

Численный метод выбора маневров расхождения с несколькими судами

А. А. Вагущенко, Л. Л. Вагущенко

Национальный университет «Одесская морская академия», Украина
Corresponding author. E-mail: leonvagu@mail.ru

Paper received 24.01.20; Accepted for publication 11.02.20.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-19>

Аннотация. Предлагается численный способ определения оптимального по потере ходового времени комбинированного Z-маневра расхождения с помощью метода перебора с учетом МППСС-72, навигационных ограничений, других судов и динамики собственного судна. Приведена процедура получения диаграмм, отображение которых облегчает оператору коррекцию представляемого компьютером оптимального варианта маневра. Эффективность метода подтверждена нахождением с его помощью маневров расхождения в различных ситуациях.

Ключевые слова: предупреждение столкновений, комбинированный Z-маневр, метод перебора, множество допустимых вариантов, алгоритм поиска.

Введение. Уровень аварийности судов от столкновений довольно высокий, несмотря на принимаемые меры. Из таких мер можно назвать введение МППСС-72, национальных требований к предупреждению столкновений, оснащение судов мощными интегрированными мостиковыми системами, установление систем разделения движения, оборудование подходов ко всем крупным портам и транзитных районов интенсивного судоходства системами управления движением, развитие E-Навигации и ряд других. Но, тем не менее, проблема предупреждения столкновений судов остается открытой. Причин для этого много: сложные погодные и навигационные условия, большая инерционность судов, неблагоприятное влияние на их управляемость различных факторов, интенсивный трафик, субъективность оценки ситуаций и принятия решений. Поэтому на современном этапе разработка методов, повышающих эффективность процессов расхождения судов в море, является актуальной.

Краткий обзор публикаций по теме. Для обеспечения безопасного расхождения предложено много алгоритмов, основой для получения которых стали разные методы: математической статистики, ситуационного управления, линейного и нелинейного программирования, теории игр, оптимальных дискретных процессов, нелинейной интегральной инвариантности, искусственного интеллекта, динамических n -управляемых систем, много агентных систем, и дру-

гие. Обзор большинства из этих алгоритмов представлен в статье [1]. На современном этапе основные разработки по рассматриваемому направлению посвящены анти коллизионным методам для систем избегания столкновений (CAS - Collision Avoidance System) автономных судов и распределенным алгоритмам для так называемых «many-to-many» ситуаций, в которых суда могут обмениваться намерениями, используя коммуникационную систему такую как AIS. Теоретические основы автономного предотвращения столкновений освещены в работе [2]. В ней обсуждаются как классические методы, базирующиеся на математических моделях, так и способы, основанные на искусственном интеллекте. Процедуры получения маневров расхождения для автономных судов предложены, например, в работах [3,4]. Распределенные алгоритмы для «many-to-many» ситуаций представлены, в частности, в работе [5].

Ряд работ [6] посвящен методам определения комбинированного Z-маневра (KZM) собственного судна (OS - own ship) для расхождения с несколькими «целями» (TS - target ship). Этот маневр включает две операции:

1. изменение курса (K) вместе со скоростью (V) в выбранной точке для предотвращения чрезмерного сближения с другими судами;
2. возвращение в другой точке к исходным значениям K и V .

