

УДК 656.61.052

**PREDICTION OF A MANEUVERING SHIP MOVEMENT  
RELATIVE TO ANOTHER SHIP****ПРОГНОЗ ДВИЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩЕГО СУДНА  
ОТНОСИТЕЛЬНО ДРУГОГО СУДНА****L. L. Vagushchenko**, DSc, professor;**A. S. Stepanenko**, PhD, associate professor**Л.Л. Вагущенко**, д.т.н., профессор,**А.Г. Степаненко**, доцент.*Odessa National Maritime Academy, Ukraine**Одесская Национальная Морская Академия, Украина***ABSTRACT**

Proposed the algorithm of target vessel trajectory prediction on board of own vessel with respect to information about the target planned maneuver. This algorithm allows the own vessel to assess safety of target vessel intended action quickly.

**Key words:** trajectory prediction, maneuvering, collision avoidance.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами**

Принципы автономного на судне решения задач предупреждения столкновений изложены во многих источниках, например, [1-3]. Как показывает анализ большинства навигационных аварий, они происходят не из-за отказа технических средств навигации и управления движением судна, а по причине неготовности судоводителя принимать решения, адекватные складывающейся ситуации. Другими словами – у него недостаточно профессиональной подготовки.

Квалификация судоводителя определяется суммой навыков в выполнении различных элементов судоводительской работы. Из-за неиспользования отдельные навыки теряются, и требуется периодическое их восстановление. Наиболее часто штурману приходится решать задачу расхождения судов при совместном плавании, она существенно усложняется при маневрировании в стесненных условиях и ограниченной видимости.

Следует отметить, что стесненные воды являются сложнейшими по своим условиям районами плавания, где и в настоящее время в наибольшей степени проявляется человеческий фактор. Так, согласно статистике, морское судно проводит в стесненных водах в среднем 5-10% ходового времени, однако на эти районы приходится свыше 80% всех навигационных аварий. С одной стороны это свидетельствует о большой сложности условий плавания, а с другой – о недостаточном совершенстве методов судовождения, применяемых в стесненных

водах, особенно в части предупреждения столкновений судов в сложных условиях стесненных вод.

Действительно, столкновения судов являются важнейшей проблемой безопасности судовождения, надлежащий уровень которой обеспечивает успешную работу судов. К сожалению, несмотря на многочисленные научные исследования и практические меры, направленные на снижение аварийности от столкновений судов, проблема предупреждения столкновения судов остается актуальной. Так как уровень аварийности от столкновений судов остается еще на высоком уровне, необходимы меры для его понижения.

### **Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы**

Одним из путей решения названной проблемы является обмен по линии АИС намерениями между судами. В работе [4] предложен один из методов выполнения этой задачи. Согласно ему «give-way» судно, которое должно уступить дорогу, сообщает другим судам о типе и параметрах планируемого маневра расхождения. Это плавсредство будем считать отсылающим план судном (ОПС). «Stand-on» судно, которое принимает эту информацию, представляет будущее развитие ситуации в графическом виде, облегчающем оценку последствий намечаемого ОПС действия, будет получающим план судном (ППС). В принципе, любое судно в районе нахождения ОПС может по ее информации выполнить анализ намеченных им мер.

На ППС рационально оценивать безопасность плана действий ОПС по соответствующей ему траектории движения ОПС относительно ППС. Для такой оценки необходимы алгоритмы, позволяющие прогнозировать и строить такие траектории на экранах систем предупреждения столкновений (СПС) на основе принятых от ОПС данных.

### **Формулирование целей статьи (постановка задачи)**

Целью данной статьи является разработка алгоритма прогнозирования в бортовой СПС одного судна траектории движения относительно него другого судна по данным о планируемом вторым судном маневре.

### **Изложение материалов исследования с обоснованием полученных научных результатов**

Ниже рассматриваются задачи определения относительной траектории судна, включающей маневр: курсом; скоростью; циркуляцией.

