

УДК 681.511  
EDN GEUEZD

А. Е. ПЕЛЕВИН, А. В. ЛОПАРЕВ, Е. В. ЛУКОЯНОВ, А. М. СТОЛЯРОВА

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ СУДНА И СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ЕЕ ОСНОВЕ

*В статье описывается технология построения имитационной модели движения надводного судна (на примере автомобильно-железнодорожного паромы) по заданному набору и характеристикам исполнительных органов. На основе построенной модели разработаны алгоритмы управления для стабилизации продольной составляющей линейной скорости судна и стабилизации на курсе.*

**Ключевые слова:** динамическая модель, маневренные характеристики, возмущения, управление.

### Введение

Имитационные модели подвижных объектов традиционно применяются для разработки законов управления в различных режимах движения. Значительное место модели движения судов занимают и при проектировании тренажеров, используемых не только для отладки взаимодействия систем навигации и управления, но и для обучения судоводителей. При этом понятно, что как при построении закона управления, так и при обучении имитационная модель должна быть адекватна реальному движению судна. Выбор модели движения судна полностью зависит от набора решаемых им задач и, как следствие, от набора задач управления движением и обработки навигационной информации. При построении имитационной модели в качестве критерия ее адекватности целесообразно рассматривать соответствие вырабатываемых навигационных и динамических параметров реальному движению судна с учетом воздействия ветра, волнения и течения. В этом случае исходными данными для построения модели движения являются указанные в резолюциях Международной морской организации [1–3] тормозные и разгонные характеристики, характеристики маневренности (циркуляции), снимаемые на ходовых испытаниях судна и фиксируемые в маневренном буклете (МБ), а также требования Российского морского регистра судоходства [4].

В настоящее время рассматриваемая задача решается преимущественно путем представления динамики судов в виде упрощенных моделей, отвечающих экспериментальным данным и приближенно описывающих движение судна в горизонтальной плоско-

---

**Пелевин** Александр Евгеньевич. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

**Лопарев** Алексей Валерьевич. Кандидат технических наук, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО (С.-Петербург).

**Лукоянов** Егор Васильевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО.

**Столярова** Александра Максимовна, инженер второй категории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Статья по докладу на XXXIV конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова, 2024.

сти [5–7]. В работах [8–12] построение упрощенных моделей сопровождается специальными эвристическими формулами для определения характерных параметров судна. Такой подход не позволяет в полной мере получить представление о поведении судна в различных режимах его движения, в том числе при швартовке и динамическом позиционировании, и отработать алгоритмы формирования управляющих воздействий.

В статье предлагается методика построения модели надводного судна с пятью степенями свободы и излагаются ее принципы и особенности. Использование модели дает возможность имитировать навигационные данные, выработанные инерциальной навигационной системой (ИНС), лагом, приемной аппаратурой спутниковых навигационных систем, что обуславливает принятый порядок модели, описывающей динамические и кинематические параметры [13–18]. Возмущениями, действующими на судно, являются воздействия ветра, волнения и течения.

В качестве примера рассматривается построение модели движения автомобильно-железнодорожного паром проекта CNF19M (рис. 1). Основные характеристики парома [19]:

- длина – 199,9 м;
- ширина – 27,4 м;
- водоизмещение – 21 647 т;
- осадка – 6 м;
- скорость эксплуатационная – 16,5 уз.



Рис. 1. Общий вид автомобильно-железнодорожного парома проекта CNF19M

Статья состоит из четырех основных разделов. Первый содержит исходные данные для построения модели – состав движительно-рулевого комплекса и содержание МБ. Во втором описывается модель движения судна, которая представляет собой систему из пяти нелинейных дифференциальных уравнений в связанной системе координат и пяти кинематических соотношений, формирующих ориентацию судна в связанной системе координат и траекторию его движения – в географической. В третьем разделе рассматривается предлагаемая методика определения неизвестных коэффициентов представленной модели. И наконец, в четвертом разделе с помощью полученной модели движения судна формируется закон управления, позволяющий обеспечить стабилизацию продольной составляющей скорости судна и его курса, а также приводятся результаты моделирования в условиях внешних возмущающих воздействий.

