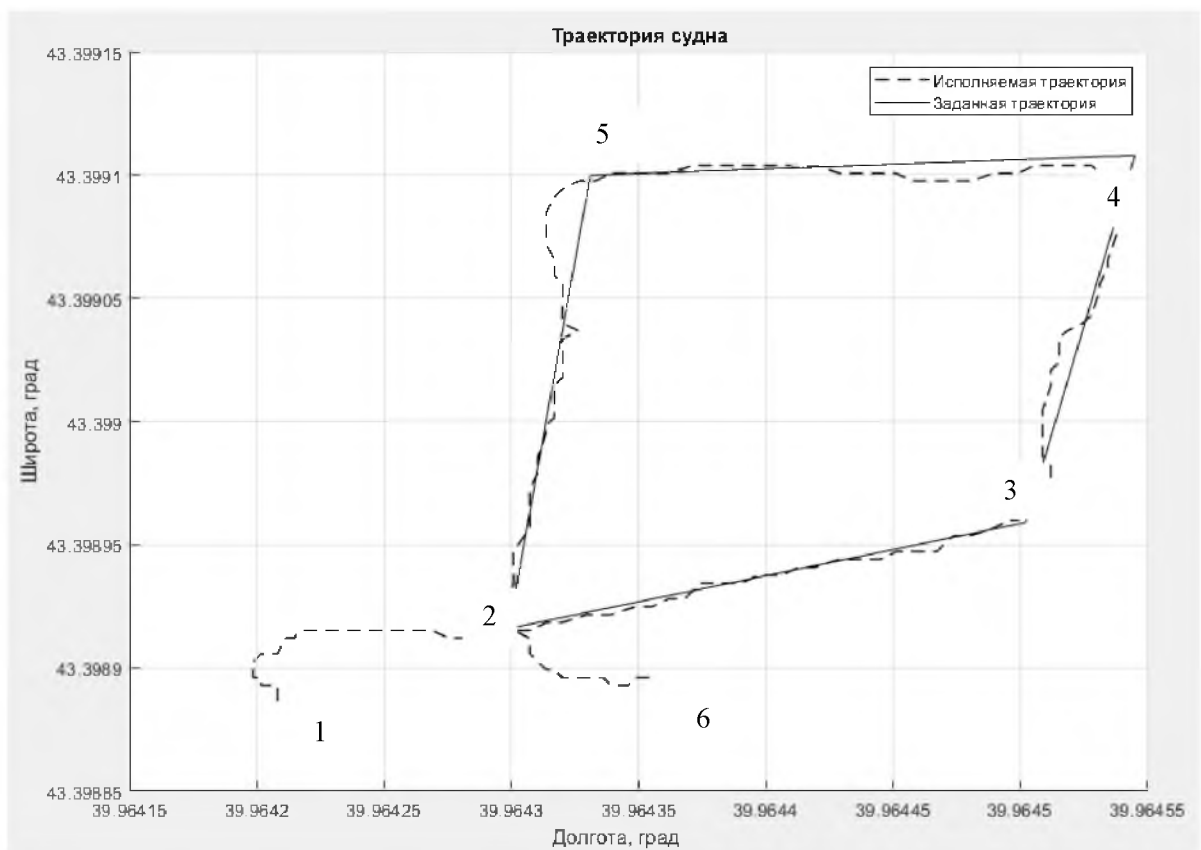


Рисунок 4 – Заданная и исполняемая траектории ММПО

На рисунке 5 показана работа регулятора по выработке управляющего воздействия в зависимости от отклонений от курса и траектории. Можно заметить периодический характер пере-

кладок руля, что говорит о недостаточном качестве настройки коэффициентов (2), однако отклонения по всем управляемым параметрам минимизировались на всем протяжении выполняемой траектории.