Объем дополнительных к информации транспондера АИС данных о намечаемом ОПС маневре должен быть минимальным, но достаточным для прогноза по ним в СПС ППС относительной траектории движения ОПС. Как показывает анализ, для такого прогноза необходимы следующие исходные данные:

- позывные судна, с которым расходятся;
- идентификатор маневра;

- координаты путевых точек маршрута расхождения включающего выбранный маневр (вместо путевых точек движения к порту назначения);
- элементы движения ОПС (путевой угол, путевая скорость и др.);
- параметр(ы) маневра.

В ситуациях предотвращения столкновения с одним или с несколькими судами удобным для планирования маршрутов расхождения, включающих указанные выше маневры, является представленный в работе [4] метод.

Как известно, данные о пути следования передаются транспондером АИС в информации о рейсе каждые 6 мин и при их изменении. Ниже путевые точки планируемого маршрута расхождения обозначаются цифрами 0, 1, 2, ...,  $N$ . Его началом (точкой 0) считается текущее место ОПС (за начало маршрута можно брать и упрежденную позицию ОПС). Момент нахождения ОПС в точке 0 обозначается  $t_0$ . При решении задачи он известен.

Значения элементов движения ОПС входят в посылаемые транспондером АИС динамические данные о судне.

Для передачи позывных судна, с которым расходятся, идентификатора намечаемого маневра и его параметра(ов) предлагается использовать короткое сообщение. Его посылка ОПС означает, что это судно планирует изменить элементы своего движения. В коротком сообщении ОПС должны содержаться такие параметры маневров:

для изменения курса – радиус поворота  $R_M$ ;

для изменения скорости - конечная скорость  $V_M$  и время  $\tau_M$  выполнения маневра;

для циркуляции - время  $\tau_M$  ее выполнения.

Для поиска траекторий расхождения должны использоваться достаточно точные модели. При прогнозе на ППС относительного пути ОПС по получаемой от ОПС информации можно применить приближенные методы, удовлетворяющие требованиям к решению задачи.

Известно, что траектория перемещения одного судна относительно другого может быть построена по ее точкам, соответствующим будущим моментам времени. Координаты этих точек находятся следующим образом.

Выберем две прямоугольные системы координат:

1.  $XOY$  с началом в определенной точке земной поверхности (для описания истинного движения судов);
2.  $xoy$  с началом, связанным с центром массы ППС (для представления относительного движения ОПС).

Оси  $OX$  и  $ox$  названных систем ориентированы по меридиану, а оси  $OY$  и  $oy$  - по параллели. Если обозначить в системе  $XOY$  соответствующие моментам  $t_i$  времени координаты положения ОПС как  $X_{J_i}$ ,  $Y_{J_i}$ , а координаты ППС - как  $X_i$ ,  $Y_i$ , то координаты  $x_i$ ,  $y_i$  точек траектории перемещения первого судна относительно второго будут следующими

$$x_i = X_{J_i} - X_i; \quad y_i = Y_{J_i} - Y_i. \quad (1)$$

**Прогноз включающего изменения курса пути ОПС относительно ППС.**  
 Известно, что участку прямолинейного равномерного движения ОПС соответствует прямолинейный отрезок пути ОПС относительно ППС. Начальную и конечную точку такого отрезка можно определить по координатам ОПС и ППС на моменты прихода ОПС в эти точки. Отрезок относительного движения ОПС, отвечающий участку изменения курса (принято - дуге окружности), является криволинейным. Этот отрезок можно представить несколькими его точками, взятыми через малый интервал времени. Для упрощения ниже упомянутая дуга окружности заменяется эквивалентным по времени отрезком прямолинейного равномерного движения. Так как расстояние, проходимое ОПС при изменении курса, обычно невелико, то такая замена не приведет к существенной погрешности оценки в СПС ППС дистанции кратчайшего сближения с ОПС.