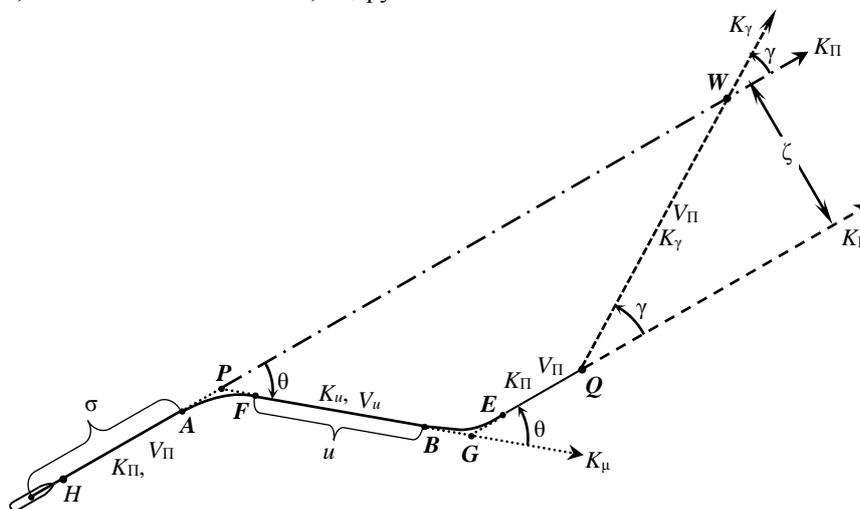


Рис. 1. Схема KZM

Схема KZM показана на рис. 1, где K_{Π} , V_{Π} и K_u , V_u – курс, скорость OS перед расхождением и для уклонения от столкновения; P , G , Q и A , B и F , E – путевые, начала и конца операций точки; ζ – боковое отклонение (дистанция отхода) от маршрута следования; γ – изменение K для возвращения к маршруту перехода после маневра. Основными параметрами KZM приняты: σ – расстояние от текущего места OS до начала A маневра; ∇ – изменение скорости; θ – угол поворота; u – длина отрезка FB уклонения.

Расхождение изменением курса или скорости или курса вместе со скоростью, а также Z-маневр являются частными случаями KZM.

Цель. Целью работы является создание для CAS численного метода поиска оптимального по потере ходового времени KZM с учетом МППСС-72, навигационных ограничений, динамики OS в ситуациях с несколькими судами.

Материалы и методы. Опасность столкновений оценивалась с помощью доменов опасности [7], образуемых у «целей» (TDD – target’s domain of danger). Использовались круговые TDD, центр которых смещен от центра массы TS в сторону носа на 1/3 часть радиуса. Радиус TDD «цели» J получался так

$$r_j = \hat{r}_w + \Delta_L + \Delta_\varepsilon,$$

где \hat{r}_w – отвечающее условиям плавания среднее значение границы допустимых дистанций по водной поверхности между ближайшими друг к другу точками OS и TS;

Δ_L и Δ_ε – поправки соответственно на размеры OS, TS_j и погрешность определения дистанции кратчайшего сближения (DCPA – distance at closest point of approach).

Поправка Δ_L , Δ_ε находились по формулам

$$\Delta_L = \frac{L_{OS}}{2} + \frac{L_{SJ}}{2}; \quad \Delta_\varepsilon = 2 \cdot s_\delta \cdot \sigma_k,$$

где L_{OS} , L_{SJ} – длина OS и TS_j;

σ_k – средняя квадратичная погрешность относительного курса «цели»;

s_δ – дистанция от OS по линии относительного курса до точки кратчайшего сближения с TS_j.

Предел допустимых значений DCPA для TS_j рассчитывался по формуле:

$$\hat{\delta}_j = \hat{\delta}_j(\rho_\delta) = r_j(1 + \frac{1}{3} \cos \rho_\delta)$$

где ρ_δ – ракурс TS_j в момент кратчайшего сближения с OS.

Динамика OS [8] учитывалась упрощенно. Траектория поворотов OS считалась дугой окружности. Для описания изменения скорости использовалось выражение

$$V = V_0 + a_1 t_V + a_2 t_V^2;$$

где t_V – время изменения скорости.

В этом случае проходимое за время t_V расстояние будет

$$S_V = V_0 t_V + a_1 t_V^2 / 2 + a_2 t_V^3 / 3.$$

Коэффициенты a_1 , a_2 для применяемого режима изменения скорости определялись по приведенным в формуляре маневренных характеристик OS времени

(t_{AB}) и расстоянию (S_{AB}) изменения скорости от значения V_A до V_B из системы двух линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} t_{AB} a_1 + t_{AB}^2 a_2 &= V_A - V_B \\ \frac{t_{AB}^2}{2} a_1 + \frac{t_{AB}^3}{3} a_2 &= V_0 t_{AB} - S_{AB} \end{aligned} \right\}$$

По заданной величине изменения скорости ∇ затрачиваемое на него время находилось из квадратного уравнения

$$a_2 t_V^2 + a_1 t_V + \nabla = 0.$$

В совместном маневре изменения K и V считались независимыми.