## Исходные данные для построения модели

При построении имитационной модели полагается, что движительно-рулевой комплекс имеет следующие исполнительные органы:

- два главных бортовых движителя (ГД) с противоположным вращением винтов и винтами регулируемого шага (ВРШ), т.е. управление скоростью хода осуществляется за счет поворота лопастей винтов;
- два носовых подруливающих устройства (ПУ) и одно кормовое ПУ, обеспечивающее создание упоров за счет изменения частоты вращения винтов;
- рулевое устройство (РУ) с двумя рулями за каждым винтом.

Основополагающей эталонной информацией для определения параметров модели движения являются данные МБ, содержащего:

- тормозные и разгонные характеристики;
- траектории циркуляций реального судна при разных углах перекаладки рулей;
- характеристики ПУ.

Имитация возмущающих воздействий (ветра, волнения и течения) осуществляется с использованием моделей, приведенных в [13, 20].

## Описание модели движения

Введем в рассмотрение следующие системы координат (СК):

- связанную с судном СК  $Oxyz$ , центр  $O$  которой находится в центре тяжести (ЦТ), ось  $Ox$  направлена в нос, ось  $Oy$  – на правый борт; ось  $Oz$  – вверх относительно плоскости палубы;
- географическую  $ONE$  (ось  $ON$  направлена на север, ось  $OE$  – на восток), за ее начало принимается некоторая исходная точка, например путевая точка локсодромического участка траектории.

Эйлеровы углы, характеризующие ориентацию осей связанной СК  $Oxyz$  относительно  $ONE$ , обозначаются следующим образом:  $\psi$  – угол рыскания,  $\gamma$  – угол крена,  $\vartheta$  – угол дифферента. При этом  $\psi = K - K^{set}$ , где  $K$  – курс судна,  $K^{set}$  – курсовой угол локсодромического участка. Положительными считаются: крен – на правый борт, дифферент – на корму, рыскание – отклонение носа вправо.

При построении модели используются традиционные для теории качки допущения [13–16]:

- судно обладает симметрией относительно диаметральной плоскости как для обводов, так и для распределения масс, а главные оси инерции совпадают с координатными осями;
- давление в каждой точке погруженной поверхности корпуса судна такое же, как в соответствующей точке волны;
- возможно разделение действующих на судно гидродинамических сил на составляющие потенциальной и вязкостной природы;
- набегающие на судно волны имеют малый угол склона.

Рассматривая движение судна в географической СК, считаем движение центра масс судна близким к горизонтальному, т.е. вертикальные координату и скорость полагаем равными нулю.

Тогда в соответствии с [13–16] модель движения в связанной СК задается системой пяти нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику судна:

$$\begin{aligned}
 (m + \lambda_{11})\dot{V}_x &= (m + \lambda_{22})V_y\omega_z - R_x + T_x + f_1(V^2 + L_r^2\omega_z^2)\delta^2 + F_{ax}, \\
 (m + \lambda_{22})\dot{V}_y &= a_{11}VV_y + a_{12}V\omega_z + n_{11}V_y|V_y| + n_{12}|V_y\omega_z| + f_2V^2\delta + T_{пу} + F_{ay} + F_{wy}, \\
 (J_{xx} + \lambda_{44})\dot{\omega}_x &= \mu_4\omega_x - mgh_0\vartheta + M_{пх} + M_{ax} + M_{wx}, \\
 (J_{yy} + \lambda_{55})\dot{\omega}_y &= \mu_5\omega_y - mgH_0\psi + M_{wy}, \\
 (J_{zz} + \lambda_{66})\dot{\omega}_z &= a_{21}VV_y + a_{22}V\omega_z + f_6V^2\delta + M_{пз} + M_{az} + M_{wz},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $V_x, V_y$  – продольная и поперечная составляющие вектора скорости судна соответственно;  $V$  – модуль вектора скорости;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекции вектора угловой скорости судна на оси связанной СК;  $m$  – масса судна;  $L_r$  – расстояние от центра тяжести до руля судна;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $h_0$  – метацентрическая поперечная высота;  $H_0$  – метацентрическая продольная высота;  $J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$  – моменты инерции судна относительно осей связанной СК;  $\lambda_{ii}$  – присоединенные массы и моменты инерции относительно главных осей;  $T_x$  – сила тяги гребного винта;  $R_x$  – сила сопротивления корпуса судна;  $\delta$  – угол перекадки руля;  $F_{ax}, F_{ay}, M_{ax}, M_{az}$  – проекции аэродинамических сил и моментов на соответствующие оси;  $F_{wy}, M_{пх}, M_{wy}, M_{wz}$  – проекции сил и моментов, создаваемых волнением;  $T_{пу}, M_{пх}, M_{пз}$  – проекции силы и моментов, создаваемых ПУ;  $f_i, a_{ij}, n_{ij}$  – искомые гидродинамические коэффициенты;  $\mu_i$  – также подлежащие определению параметры затухания составляющих качки.

Отметим, что углы перекадки рулей полагаются здесь одинаковыми и воздействие от перекадки двух рулей имитируется одной силой и моментом.

Кроме того, введем в рассмотрение пять кинематических соотношений, формирующих ориентацию судна в связанной СК и траекторию его движения в географической СК:

$$\begin{aligned}
 R_\varphi\dot{\varphi} &= V_x \cos K - V_y \sin K + V_T \cos K_T, \\
 R_w\dot{\lambda} \cos \varphi &= V_x \sin K + V_y \cos K + V_T \sin K_T, \\
 \dot{\gamma} &= \omega_x, \\
 \dot{\vartheta} &= \omega_y, \\
 \dot{\psi} &= \omega_z,
 \end{aligned}$$

где  $\varphi, \lambda$  – географические координаты (широта и долгота);  $R_\varphi, R_w$  – текущие радиусы кривизны меридиана и первого вертикала;  $V_T, K_T$  – скорость и направление течения.

### Определение параметров модели

Процесс построения модели включает семь основных этапов, соответствующих этапам разработки судна: вначале рассматриваются возможные ходовые характеристики, затем проверяется управляемость судна и в завершение анализируется его мореходность в условиях ветра, волнения и течения.

На первом этапе рассматривается аналитическая зависимость силы тяги гребного винта от его шагового отношения  $P/D$ , соответствующей этому отношению продольной составляющей относительной скорости  $V_x$ , частоты вращения  $n$  и диаметра  $D$  ВРШ [13]:

$$T_x = K_{T1}P/D + K_{T2}V_x(1-w),$$

$$K_{T1} = K_1\rho_w|n^3|D^4, K_{T2} = -K_2\rho_w n^2D^3,$$

где  $P/D = \pi \operatorname{tg} \alpha$ ;  $\alpha$  – угол отклонения лопастей ВРШ (для ВРШ левого и правого бортов принимаются равными);  $w$  – коэффициент попутного потока;  $\rho_w$  – плотность воды;  $n$  – частота оборотов винта;  $D$  – диаметр винта. С учетом имеющихся данных о величине силы  $T_x$  [21] при фиксированных значениях указанных параметров определяются два неизвестных коэффициента упора ВРШ  $K_1, K_2$ . Расчет указанных коэффициентов может быть осуществлен с использованием метода наименьших квадратов.