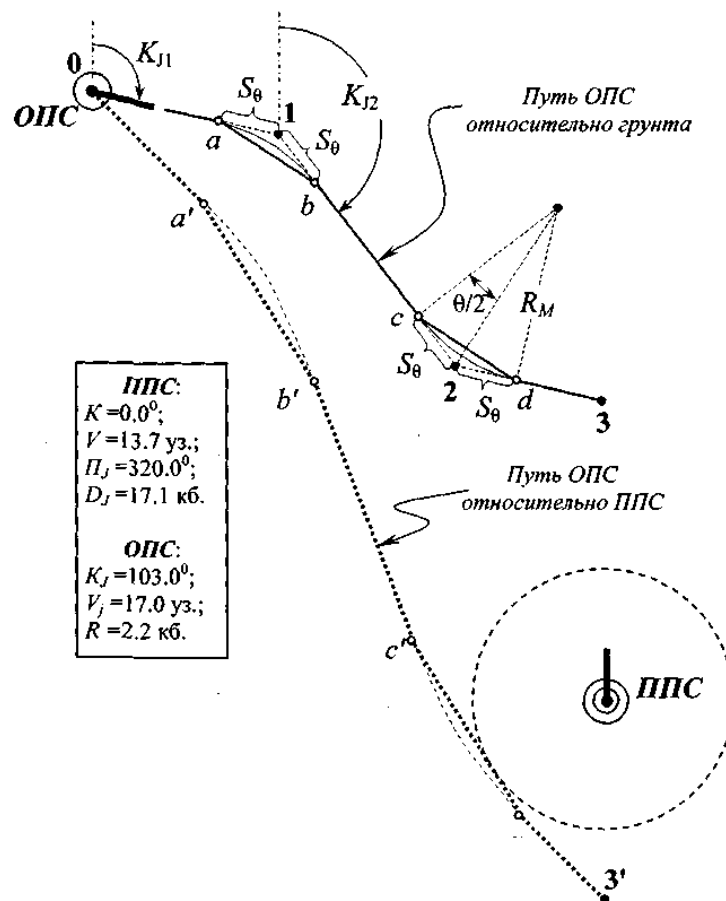


Рис. 1. К прогнозу пути ОПС относительно ППС по информации о намечаемом ОПС В-маневре

Допустим, что ППС идет курсом  $K = 0$ , а ОПС для расхождения с ним выбрало включающий В-маневр маршрут с путевыми точками 0, 1, 2, 3 (рис. 1). Пеленг и дистанция ОПС в момент  $t_0$  равны  $\Pi_J, D_J$ . В этом случае по

принятым ППС от ОПС данным прогноз относительного перемещения ОПС можно выполнить следующим образом.

По формулам вида (1) рассчитываются относительные координаты  $x_0', y_0'$  ОПС на момент  $t_0$ . Находится длина  $S_{0a}$  отрезка  $0\_a$  и момент  $t_a$  прихода ОПС в точку  $a$  (см. рис.1)

$$S_\theta = R_M \cdot \tan \frac{\theta}{2}, \quad S_{0a} = S_{01} - S_\theta, \quad \Delta_T = S_{0a} / V_J, \quad t_a = t_0 + \Delta_T; \quad (2)$$

где  $\theta$  - угол поворота;

$S_{01}$  - расстояние между путевыми точками 0 и 1 (рассчитывается по переданным ОПС координатам путевых точек 0 и 1);

$S_\theta$  - дистанция до путевой точки, на которой надо начать поворот, чтобы точно выйти на следующий отрезок пути;

$V_J$  - скорость движения ОПС.

На момент  $t_a$  определяются координаты ОПС

$$\left. \begin{aligned} X_{Ja} &= X_{J1} - S_\theta \sin K_{J1} \\ Y_{Ja} &= Y_{J1} - S_\theta \cos K_{J1} \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

где  $K_{J1}$  - курс ОПС на первом отрезке планируемого пути.