Для поиска оптимального по потерям ходового времени маневра применялся метод перебора его возможных вариантов.

Результаты и их обсуждение. При решении задачи использованы следующие предположения:

- все суда с механическим двигателем;
- информация о «целях» поступает от РЛС и AIS;
- влиянием ветра и течения на движение судов можно пренебречь;
- учитываются TS в пределах устанавливаемых оператором внешних охранных границ;
- параметры движения TS при расхождении остаются постоянными;
- повороты выполняются с заданным радиусом, средним при изменении курса для OS;
- для расхождения V снижается с применением режима «задний малый ход», а восстанавливается – дачей полного переднего маневренного хода;
- применяются только МППСС-72, местные правила не учитываются.

Опасная «цель», а если их несколько, то самая опасная из них, будет обозначаться \overline{TS} . Выделены 4 этапа (планирования маневра, заблаговременных мер, допустимых действий после второго этапа, срочных мер) и 11 видов (табл.1) сближения OS с \overline{TS} . Конечные точки первых трех этапов на пути OS обозначим H , Ψ , Φ , а расстояния от места OS до этих точек – s_H , s_Ψ , s_Φ .

Таблица 1. – Виды сближения OS с \overline{TS}

Код	Вид сближения
	«Прямо друг на друга»
1-1	Прямо или почти прямо друг на друга
	«Пересечение курсов»
2-1	\overline{TS} справа впереди траверза OS
2-2	\overline{TS} слева впереди траверза OS
2-3	\overline{TS} справа на траверзе OS
2-4	\overline{TS} слева на траверзе OS
	«Обгон цели»
3-1	Обгоняемая \overline{TS} справа по носу OS
3-2	Обгоняемая \overline{TS} слева по носу OS
3-3	Обгоняемая \overline{TS} прямо по носу OS
	«Обгон целью»
4-1	Обгоняющая \overline{TS} справа по корме OS
4-2	Обгоняющая \overline{TS} слева по корме OS
4-3	Обгоняющая \overline{TS} прямо по корме OS

Оптимальный вариант KZM по критерию минимума потерь ходового времени (обозначим эти потери χ , а их минимум - $\check{\chi}$) будет находиться на первом этапе сближения OS с \overline{TS} с помощью метода перебора. Из-за большого числа возможных вариантов действий для избегания столкновения в недалеком прошлом этот метод не позволял в CAS получать решения в реальном времени. В настоящее время это стало возможным. Метод перебора включает выделение областей изменения параметров KZM, их дискретизацию, просмотр всех возможных вариантов маневра и выбор из них оптимального. Принятые ниже диапазоны параметров KZM и шаги их дискретизации приведены в табл. 2, где \check{V} - скорость переднего самого малого хода OS, $\overline{\theta}$ и $\underline{\theta}$ - пределы изменения K влево и вправо. Отметим, что при необходимости, эти значения могут быть изменены. Также в этой таблице показаны границы \overline{V} , $\overline{\theta}$ для выделения заметных (существенных) значений \overline{V} , θ и предпочтительная дистанция $\overline{\sigma}$ до начала KZM, для случая, когда OS и \overline{TS} на виду друг у друга и OS является уступающим дорогу судном (GWV - give-way vessel). Изменение K вместе с V считается заметным, когда величина $\xi = (|\nabla/\overline{V}| + |\theta/\overline{\theta}|)$ больше или равна единице.