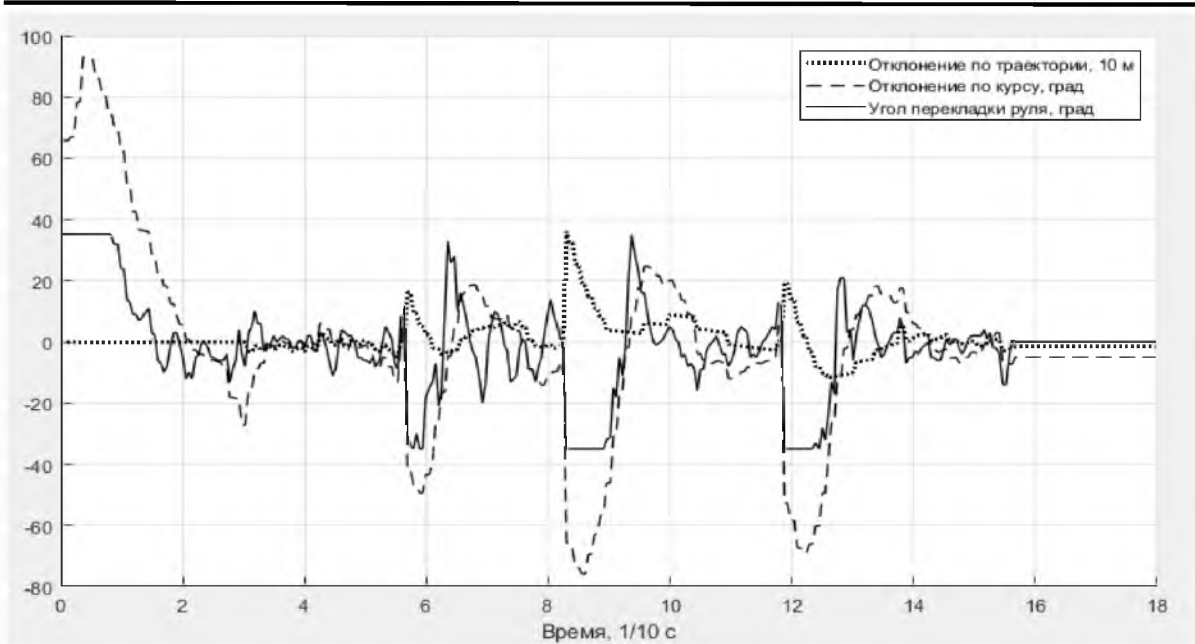


Рисунок 5 – Управляющие воздействия в зависимости от отклонений

На рисунке 6 показаны кинематические параметры ММПО в процессе маневрирования. Видно, что угловая скорость подвержена зашумлению внешней средой и выбросами датчика, по-

этому применялась фильтрация данных скользящим средним по трем значениям, что позволило минимизировать перекладки пера руля и сгладить их характер.

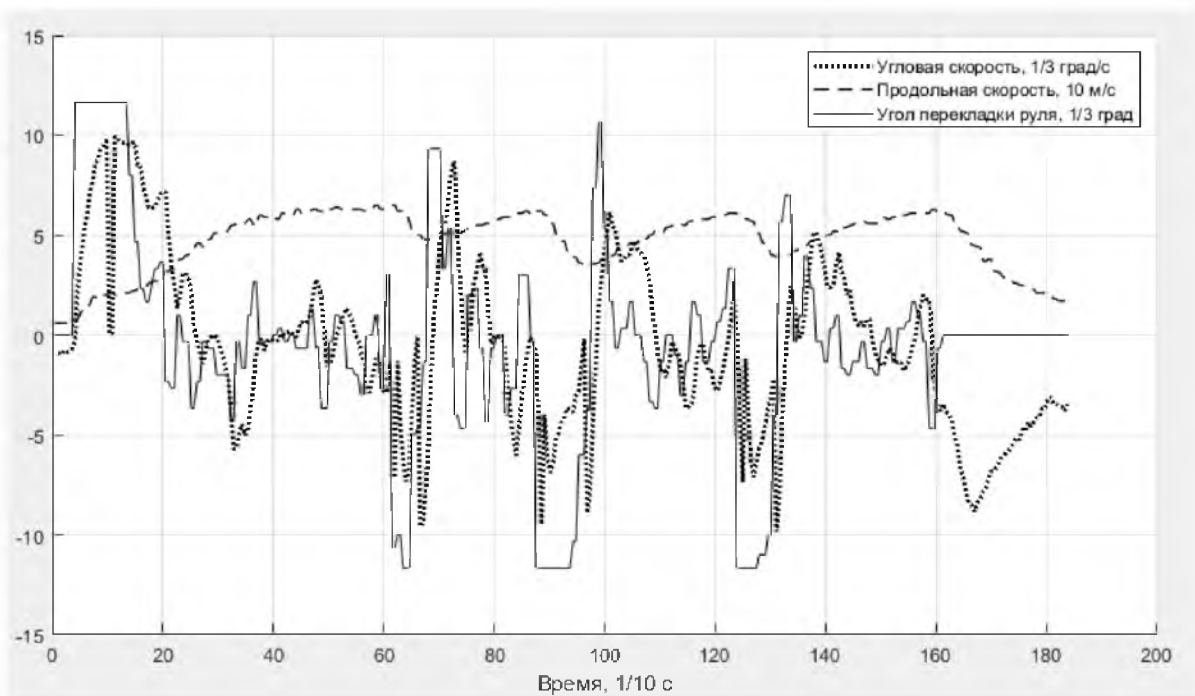


Рисунок 6 – Кинематические параметры ММПО

Как видно из рисунков 4 – 6 предложенный регулятор успешно справился с заданной траекторией, несмотря на существенные (порядка 80 градусов) углы поворота. Есть необходимость в дальнейших экспериментах для настройки коэффициентов регулятора (2), адаптации фильтрации скользящим средним в зависимости от характера движения, оснащения ММПО подруливающим устройством для динамического удержания пози-

ции при достижении конечной или промежуточной точки траектории, уточнения математической модели ММПО. Дальнейшие исследования предполагают возможность создания тренажерного центра с управляемыми моделями судов в ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова» для отработки навыков и приобретения соответствующих компетенций внешних капитанов безэкипажных морских судов.