Так как ППС не изменяет курс  $K$  и скорость  $V$ , то прогноз его координат на момент  $t_a$  будет следующим

$$\left. \begin{aligned} X_a &= X_0 + V \cdot (t_a - t_0) \cdot \sin K \\ Y_a &= Y_0 + V \cdot (t_a - t_0) \cdot \cos K \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Вычисляются координаты  $x_{a'}, y_{a'}$  ОПС на момент  $t_a$ . Соединив точки с координатами  $x_0', y_0'$  и  $x_{a'}, y_{a'}$ , получим первый отрезок  $0\_a'$  прогнозируемого относительного пути ОПС (см. рис.1).

Находим время  $\tau_R$  движения ОПС по дуге окружности и момент  $t_b$  ее прихода в точку  $b$

$$\tau_R = R_M \cdot \theta / V_J; \quad t_b = t_a + \tau_R. \quad (5)$$

Прогнозируем место ОПС на момент  $t_b$

$$\left. \begin{aligned} X_{Jb} &= X_{J1} + S_\theta \sin K_{J2} \\ Y_{Jb} &= Y_{J1} + S_\theta \cos K_{J2} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

где  $K_{J2}$  - курс ОПС на втором отрезке планируемого пути.

Координаты  $X_b, Y_b$  и  $x_{b'}, y_{b'}$  положения ОПС на момент  $t_b$  рассчитываются по формулам вида (4) и (1). Соединяя точки с координатами  $x_{a'}, y_{a'}$  и  $x_{b'}, y_{b'}$ , получаем отрезок  $a'_b$  относительного пути ОПС.

Последующие отрезки прогнозируемого относительного пути ОПС находятся аналогично.

**Прогноз включающего изменение скорости пути ОПС относительно ППС.** В маршрут расхождения, содержащий планируемый ОПС маневр скоростью, включаются [4] его исходная 0 и конечная 3 точки (рис. 2), а также точки 1 и 2 инициации и окончания этого маневра.

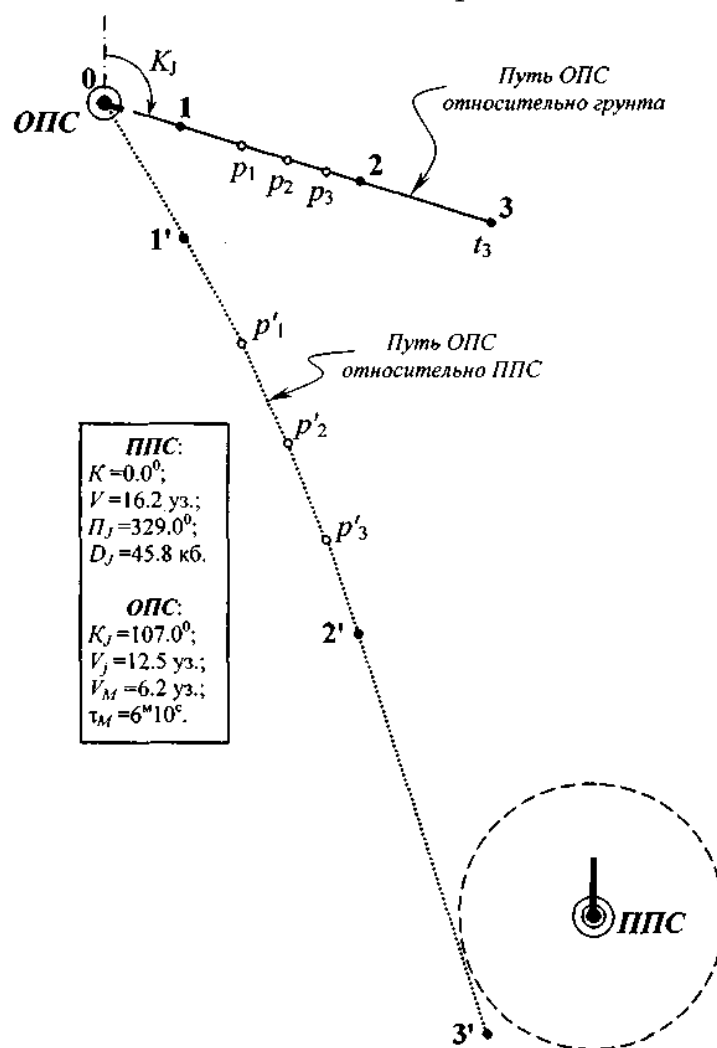


Рис. 2. К прогнозу пути ОПС относительно ППС по информации о намечаемом ОПС изменении скорости