Таблица 2. – Диапазоны, шаги дискретности и $\overline{\sigma}, \overline{V}, \overline{\theta}$ параметров KZM

Параметр KZM	Диапазон	Шаг дискретности	$\overline{\sigma}, \overline{V}, \overline{\theta}$
σ (кб)	$[\sigma_H, \sigma_\Psi]$	1 кб	$\overline{\sigma} = (\sigma_H + \sigma_\Psi)/2$
∇ (уз)	$[0, \check{V} - V_{II}]$	1 уз	$\overline{V} = V_{II}/3$
θ (град)	$[\overline{\theta} = -90^\circ; \underline{\theta} = +90^\circ]$	1°	$\overline{\theta} = +30^\circ$
u (кб)	$[0.70]$	1 кб	-

Обозначим: количество дискретных значений в диапазонах изменения σ , ∇ , θ , u как $N_\sigma, N_V, N_\theta, N_u$; произвольно выбранные значения - $\sigma_i, \nabla_j, \theta_k, u_h$: соответствующие им варианты KZM и его первой операции - $\mu(i, j, k, h)$ и $\alpha(i, j, k)$. Не сопровождающимся угрозой столкновения вариантам будет присваиваться значение «1», в противном случае - $\mu(i, j, k, h)=0, \alpha(i, j, k)=0$.

При формализации МППСС-72 могут использоваться [9] логические, продукционные, сетевые, фреймовые модели. Большинство созданных для этой цели баз знаний основано на продукционных моделях. Нами также отдано им предпочтение. Допустимые в сложившейся ситуации действия располагаются по уровням приоритетности высокого, среднего и низкого ранга. К первому рангу отнесены действия из предписываемых МППСС-72, которые в большинстве случаев оказывались успешными; ко вторым - менее эффективные из предписываемых мер, а к третьим - действия, которых следует избегать. С меньшим приоритетом меры используются, когда высшие по рангу не приводят к безопасному расхождению. Уровень приоритетности обозначим η ($\eta=1, 2, \dots, n$), а

наилучший на нем вариант KZM и отвечающие ему минимальные потери ходового времени - $\check{\mu}_\eta$ и $\check{\chi}_\eta$.

Выделяются уровни приоритетности с помощью комплексов ограничений (КО) на параметры KZM. В зависимости от условий видимости, вида сближения OS с \overline{TS} , нахождения главного двигателя OS в «морском» (возможно изменение только K) или в «маневренном» (изменять можно K и V) режиме определены 19 КО для поиска KZM (табл. 3, где SOV - stand-on vessel).

Таблица 3. – Номера КО для поиска KZM

OS и \overline{TS} на виду друг у друга				Ограниченная видимость	
Вид сближения	Вид OS	№ КО для изм. K	№ КО для изм. K и V	Вид сближения	№ КО для изм. K и V
1-1	GWV	1	8	1-1, 2-1, 2-2	15
2-1, 2-3	GWV	2	9	2-3, 4-1	16
2-2, 2-4	SOV	3	10	2-4, 4-2	17
3-1, 3-3	GWV	4	11	3-1, 3-3	18
3-2	GWV	5	12	3-2	19
4-1, 4-3	SOV	6	13		
4-2	SOV	7	14		

Например, в КО №9 (пересечение курсов, OS - GWV) к высшему рангу отнесены два уровня ($\eta=1, 2$), где находятся заблаговременные KZM, первая операция которых - заметное изменение K . KZM этих уровней находятся с помощью логических условий:

- 1) $(\sigma = \overline{\sigma})$ and $(\nabla = 0)$ and $(\theta \geq \overline{\theta})$;
- 2) $(\sigma \geq \sigma_H)$ and $(\sigma \leq \sigma_\Psi)$ and $(\nabla = 0)$ and $(\theta \geq \overline{\theta})$.

Если $\check{\chi}_1 - \check{\chi}_2 > 1$ мин, то оптимальный вариант KZM $\check{\mu}_0 = \check{\mu}_2$, иначе $\check{\mu}_0 = \check{\mu}_1$.

Мерами среднего ранга являются снижение V и такое действие совместно с поворотом вправо. Они определяются с помощью ограничений:

- 3) $(\sigma \geq \sigma_H)$ and $(\sigma \leq \sigma_\Psi)$ and $(\nabla \leq \overline{V})$ and $(\theta = 0)$;
- 4) $(\sigma \geq \sigma_H)$ and $(\sigma \leq \sigma_\Psi)$ and $(\theta \geq 5^\circ)$ and $(\xi \geq 1)$. Когда $\check{\chi}_3 - \check{\chi}_4 > 1$ мин, то $\check{\mu}_0 = \check{\mu}_4$, иначе $\check{\mu}_0 = \check{\mu}_3$.

