

УДК 656.61.052

АНАЛИЗ ВЕКТОРИАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ СУДНОМ

Северин В. В., аспирант Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: burmaka-mob@ukr.net;

Казак Ю. В., аспирант Национального университета «Одесская морская академия»;

Пасечнюк С. С., аспирант Национального университета «Одесская морская академия»

Выявлены факторы, ведущие к появлению векториальных погрешностей поворота судна, которыми являются погрешность перекладки пера руля и погрешность момента времени начала маневра поворота. Показан механизм формирования векториальных погрешностей поворота и получены формулы оценки значений векториальной погрешности поворота судна при появлении погрешности перекладки пера руля и погрешности момента времени начала маневра поворота.

Предложена процедура определения величины векториальной погрешности поворота судна, возникающая из-за погрешности перекладки пера руля и зависящая от выбранной динамической модели вращательного движения судна. Получены аналитические выражения для оценки величины векториальной погрешности для динамической модели вращательного движения судна третьего порядка, которая наиболее адекватная реальному процессу поворота судна.

Сделано предположение о законе распределения составляющих векториальной погрешности поворота, в качестве которого предлагаются смешанные законы распределения вероятностей первого и второго типов.

Ключевые слова: безопасность судовождения, векториальная погрешность поворота, погрешность перекладки пера руля, погрешность момента времени начала маневра поворота, динамическая модель вращательного движения.

Постановка проблемы. Обеспечение безопасности судовождения в стесненных районах плавания является одной из наиболее актуальных проблем мореплавания. С ее решением связано снижение числа навигационных аварий, возникающих из-за посадок судов на мель. Вероятность возникновения навигационных аварий можно снизить повышением точности управления судном при выполнении им поворотов, т. е. минимизацией векториальных погрешностей поворота.

Поэтому следует выявить существенные факторы, влияющие на формирования таких погрешностей, и предупредить их отрицательное влияние на процесс судовождения.

Анализ последних достижений и публикаций. В работе [1] впервые предложена оценка надежности судовождения, т. е. влияния позиционной погрешности судна на навигационную безопасность, причем учитывалась только позиционная векториальная погрешность определения места судна при его прохождении ряда последовательных точечных навигационных опасностей. в работах [2, 3] отражено дальнейшее развитие этого направления исследований, причем критерий навигационной безопасности обоснован в работе [2], в работе [3] рассмотрены два эквивалентные подхода к оценке вероятности безаварийной проводки судна по заданному маршруту. Данные работы для оценки навигационной безопасности учитывают только позиционную погрешность при следовании судна прямолинейными участками программной траектории, однако следует также учитывать и векториальную погрешность поворота судна, чему посвящена работа [4]. Сравнительный анализ математических моделей вращательного движения судна при повороте рассмотрен в работе [5], а в работе [6] представлены результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики при повороте.

Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных линиях положения произведена в работе [7], показано, что при смешанных законах распределениях эффективность меньше единицы, и с ростом существенного параметра она стремится по величине к единице.

Вопрос разработки информационной системы имитационного моделирования движения судов со сложными динамическими моделями освещен в работе [8], которая позволит обеспечить новый тип планирования маневров судна и контроль проведения

выполняемого маневра с поточным отображением заданного маневра одновременно с фактическим движением судна и с индикацией прогнозируемой траектории.

Как указывается в работе [9], анализ статистических материалов показал, что предположение о распределении случайных погрешностей определения широты и долготы по закону Гаусса не является корректным и требует альтернативного подхода.

Цель статьи. Цель настоящей статьи – выявление механизма формирования векториальных погрешностей управления судном и формализация процедуры их оценки.

Изложение основного материала.

Векториальная траекторная погрешность поворота судна $S^{(\Sigma)}$ относительно прогнозируемой точки выхода судна на очередной участок программной траектории появляется по причине погрешности перекладки пера руля $\Delta\beta_k$ или погрешности момента времени начала поворота Δt . Вначале рассмотрим векториальную погрешность $S^{(\beta)}$, которая возникает из-за погрешности перекладки пера руля $\Delta\beta_k$. С этой целью обратимся к рис. 1. Если угол кладки руля β_k не содержит погрешности, то к концу маневра поворота судно окажется на новом участке программной траектории в точке М и векториальная погрешность $S^{(\beta)}$ не возникает. При наличии погрешности $\Delta\beta_k$ угол кладки руля равен $\beta_k + \Delta\beta_k$, и к концу маневра, когда судно достигает курса K_y , оно оказывается в точке N. Погрешность $S^{(\beta)}$ определяется величиной отрезка MN, а ее составляющие $S_x^{(\beta)}$ и $S_y^{(\beta)}$ равны:

$$S_x^{(\beta)} = x_N - x_M \text{ и } S_y^{(\beta)} = y_N - y_M, \tag{1}$$

где x_M и y_M – координаты точки М; x_N и y_N – координаты точки N.