Построение в СПС ППС относительной траектории ОПС в этом случае включает следующие операции.

На момент  $t_0$  (см. рис. 2) по известным положениям ППС и ОПС рассчитываются значения  $x_0', y_0'$  относительных координат ОПС. Находится расстояние  $S_{01}$  между точками 0, 1 и момент  $t_1$  прихода ОПС в точку 1

$$t_1 = t_0 + S_{01} / V_J; \quad (7)$$

где  $V_J$  - скорость ОПС перед маневром.

Ожидаемое время прихода ОПС в точку 2 равно  $t_2 = t_1 + \tau_M$ . По известным координатам точек 2 и 3 рассчитывается расстояние  $S_{23}$  и момент  $t_3$  прихода ОПС в точку 3

$$t_3 = t_2 + S_{23} / V_M. \quad (8)$$

На моменты  $t_1, t_2, t_3$  находятся координаты ППС ( $X_1, Y_1; X_2, Y_2; X_3, Y_3$ ) и относительные координаты ОПС ( $x_1', y_1'; x_2', y_2'; x_3', y_3'$ ). Так как на первом и третьем участке ОПС будет двигаться постоянным курсом и скоростью, то соответствующие этим участкам отрезки  $0_1'$  и  $2_3'$  относительного пути ОПС будут прямолинейными. На участке изменения скорости путь ОПС относительно ППС будет криволинейным. Без больших погрешностей его можно заменить ломаной линией с достаточным числом отрезков. Отметим, что если при намеченном ОПС плане расхождения кратчайшее расстояние между судами будет после выполнения изменения скорости, то участок  $1_2$  можно заменить эквивалентным по времени отрезком прямолинейного равномерного движения.

Рассмотрим представление ломаной линией пути ОПС относительно ППС.

По координатам точек 1 и 2 находится расстояние  $S_M$  изменения скорости. Время маневра  $\tau_M$  делится на  $n$  интервалов (на рис. 2  $n = 4$ ) и рассчитываются моменты  $t_{pk}$

$$\Delta_\tau = \tau_M / n; \quad t_{pk} = t_1 + k \cdot \Delta_\tau; \quad (9)$$

где  $k = 1, 2, \dots, n - 1$ .

Для возможности определения положений  $p_k$  ОПС в моменты  $t_{pk}$  представим процесс изменения скорости математической моделью

$$\left. \begin{aligned} S &= V_J \tau + q_1 \tau^2 + q_2 \tau^3 \\ V &= V_J + 2q_1 \tau + 3q_2 \tau^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Отметим, что второе уравнение получается дифференцированием по  $\tau$  первого уравнения. Коэффициенты  $q_1$  и  $q_2$  модели находятся из линейной

системы двух уравнений, получаемой после подстановки в выражение (10) вместо  $S, V, \tau$  известных значений  $S_M, V_M, \tau_M$ .

Зная коэффициенты  $q_1$  и  $q_2$ , с помощью первого уравнения системы (10) можно найти расстояния от точки 1 до точек  $p_k$

$$S_{pk} = V_J \cdot \tau_k + q_1 \tau_k^2 + q_2 \tau_k^3; \quad (11)$$

где  $\tau_k = k \cdot \Delta_\tau$ .