Низкий приоритет присвоен поворотам влево:

- 5) $(\sigma = \overline{\sigma})$ and $(\nabla = 0)$ and $(\theta \leq \underline{\theta})$;
- 6) $(\sigma \geq \sigma_H)$ and $(\sigma \leq \sigma_\Psi)$ and $(\overline{V} = 0)$ and $(\theta \leq \underline{\theta})$.

Здесь $\overline{\sigma} = \sigma_H + (\sigma_\Psi - \sigma_H)/3$. Если $\check{\chi}_5 - \check{\chi}_6 > 1$ мин, то $\check{\mu}_0 = \check{\mu}_6$, иначе $\check{\mu}_0 = \check{\mu}_5$.

Значения $\check{\chi}_\eta$ и параметры отвечающих им вариантов $\check{\mu}_\eta$ маневра находятся в процессе перебора. Обобщенная блок-схема алгоритма этого метода, с использованием обозначений положений OS при маневре (см. рис. 1), представлена на рис. 2.

Для проверки эффективности предлагаемого метода была составлена на языке «Borland Delphi» программа реализации приведенного алгоритма. Наличие навигационных препятствий учитывалось с помощью ограничений $\check{\zeta}, \check{\zeta}$ на величину отхода OS от маршрута перехода вправо и влево. Для различных ситуаций с неодинаковым числом «целей» и разными видами сближения с \overline{TS} по этой программе был выполнен поиск оптимального по потере ходового времени

KZM. Расчеты доказали эффективность используемого подхода. Время поиска маневров на персональном компьютере при $N_{\sigma} \leq 70$, $N_V \leq 30$, $N_{\theta} \leq 200$, $N_u \leq 70$ для ситуаций, в которых количество «целей» не превышало десяти, было не больше 3,0 с. Это свидетельствует о том, что эта задача может выполняться в реальном времени.

Ниже приведен результат определения оптимального KZM в ситуации с семью судами, параметры взаимного расположения и сближения которых приведены в табл. 4, где L – длина судна; Π , D – пеленг TS и дистанция до нее. В этом примере: $\hat{r}_w = 6$ кб; $\bar{V} = 5$ уз; $\bar{\theta} = 30^\circ$; $\bar{\sigma} = 16$ кб; $\bar{\zeta} = 25$ кб; $\bar{\zeta} = 45$ кб; $N_{\sigma} = 30$; $N_V = 13$; $N_{\theta} = 180$; $N_u = 65$; опасной является TS₁.

Таблица 4. Параметры взаимного расположения и сближения судов

Параметр\Суда	OS	TS ₁	TS ₂	TS ₃	TS ₄	TS ₅	TS ₆
L , м	220	250	140	175	330	80	50
Π , град	-	43	48	72	312	347	54
D , кб	-	81,7	71,4	45,1	45,1	62,0	39,8
K , град	0	258	260	267	88	182	1
V , уз	17,0	19,1	16,9	17,3	12,6	11,5	9,7

Полученный оптимальный вариант маневра характеризуется следующими значениями параметров: $\chi = 3,0$ мин; $\sigma = 16$ кб; $\bar{V} = 0,0$ уз; $\theta = 43^\circ$; $u = 20$ кб ($\zeta = 15$ кб). Время его получения на персональном компьютере составило 0,9 с. В графическом виде ситуация с траекторией найденного варианта KZM показана на рис. 3, где на продолжении отрезка уклонения точками представлен участок, на котором возвращение к K_{Π} , V_{Π} безопасно, а сплошной линией – где это недопустимо.

Указатели кратчайшего расстояния (когда оно не превышает четырех радиусов TDD) между OS и доменами опасностей «целей» могут отображаться «по требованию» на экране. Они представляют позиции «целей» и OS при таком сближении, позволяют глазомерно оценить его и установить, по носу или по корме «целей» OS будет пересекать их курс. Указатель для OS и TS_{*m*} (см. рис. 3) включает точечный и сплошной отрезки. Первый соединяет точку m^* с центром домена. Второй отрезок направлен из этого центра на точку m^{\wedge} . Его длина равна радиусу домена. Если сплошной отрезок пересекает линию пути OS, то TS_{*m*} представляет угрозу. Точечный отрезок указателя

перечеркнут, когда OS пересекает курс «цели» по носу.