На втором этапе, исходя из аналитической зависимости силы  $R_x$  сопротивления корпуса судна от относительной скорости, площади смоченной поверхности  $\Omega_m$  и угла дрейфа  $\beta$  (во всем диапазоне его изменения) [13] и имеющихся данных о величине этой силы при фиксированных значениях [21] указанных параметров, вычисляется начальный (соответствующий нулевому углу дрейфа) коэффициент сопротивления  $C_{x0}$ . Указанная зависимость имеет вид [13]

$$R_x = C_x \rho_w V_x^2 / 2 \times \Omega_m,$$

где  $C_x = 0,075 \sin((\pi - \arcsin(C_{x0}/0,075))(1 - 0,4775|\beta|))$ .

Коэффициент  $C_{x0}$  также рассчитывается с привлечением метода наименьших квадратов и может быть откорректирован на основании инерционно-тормозных характеристик, полученных при разгоне и сбросе скорости и указанных в МБ.

На рис. 2 приведены результаты сравнения модельных данных с соответствующими реальным режимам разгона и торможения парама. Значения дистанции, времени прохождения, начальной и конечной скоростей для каждого режима взяты из таблицы маневренных характеристик судна.

На третьем этапе рассматриваются уравнения бокового движения (второе и пятое уравнения системы (1)). На основании известных конструктивных характеристик (длины, ширины, осадки, объемного водоизмещения и др.) по эмпирическим формулам [17], номограммам [13] или аналогам вычисляются коэффициенты  $C_i^j$  при гидродинамических силах и моментах, входящих в уравнения бокового движения [13–17]. Искомыми при этом являются шесть гидродинамических коэффициентов:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -C_y^\beta \rho_w A_S / 2, \\ a_{12} &= C_y^\omega \rho_w A_S / 2 - m - \lambda_{11}, \\ a_{21} &= -C_m^\beta \rho_w L A_S / 2 - \lambda_{11} - \lambda_{22}, \\ a_{22} &= C_m^\omega \rho_w L A_S / 2, \\ n_{11} &= -C_y^{\beta\beta} \rho_w A_S / 2, \\ n_{12} &= -C_y^{\beta\omega} \rho_w L A_S / 2, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $A_S$  – площадь миделя;  $L$  – длина судна.