По координатам точки 1, курсу  $K_J$  ОПС и значениям  $S_{pk}$  рассчитываются координаты точек  $p_k$  траектории ОПС. Затем на моменты  $t_{pk}$  прогнозируется положение ППС и по формулам (1) находятся координаты точек  $p'_k$  пути ОПС относительно ППС. Соединив точки 0, 1',  $p'_1, p'_2, p'_3, 2', 3'$  прямыми линиями, получим приближенную траекторию движения ОПС по отношению к ППС (см. рис. 2).

**Прогноз включающего циркуляцию пути ОПС относительно ППС.** В маршрут расхождения, включающий планируемую ОПС циркуляцию, вносятся [4] его исходная 0 и конечная 3 точки (рис. 3), а также точки начала 1 и окончания 2 маневра. Построение в СПС ППС относительной траектории ОПС включает следующие операции.

С помощью выражений (1) рассчитываются значения  $x_0, y_0$  относительных координат ОПС на момент  $t_0$ . Находится расстояние  $S_{01}$  между точками 0, 1 и момент  $t_1$  прихода ОПС в точку 1 начала циркуляции

$$t_1 = t_0 + S_{01} / V_J.$$

Точка  $p_0$  начала движения ОПС по окружности совпадает с точкой 2. ОПС будет в точке  $p_0$  в момент

$$t_{p0} = t_1 + S_{12} / V_J = t_1 + \tau_{12}, \quad (12)$$

где  $S_{12}, \tau_{12}$  - расстояние и время движения ОПС по отрезку 1- $p_0$ .

Время прихода ОПС в точку конца циркуляции равно  $t_2 = t_1 + \tau_M$ . По известным координатам точек 2 и 3 рассчитывается расстояние  $S_{23}$  и момент  $t_3$  прихода ОПС в точку 3

$$t_3 = t_2 + S_{23} / V_J.$$



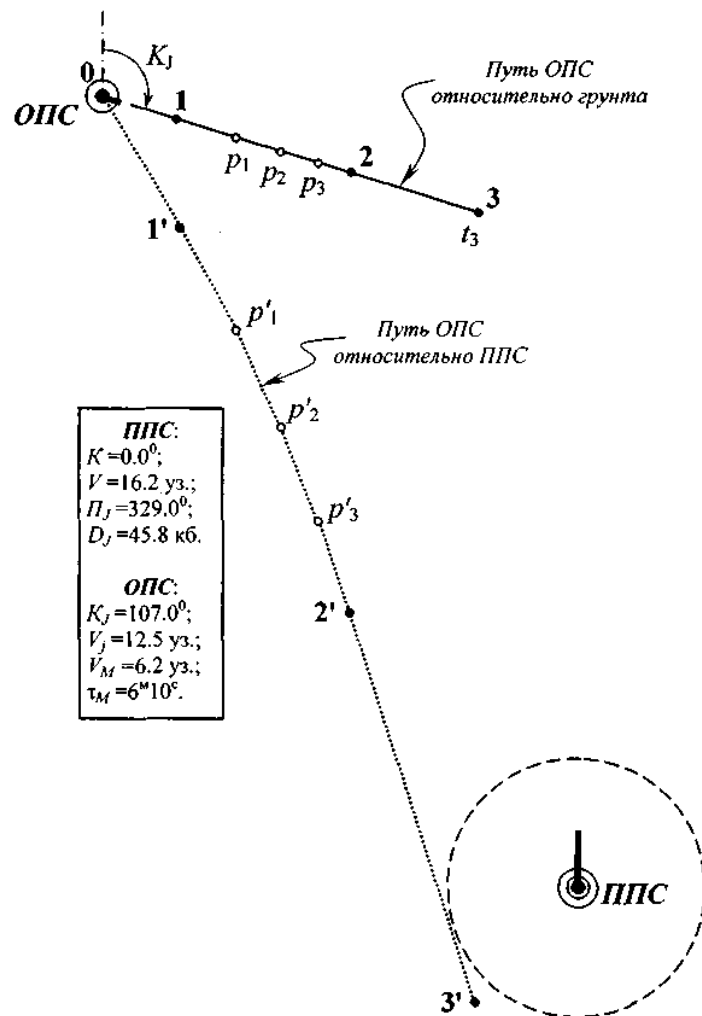


Рис. 3. К прогнозу пути ОПС относительно ППС по информации о намечаемой ОПС циркуляции