Представленный компьютером вариант KZM оператор может корректировать. Для упрощения этой операции два множества (допустимых вариантов KZM и отвечающих им потерь ходового времени), получаемые при переборе, запоминаются. Двумерные подмножества этих множеств можно отображать в виде диаграмм, облегчающих выбор маневра в режиме диалога с системой. Для образования таких диаграмм значения одного или двух из трех параметров KZM (σ , \bar{V} , θ) задаются оператором. Программой определяется шесть таких диаграмм и предоставляется возможность выбора диапазонов их горизонтальных и вертикальных координат. Для одного заданного значения (σ или \bar{V} или θ) - это диаграммы для поиска \bar{V} и θ , σ и θ , σ и \bar{V} допустимого KZM с минимальным отрезком уклонения. Для двух заданных значения (σ и \bar{V} , σ и θ , \bar{V} и θ) строятся диаграммы допустимых значений θ и u , \bar{V} и u , σ и u .

Для рассмотренного выше примера на рис. 4 показана диаграмма для поиска $V_u(\bar{V})$ и θ маневра с $\sigma = 16$ кб и минимальным u , а на рис. 5 - диаграмма для выбора θ и u маневра при $\sigma = 16$ кб и $\bar{V} = 0,0$ уз. На диаграммах для допустимых пар значений KZM показаны в минутах потери ходового времени.

Выводы. Разработанный метод имеет следующие положительные стороны.

При расчете маневров принимаются во внимание требования МППСС-72. Местные правила могут учитываться с помощью отражающих их комплексов ограничений на параметры маневра.

Предложенный метод отличается простотой учета навигационных ограничений. Он позволяет находить семейство областей допустимых значений параметров маневра и его оптимальный вариант с учетом динамики собственного судна.

Использование у «целей» смещенных, круговых доменов опасности дает возможность учитывать неодинаковую степень опасности при пересечении их курса по носу и по корме.

Диаграммы допустимых значений параметров маневра оказывают существенную помощь при его выборе в режиме диалога с системой.