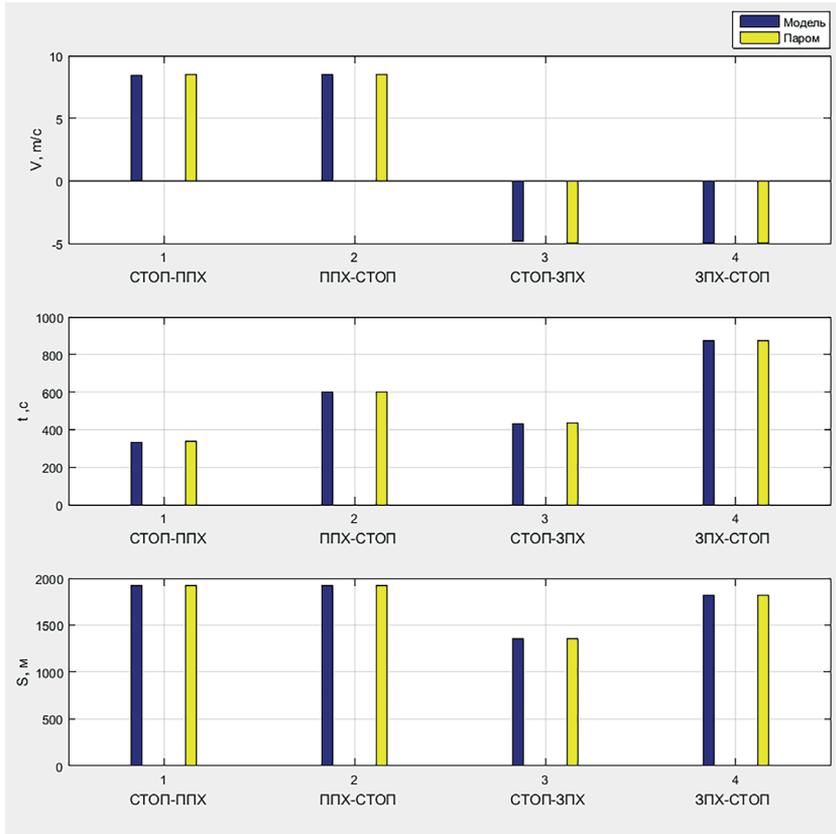


Рис. 2. Разгонные и тормозные характеристики парама

На данном этапе определяются также коэффициенты  $f_p$ , учитывающие влияние углов перекладки рулей на параметры циркуляции. Значения коэффициентов следует выбирать исходя из максимального соответствия модельных траекторий приведенным в МБ данным (рис. 3). При этом рекомендуется использовать технологию, предложенную в [22]. Аналогичным образом уточняются коэффициенты, рассчитанные по соотношениям (2).

На четвертом этапе вычисляются коэффициенты затухания составляющих качки  $\mu_i$ . Принимая во внимание характер свободного движения судов-аналогов при наклонении, можно определить безразмерные коэффициенты затухания соответствующих колебаний. Далее, с учетом знания собственных частот движения, их можно пересчитать в искомые коэффициенты  $\mu_i$ .

На пятом этапе рассматривается влияние волновых возмущений. Здесь неизвестными являются коэффициенты, входящие в выражения для проекций сил и моментов, создаваемых волнением:

$$\begin{aligned}
 F_{wy} &= -f_{wy} g \alpha_w, \\
 M_{wx} &= f_{wm} m g h_0 \alpha_w, \\
 M_{wy} &= f_{wm} m g H_0 \alpha_w, \\
 M_{wz} &= -f_{wmz} \frac{\omega_w^2}{\omega_{im}} \dot{\alpha}_w,
 \end{aligned}$$

где  $\alpha_w$  – угол волнового склона (описывается марковским процессом второго порядка);  $\omega_w$  – преобладающая частота волнения, зависящая от его балльности;  $\omega_{it}$  – кажущаяся частота волнения;  $h_0$  – метacentрическая поперечная высота;  $H_0$  – метacentрическая продольная высота;  $f_{wy}, f_{wm}, f_{wmz}$  – искомые редуционные коэффициенты. Неизвестные параметры оцениваются таким образом, чтобы получить значения амплитуд бортовой и килевой качки, соответствующие установленной балльности волнения.

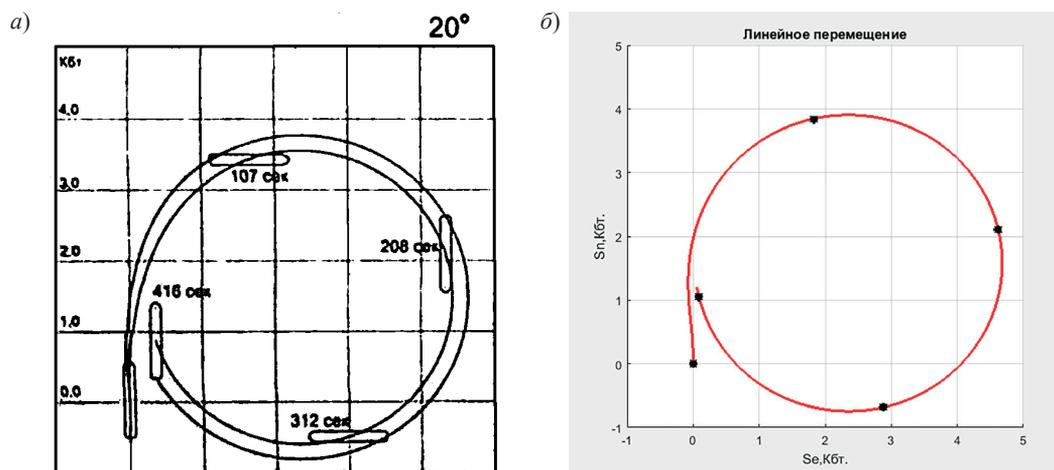


Рис. 3. Циркуляции с перекладкой руля  $\delta = 20^\circ$ :