**Литература**

1. Бурьлин Я.В. Идентификация нелинейной модели движения судна и адаптивное управление по траектории [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.19. – Новороссийск, РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2018. – 24 с.
2. Бурьлин Я.В. Выбор структуры математической модели идентификации судна [Текст]// Эксплуатация морского транспорта. - 2019. - №2(91). – С. 64 – 68.
3. Мироненко, А.А. Методология формализации навигационной обстановки, планирования маршрута и программных траекторий движения судна [Текст]: автореф. дис. д-ра. техн. наук: 05.22.19. –Новороссийск, 2016. – 48 с.
4. Кондратьев А.И., Худяков О.А., Попов А.Н. О необходимости внедрения беспилотных судов в торговый флот России [Текст]// Транспортное дело России. - 2016. - №6(127). – С. 138 – 140.
5. URL:<http://ria.ru/20190731/1557043190.html>.
6. Емец К.А. Мореходные таблицы [Текст]/К.А. Емец, Н.М. Груздев, Э.С. Бородин, В.Н. Костин. – СПб.: ГУНИО МО РФ. – 2002. – 623 с.

**Bibliography**

1. Burylin Y.V. Identifikaciya nelinejnoj modeli dvizheniya sudna i adaptivnoe upravlenie po traektorii [Text]/ avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.22.19. - Novorossijsk. - 2018. - 24 s.
2. Burylin Y.V. Vybor struktury matematicheskoj modeli identifikacii sudna [Text]// Ekspluataciya morskogo transporta. - 2019. - №2(91). – S. 64 – 68.
3. Mironenko, A.A. Metodologiya formalizacii navigacionnoj obstanovki, planirovaniya marshruta i programnyh traektorij dvizheniya sudna [Text]: avtoref. dis. d-ra. tekhn. nauk: 05.22.19. –Novorossijsk, 2016. – 48 s.
4. Kondrat'ev A.I., Hudyakov O.A., Popov A.N. O neobhodimosti vnedreniya bespilotnyh sudov v torgovyy flot Rossii [Text]// Transportnoe delo Rossii. - 2016. - №6(127). – S. 138 – 140.
5. URL:<http://ria.ru/20190731/1557043190.html>.
6. Emec K.A. Morekhodnye tablicy [Tekst]/ K. A.Emec, N. M.Gruzdev, E. S.Borodin, V. N.Kostin. – SPb.: GUNIO MO RF. – 2002. – 623 s.

УДК: 656.6

DOI: 10.34046/aumsuomt92/8

## КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОГО НЕОРГАНИЗОВАННОГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

А. В. Фролов, начальник класса кафедры АИС

Е. С. Фролова, аспирант

*В современном водно-транспортном движении, потоках на реках, морях, местах встречи неорганизованных потоков малых судов или местах, где возможны некоторые препятствия, необходимы особые меры безопасности. Для управления такими потоками, актуальны критерии, политика безопасности, моделирование потоков. Причем, моделирование, учитывающее критерии безопасности высокоинтенсивных потоков, моделирование с применением ситуационных сценариев, позволяющих проигрывать различные, особенно, незапланированные ситуации.*

*Рост эффективности судовождения на оживленных, особенно, речных магистралях при интенсивном использовании транспорта, повышение эффективности перевозок требует учета критических факторов: интенсивности грузопотока; климатических (ветер, осадки и др.); взаимодействий с береговыми объектами (портами назначения, лоцманскими службами и др.); адаптации рассчитываемых параметров движения, например, скорости с учетом ветра, волны, видимости и др.*

*В данной работе указанная проблема моделируется, исследуется с использованием аппарата клеточных автоматов. Их использование актуально для «ухода» от нелинейности, алгоритмической сложности процессов. Клеточные автоматы показали в этом свою эффективность в газодинамических и потоковых задачах. Данный метод позволяет снизить сложность за счет линеаризации задач и уменьшения алгоритмической сложности, применения динамических имитационных моделей.*

**Ключевые слова:** клеточный автомат, моделирование, безопасное движение, водный транспорт, судно

In modern water transport, flows on rivers, seas, places of unorganized flows of small ships or places where some obstacles are possible, special security measures are needed. To manage such flows, relevant criteria, security policy, modeling flows. Moreover, modeling, taking into account the safety criteria of high-intensity flows, modeling using situational scenarios, allowing to play various, especially, unplanned situations.

The increase in the efficiency of navigation on busy, especially river highways with intensive use of transport, improving the efficiency of transportation requires consideration of critical factors: the intensity of cargo traffic; climatic (wind, precipitation, etc.); interactions with onshore facilities (ports of destination, pilotage services, etc.); Adaptation of calculated motion parameters, for example, speed with regard to wind, waves, visibility, etc.

In this paper, this problem is modeled and investigated using the cellular automata apparatus. Their use is relevant for the "departure" from nonlinearity, the algorithmic complexity of processes. Cellular automata have shown their efficiency in this in gas-dynamic and flow problems. This method allows to reduce the complexity due to the linearization of tasks and reduction of algorithmic complexity, the use of dynamic simulation models.

**Keywords:** cellular automaton, modeling, safe movement, water transport, vessel.