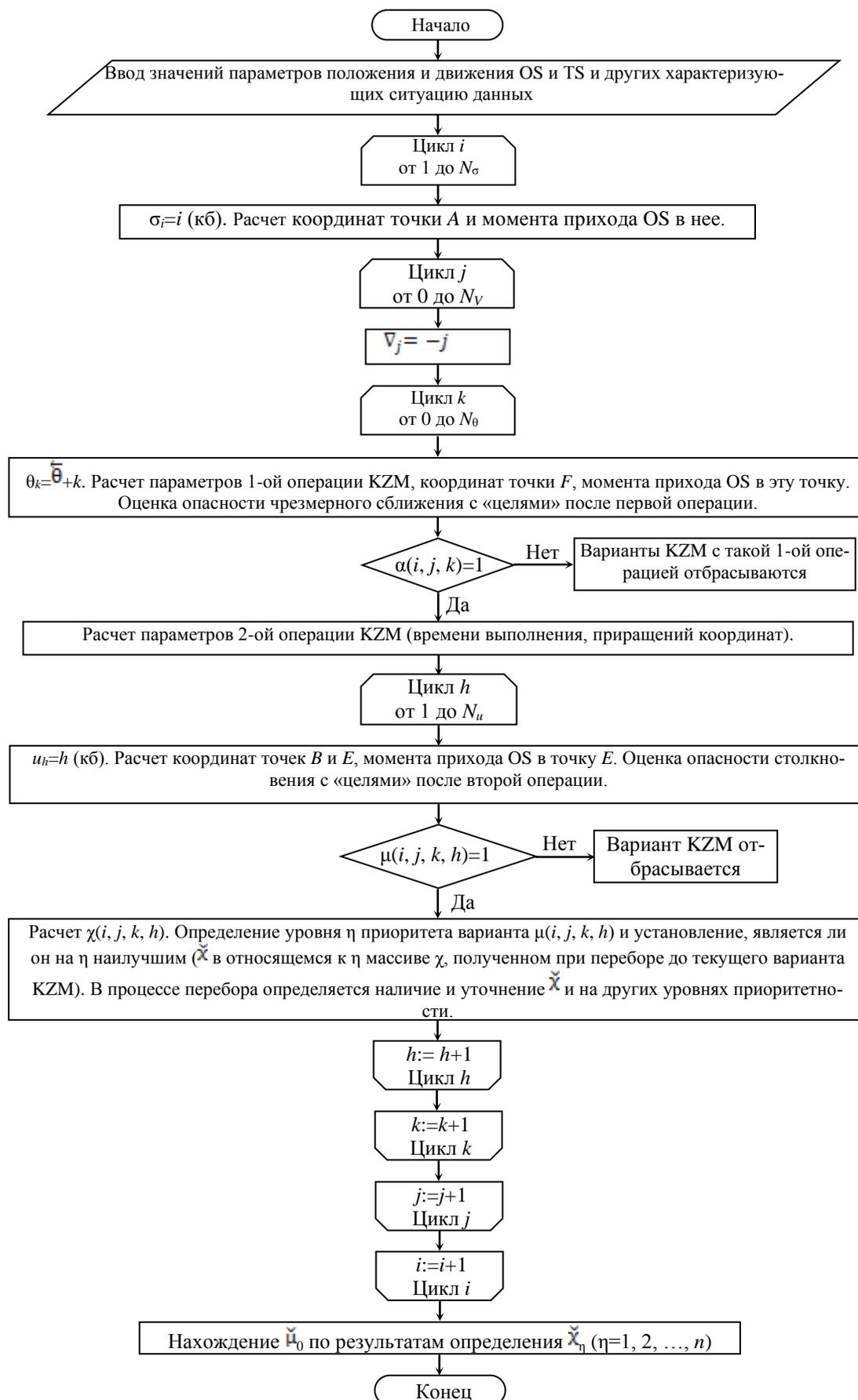


Рис. 2. Блок-схема поиска KZM методом перебора

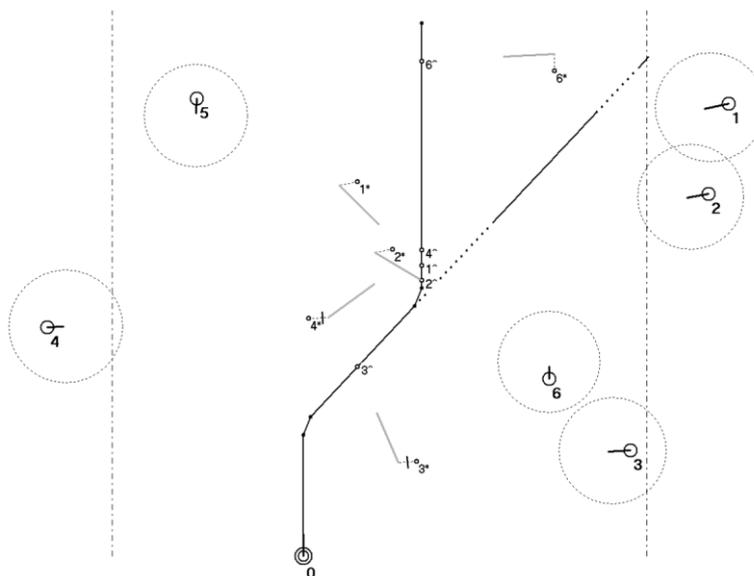


Рис. 3. Оптимальный вариант маневра
 m^* , m^\wedge - положение TS_m и OS , когда дистанция от OS до домена TS_m минимальна

$V\theta$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60
17																					3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
16																					3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
15																				4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
14																			4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
13																		4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5	4	5
12																5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
11																		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
10																														
9																														
8																														
7																														
6																														
5																														

Рис. 4. Диаграмма для поиска KZM с заданным началом ($\sigma=16$ cb)