На моменты  $t_{p0}, t_2, t_3$  находятся координаты собственного судна ( $X_{p0}, Y_{p0}; X_2, Y_2; X_3, Y_3$ ) и относительные координаты ОПС ( $x_{p0'}, y_{p0'}; x_{2'}, y_{2'}; x_{3'}, y_{3'}$ ).

На участках  $0_{p0}$  и  $2_3$  маршрута расхождения ОПС будет двигаться постоянным курсом и скоростью, поэтому соответствующие этим участкам отрезки  $0_{p0}'$  и  $2'_3$  относительного пути ОПС будут прямолинейными. При перемещении по окружности путь ОПС относительно ППС будет криволинейным. Без больших погрешностей его можно заменить ломаной линией с достаточным числом отрезков. Отметим, что циркуляцию можно заменить эквивалентным по времени отрезком прямолинейного равномерного движения, если кратчайшее расстояние между ОПС и ППС будет после выполнения этого маневра.

Рассмотрим процедуру представление ломаной линией пути ОПС относительно ППС.

Находится время движения ОПС по окружности и ее приближенный радиус

$$\tau_R = t_2 - t_{p0}, \quad R_M = V_J \tau_R / (2\pi). \quad (13)$$

Точками  $p_k$  (где  $k = 1, 2, \dots, n-1$ ) путь перемещения ОПС по окружности делится на  $n$  одинаковых интервалов (на рис. 3  $n = 8$ ). Определяются моменты  $t_{pk}$  прихода ОПС в точки  $p_k$

$$t_{pk} = t_{p0} + k \cdot \Delta_\tau; \quad (14)$$

где  $\Delta_\tau = \tau_R / n$ .

По координатам точки 2, курсу  $K_J$  ОПС перед маневром и радиусу  $R_M$  находятся координаты  $X_C, Y_C$  центра  $C$  циркуляции. Рассчитываются координаты ОПС на моменты  $t_{pk}$

$$\left. \begin{aligned} X_{Jk} &= X_C + R_M \cdot \sin(K_J \pm \pi/2 + \theta_k) \\ Y_{Jk} &= Y_C + R_M \cdot \cos(K_J \pm \pi/2 + \theta_k) \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где  $\theta_k = k \cdot 2\pi / n$ .

На моменты  $t_{pk}$  по формулам вида (4) и (1) прогнозируются координаты ППС ( $X_k, Y_k$ ) и относительные координаты ОПС ( $x_{k'}, y_{k'}$ ). Соединив точки 0,  $p'_0, \dots, p'_7, 2', 3'$  прямыми линиями, получим приближенную траекторию движения ОПС по отношению к ППС (см. рис. 3).

### **Выводы и перспективы дальнейшей работы по данному направлению**

Предложенные алгоритмы позволяют с достаточной точностью предсказать относительный путь планирующего маневр расхождения ОПС. Отображение этого пути на экране СПС ППС облегчает понимание дальнейшего развития коллизионной ситуации, позволяет быстрее принять правильное решение по расхождению.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении / А.С. Мальцев – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
2. Управление судном: Учебник для вузов / С.И. Демин, Е.И. Жуков, Н.А.Кубачев и др. / под ред. В.И. Снопкова. – М.: Транспорт. 1991. – 359 с.
3. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н.Цымбал, И.А.Бурмака, Е.Е.Тюпиков – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
4. Вагущенко Л.Л. Метод использования АИС для повышения эффективности действий по предупреждению столкновений судов /Л.Л. Вагущенко //Судовождение: Сб. науч. трудов / ОНМА, Вып. 22. – Одесса: «ИздатИнформ», 2013 – С. 35-47.