Для определения координат точек М и N рассмотрим динамическую модель вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью, согласно которой приращение координат точки М за время поворота определяется выражениями:

$$x_M = \frac{V_o}{k_\omega \beta_k} (\cos K_o - \cos K_y), \quad y_M = \frac{V_o}{k_\omega \beta_k} (\sin K_y - \sin K_o),$$

где k_ω – коэффициент эффективности руля.

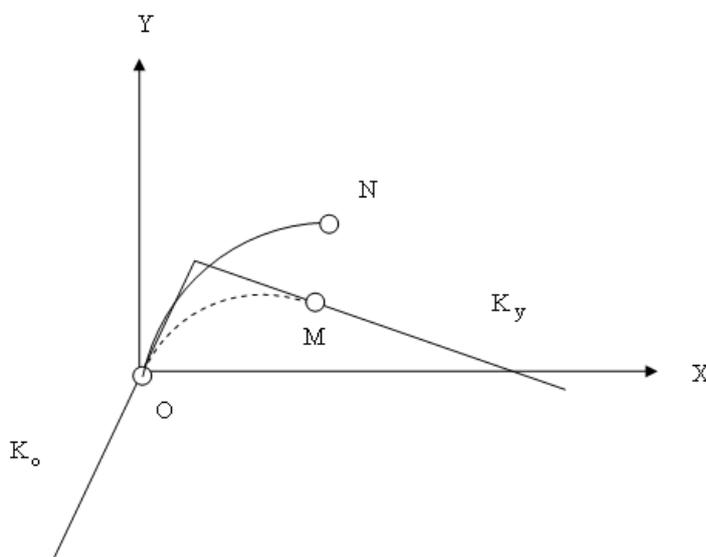


Рисунок 1 – Возникновение векториальной погрешности $S^{(\beta)}$

Аналогічно знаходимо вираження для координат x_N і y_N точки N, учитывая, что угол кладки пера руля увеличился на величину погрешности $\Delta\beta_k$:

$$x_N = \frac{V_o}{k_\omega (\beta_k + \Delta\beta_k)} (\cos K_o - \cos K_y),$$

$$y_N = \frac{V_o}{k_\omega (\beta_k + \Delta\beta_k)} (\sin K_y - \sin K_o).$$

С учетом выражения (1) и того, что $\beta_k \gg \Delta\beta_k$, составляющие $S_x^{(\beta)}$ и $S_y^{(\beta)}$ векториальной погрешности $S^{(\beta)}$ имеют вид:

$$S_x^{(\beta)} = \frac{-V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\cos K_o - \cos K_y) \Delta\beta_k,$$

$$S_y^{(\beta)} = \frac{V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_o) \Delta\beta_k.$$

Рассмотрим векториальную погрешность $S^{(t)}$, возникающую из-за погрешности момента времени начала поворота Δt (рис. 2).

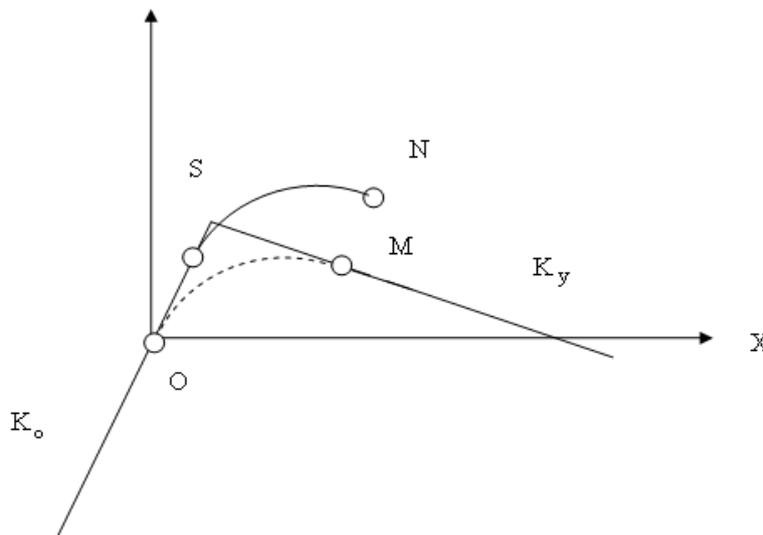


Рисунок 2 – Формирование векториальной погрешности $S^{(t)}$

Как следует из рис. 2, погрешность $S^{(t)}$ равна отрезку MN, который в свою очередь совпадает по величине с отрезком OS. Поэтому:

$$S^{(t)} = OS = V_o \Delta t.$$

Составляющие $S_x^{(t)}$ и $S_y^{(t)}$ данной векториальной погрешности имеют вид:

$$S_x^{(t)} = V_o \sin K_o \Delta t,$$

$$S_y^{(t)} = V_o \cos K_o \Delta t.$$

Векториальная траекторная погрешность поворота судна $S^{(\Sigma)}$ определяется очевидным выражением $S^{(\Sigma)} = S^{(\beta)} + S^{(t)}$.

При использовании модели поворотливости судна для оценки векториальной погрешности $S^{(\beta)}$ определяющим обстоятельством является степень соответствия динамической модели вращательного движения судна реальному процессу его поворота. Поэтому рассмотрим способ определения величины $S^{(\beta)}$ при использовании более адекватной модели вращательного движения судна.

В работе [4] рассмотрены различные модели вращательного движения судна, анализ которых показывает, что наиболее адекватная динамическая модель вращательного движения судна описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$T_1 T_2 \ddot{K} + (T_1 + T_2) \dot{K} + K = k_{\omega} \beta_k,$$

где T_1 и T_2 – постоянные времена, характеризующие инерционные свойства судна; β_k – угол кладки руля; k_{ω} – коэффициент эффективности руля.

Решение приведенного дифференциального уравнения имеет следующий вид:

$$K = K_0 + \omega_r t + (\omega_0 - \omega_r) \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2), \quad (2)$$

где ω_0 и ω_r – соответственно начальное значение угловой скорости поворота и частное решение исходного дифференциального уравнения.

Поворот судна содержит две фазы кладки пера руля. Сначала, на первой фазе, в начальный момент времени производится перекладка руля на угол β_k и руль удерживается в таком положении в течение интервала времени Δt_k . Затем производится перекладка руля на противоположный борт на ту же величину и гасится инерция поворота судна в течение интервала времени Δt , по истечению которого судно выходит на заданный курс, угловая скорость поворота обращается в нуль, а перо руля приводится в диаметрально плоскость судна. На первой фазе поворота, длительность которой составляет интервал времени Δt_k , выражение (2) приобретает следующий вид:

$$K = K_0 + a_{\omega} \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \}. \quad (3)$$

На второй фазе поворота происходит перекладка руля на противоположный борт на угол $-\beta_k$ и в течение интервала времени Δt происходит одерживание судна. Для этой фазы поворота значение текущего курса описывается зависимостью:

$$\begin{aligned} \tilde{K} = K - a_{\omega} t + \\ a_{\omega} \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times \\ \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2). \end{aligned} \quad (4)$$

Для вычисления интервалов времени Δt_k и Δt необходимо составить систему уравнений, которая в общем случае формализует требования поворота на заданное приращение курса ΔK , а также обращение в нуль угловой скорости на момент времени выхода на новый курс и имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t) \\ \omega(\Delta t_k, \Delta t) = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

С учетом выражений (3) и (4) и системы уравнений (5) находим выражения для расчета интервалов времени Δt_k и Δt методом простых итераций с начальным приближением $\Delta t_k = \Delta K / a_\omega$:

$$\Delta t_k = \Delta t + \{ T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)] \} / (T_1 - T_2) - \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times \{ T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_2)] \} / (T_1 - T_2) + \Delta K / a_\omega \dots \quad (6)$$

$$\Delta t = -T_1 \ln \{ (T_2 / T_1) \exp(-\Delta t / T_2) + [(T_1 - T_2) / T_1] \times \{ 2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2)] / (T_1 - T_2) \}^{-1} \}. \quad (7)$$

Таким образом, для расчета величин Δt_k и Δt методом простых итераций, задаваясь предыдущим значением Δt_k , с помощью выражения (7) вычисляется значение Δt , которое затем подставляется в выражение (6) для расчета последующего значения Δt_k .