$u\theta$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	
1																					M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	
2																															
3																															
4																															
5																															
6																															
7																															
8																															
9																															
10																															
11																															
12																															
13																														3	4
14																													3	4	4
15																												3	4	4	4
16																											3	4	4	4	4
17																										3	4	4	4	4	5
18																									3	4	4	4	4	5	5
19																								3	3	4	4	4	4	5	5
20																								3	3	4	4	4	5	5	5
21																							3	3	4	4	4	5	5	5	6
22																							3	3	4	4	4	5	5	5	6
23																							3	4	4	4	4	5	5	6	6
24																							3	4	4	4	5	5	6	6	6
25																							4	4	4	4	5	5	6	6	6
26																							4	4	4	5	5	6	6	6	6
27																							4	4	4	5	5	6	6	6	6
28																							4	4	5	5	5	6	6	6	6
29																							4	4	5	5	6	6	6	6	6
30																							4	5	5	5	6	6	6	6	6

Рис. 5. Диаграмма для поиска KZM с $\sigma=16$ cb; $\bar{V}=0,0$ kn

ЛИТЕРАТУРА

1. Tam C. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters/C.Tam, R.Bucknall, A.Greig//The Journal of Navigation. - 2009. - 62 (3). - P. 455-476.
 2. Statheros T. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques/T. Statheros, G. Howells, K. M. Maier//Journal of Navigation. - 2008. - 61(1). - P.129-142.

3. Kuwata Y. Safe maritime autonomous navigation with colregs, using velocity obstacles/Y. Kuwata, M. T. Wolf, D. Zarzhitsky, T. L. Huntsberger//IEEE Journal of Oceanic Engineering. - 2014. - 39(1). - P. 110–119.
4. Woerner K.L. Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles/K.L.Woerner, M.R.Benjamin, M.Novitzky, J. J.Leonard//OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. IEEE. - 2016. - P. 1–6.
5. Hirayama K. DSSA+: Distributed Collision Avoidance Algorithm in an Environment where Both Course and Speed Changes are Allowed/K.Hirayama, K.Miyake, T.Shiota, T.Okimoto//TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. - 2019. - 13(1). - P. 23-29.
6. Вагущенко Л.Л. Улучшение поддержки решений по предупреждению столкновений/Л.Л.Вагущенко, А.А.Вагущенко//Судовождение: Сб. науч. трудов НУ «ОМА». – 2018. – Вып. 28. - С. 24-34.
7. Szlapczynski R. Review of ship safety domains: Models and applications/R.Szlapczynski, J.Szlapczynska//Ocean Engineering. - 2017. - vol. 145. - P. 277–289.
8. Калиниченко Е.В. Практический расчет инерционно-тормозных характеристик судна/Е.В.Калиниченко//Судовождение: Сб. науч. трудов ОНМА. – 2005 – Вып. 10. - С. 58-64.
9. Banas P. Knowledge Base in the Interpretation Process of the Collision Regulations at Sea/P.Banas, M.Breitsprecher //TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. - 2011. - 5(3). – P. 359-364.

REFERENCES

6. Vagushchenko L.L. Improved collision avoidance support/L.L.Vagushchenko, A.A.Vagushchenko//Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov NU OMA. - 2018.- №28. - P. 24 – 34.
8. Kalinichenko E.V. Practical calculation of inertia-brake characteristics of the vessel/E.V. Kalinichenko//Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov ONMA. - 2005.- №10. - P. 58 – 64.

Numerical method for selection of maneuvers to avoid collisions with several vessels

A. A. Vagushchenko, L. L. Vagushchenko

A numerical method is proposed for determining the optimal by the loss of sailing time evasive combined Z-maneuver using the enumerative method. COLREG, navigation restrictions, other vessels and the dynamics of the own ship are taken into account. The procedure for obtaining diagrams that facilitate the operator's correction of the optimal variant of maneuver presented by the computer is developed. The efficiency of the method is confirmed by finding, with its help, evasive maneuvers in various situations.

Keywords: collision avoidance, combined Z-maneuver, enumerative method, sets of acceptable variants, search algorithm.