Для определения погрешности $S^{(\beta)}$ необходимо определить координаты точек М и N. Координаты точки М определяются выражениями:

$$x_M = \int_0^{\Delta t_k} V_o \sin [K_o + K] dt + \int_0^{\Delta t} V_o \sin [K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt, \quad (8)$$

$$y_M = \int_0^{\Delta t_k} V_o \cos [K_o + K] dt + \int_0^{\Delta t} V_o \cos [K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}] dt, \quad (9)$$

причем в выражениях (3), (4), (6) и (7) применяем $a_\omega = k_\omega \beta_k$.

Аналогично находятся выражения для координат x_N и y_N точки N, только при их расчете по формулам (8) и (9) значение $a_\omega = k_\omega (\beta_k + \Delta \beta_k)$. При расчете координат с помощью (8) и (9) определенные интегралы, которые входят в эти формулы, не выражаются в элементарных функциях и их значения находятся численными методами, например, используется метод Симпсона.

Закон распределения вероятностей составляющих $S_x^{(\beta)}$ и $S_y^{(\beta)}$ случайной векториальной погрешности определяется законом распределения погрешностей реализации маневра поворота судна, т. е. погрешности перекладки пера руля $\Delta \beta_k$ и погрешности момента времени начала поворота Δt .

Как показано в работе [10], анализ статистических материалов, полученных в натуральных наблюдениях в реальных условиях эксплуатации, показал, что погрешности измерений навигационных параметров подчиняются смешанным законам распределения двух типов, плотности которых имеют вид [11]:

$$f_1(x) = \frac{2^n \alpha^{n+\frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2\pi} 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)} \frac{1}{(x^2 / 2 + \alpha)^{n+1}}, \quad (n \leq 6),$$

$$f_2(x) = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \alpha^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!} \frac{1}{(x^2 / 2 + \alpha)^{n+3/2}}, \quad (n \leq 5)$$

где α – масштабный параметр; n – существенный параметр.

Следовательно, можно предположить, что составляющие $S_x^{(\beta)}$ и $S_y^{(\beta)}$, как случайные величины, могут подчиняться смешанным законам распределения двух типов.

Выводы

1. Показано, что факторами, которые ведут к появлению векториальных погрешностей поворота судна, являются погрешности перекладки пера руля и момента времени начала маневра поворота.

2. Получены аналитические выражения для оценки величины векториальной погрешности поворота судна в зависимости от погрешности перекладки пера руля и погрешности момента времени начала маневра поворота.

3. Рассмотрено влияние типа динамической модели вращательного движения судна, выбранной для прогноза траектории поворота, на величину векториальной погрешности поворота.

4. Обосновано предположение о законе распределения составляющих векториальной погрешности поворота, в качестве которого предлагаются смешанные законы распределения вероятностей первого и второго типов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. – М.: Транспорт, 1989. – 230 с.

2. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения / Мельник Е.Ф. // Судовождение. – 2002. – № 5. – С. 65–73.

3. Ворохобин И.И. Эквивалентность оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе / И.И.Ворохобин, В.В. Северин, Ю.В. Казак // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. – 2015. – Вып. 25. – С. 47–55.

4. Ворохобин И.И. Векториальные погрешности, возникающие при повороте судна / И.И.Ворохобин, Ю.В. Казак // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. – 2016. – Вып. 26. – С. 56–59.

5. Kalinichenko Y. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning. / Y. Kalinichenko, I. Burmaka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 6/9 (84). – P. 20–31.

6. Бурмака И. А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / И. А. Бурмака // Судовождение: сб. научн. трудов. – 2005. – №10. – С. 21–25.

7. Бурмака И. А. Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 1 (35). – С. 24–29.

8. K. Benedict. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling / K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf, S. Klaes // TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 8, № 1, page 131–141, 2014.

9. Monteiro Luis. What is the accuracy of DGPS?/Sardinia Monteiro Luis, Moore Terry, Hill Chris. // J. Navig. 2005. 58, № 2, P. 207–225.

10. Алексейчук Б. М. Идентификация закона распределения погрешностей измерений / Алексейчук Б.М., Пасечнюк С.С. // Судовождение : сб. научн. трудов. / ОНМА, Вып. 27. – Одесса : «ИздатИнформ», 2016. – С. 10–14.

11. Астайкин Д. В. Идентификация законов распределения навигационных погрешностей смешанными законами двух типов / Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. – С. 3–9.

REFERENCES

1. Kondrashikhin V.T. Location of ship / Kondrashikhin V.T. M.: Transport, 1989. 230s.
2. Melnik E.F. Ground of choice of criterion of navigation safety of navigator / Melnik E.F. // Sudovozhdenye. – 2002. – № 5. – P. 65–73.
3. Vorokhobin I.I. Equivalence of estimation of probability of the accident-free sailing of ship in the straitened district / I.I.Vorokhobin, V.V. Severin, Y.V. Kazak // Sudovozhdenye : sb. nauchn. trudov. 2015. Vyp. 25. – P. 47 – 55.
4. Vorokhobin I.I. Vektor's errors arising up at the turn of ship/ I.I. Vorokhobin, Y.V. Kazak // Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov. – 2016. – Vyp. 26. – P. 56–59.
5. Kalinichenko Y. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning. / Y. Kalinichenko, I. Burmaka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 6/9 (84). – P. 20–31.
6. Burmaka Y.A. Results of imitation design of process of divergence of vessels taking into account their dynamics / Burmaka Y.A. // Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov. – 2005. – № 10. – P. 21–25.
7. Burmaka I.A. Estimation of efficiency of coordinates of ship at the surplus measuring / Burmaka I.A., Astaykin D.V., Alekseychuk B.M. // Vestnik Gosudarstvennogo univtrsiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. Sankt-Peterburg. – 2016. – Vypusk 1 (35). – P. 24 - 29.
8. K. Benedict. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling / K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf, S. Klaes // TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 8, № 1, page 131-141, 2014.
9. Monteiro Luis. What is the accuracy of DGPS? / Sardinia Monteiro Luis, Moore Terry, Hill Chris. // J. Navig. 2005. 58, № 2, p. 207-225.
10. Alekseychuk B.M. Authentication of law of distributing of errors of measuring / Alekseychuk B.M., Pasechnyuk S.S. // Sudovozhdenie: Sb. nauchn. trudov. / ONMA, Vyp. 27. – Odessa: «IzdatInform», 2017. – P. 10–14.
11. Astayrin D.V. Authentication of laws of distributing of navigation errors by the mixed laws of two types / Astayrin D.V., Alekseychuk B.M. // Avtomatizatsiya sudovyh tehnicytskih sredstv: nauch.-tehn. sb. – 2014. – Vyp. 20. Odessa: ONMA. – P. 3–9.

Северін В. В., Казак Ю. В., Пасечнюк С. С. АНАЛІЗ ВЕКТОРІАЛЬНИХ ПОХИБОК УПРАВЛІННЯ СУДНОМ

Виявлені чинники, що ведуть до появи векторіальних похибок повороту судна, якими є похибка перекладання керма і похибка моменту часу початку маневру повороту. Показаний механізм формування векторіальних похибок повороту і одержані формули оцінки значень векторіальної похибки повороту судна при появі похибки перекладання керма і похибки моменту часу початку маневру повороту.

Запропонована процедура визначення величини векторіальної похибки повороту судна, яка виникає через похибку перекладання керма і залежна від вибраної динамічної моделі обертального руху судна. Одержані аналітичні вирази для оцінки величини векторіальної похибки для динамічної моделі обертального руху судна третього порядку, яка найбільш адекватна реальному процесу повороту судна.

Зроблено припущення про закон розподілу складових векторіальної похибки повороту, яким пропонуються змішані закони розподілу вірогідності першого і другого типів.

Ключові слова: безпека судноводіння, векторіальна похибка повороту, похибка перекладання керма, похибка моменту часу початку маневру повороту, динамічна модель обертального руху.

Severin V. V., Kazak Y. V., Pasechnyuk S. S. ANALYSIS OF VECTOR'S ERRORS OF MANAGEMENT BY A SHIP

Factors, conducing to appearance of vector's errors of turn of ship, which the error of change of position of feather of helm and error of moment of time of beginning of maneuver of turn are, are exposed. The mechanism of forming of vector's errors of turn is shown and the formulas of estimation of values of vector's error of turn of ship at appearance of error of change of position of feather of helm and error of moment of time of beginning of maneuver of turn are got.

Procedure of determination of size of vector's error of turn of ship is offered, arising up from the error of change of position of feather taxiing and depending on the chosen dynamic model of rotatory motion of ship. Analytical expressions for estimation of size of vector's error for the dynamic model of rotatory motion of ship of the third order, which most adequate to the real process of turn of ship, are got.

Supposition about the law of distributing of constituents of vector's error of turn is done, which the mixed laws of probability distribution of the first and second types are offered as.

Keywords: safety of navigator, vector's error of turn, error of change of position of feather taxiing, error of moment of time of beginning of maneuver of turn, dynamic model of rotatory motion.

© Северін В. В., Казак Ю. В., Пасечнюк С. С.

Статтю прийнято
до редакції 23.01.18