а) фрагмент таблицы маневренных характеристик;

б) результат моделирования

(черными точками обозначены координаты в момент поворота на  $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$ )

Формирование угла склона может осуществляться с использованием стохастической модели ветрового волнения, описанной в работе [23]. В простейшем случае может быть принята модель регулярного волнения в виде синусоидального процесса.

На шестом этапе анализируется влияние ветровых возмущений. Выражения для аэродинамических сил и моментов от ветра имеют вид [13]:

$$F_{ax} = -f_{ax} \rho_a A_{vp} V_k (-V_x \cos \beta + V_B \cos(K_B - K)),$$

$$F_{ay} = -f_{ay} \rho_a A_{vl} V_k (V_x \sin \beta + V_B \sin(K_B - K)),$$

$$M_{ax} = f_{am} \rho_a A_{vl} V_k (V_x \sin \beta + V_B \sin(K_B - K)) Z_p,$$

$$M_{az} = f_{am} \rho_a A_{vl} V_k (V_x \sin \beta + V_B \sin(K_B - K)) (0,075L + b_{cp} - |\gamma_1| L / 2\pi),$$

где  $V_B, K_B$  – скорость и направление ветра;  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $A_{vp}, A_{vl}$  – лобовая и боковая площади парусности;  $Z_p$  – отстояние центра парусности от ЦТ по вертикали;  $b_{cp}$  – среднее расстояние от ЦТ до центра парусности по продольной оси;  $V_k, \gamma_1$  – скорость и направление кажущегося ветра;  $f_{ax}, f_{ay}, f_{am}$  – искомые коэффициенты. Неизвестные параметры оцениваются таким образом, чтобы траектория движения при выполнении циркуляции соответствовала ветровому сносу при установленной балльности волнения.

На седьмом этапе осуществляется учет сил и моментов, создаваемых ПУ. Результирующая сила  $T_n$  формируется сложением сил  $T_{ПУi}$ , создаваемых каждым ПУ в соответствии с соотношением

$$T_{ПУi} = k_{ПУi} n_{ПУi} |n_{ПУi}|,$$

где  $n_{\text{ПУ}i}$  – частота вращения гребного винта ПУ;  $k_{\text{ПУ}i}$  – коэффициент пропорциональности. При формировании моментов, создаваемых ПУ, учитываются плечи соответствующих сил, равные расстояниям от ЦТ до используемого в расчете ПУ.

Коэффициенты  $k_{\text{ПУ}i}$  корректируются по расхождению между эталонными данными из МБ и данными, полученными в результате моделирования, при одних и тех же заданных управляющих сигналах  $n_{\text{ПУ}i}$ . Здесь также может быть рассмотрена зависимость указанных коэффициентов от текущих значений продольной и поперечной составляющих линейной скорости и скорости изменения курса.

Предложенная методика, примененная при построении математической модели движения автомобильно-железнодорожного паромы, позволила достичь хорошего соответствия характеристик движения, полученных при моделировании и заданных в МБ. При этом определялось расхождение модельных данных с данными МБ:

- по координатам места на циркуляциях в фиксированные моменты времени при различных углах перекладки руля (по отношению к диаметру циркуляции);
- по пройденному пути при разгоне и торможении.

Расхождение указанных величин не превысило 5-8%, что является приемлемым показателем.

### Использование модели движения для формирования управляющих воздействий

На основе полученной модели движения построим законы управления движением судна в части выработки необходимой силы тяги и силы на РУ. С этой целью рассмотрим две задачи: стабилизация продольной составляющей скорости и стабилизация на курсе.

Функциональная схема системы управления движением представлена на рис. 4.

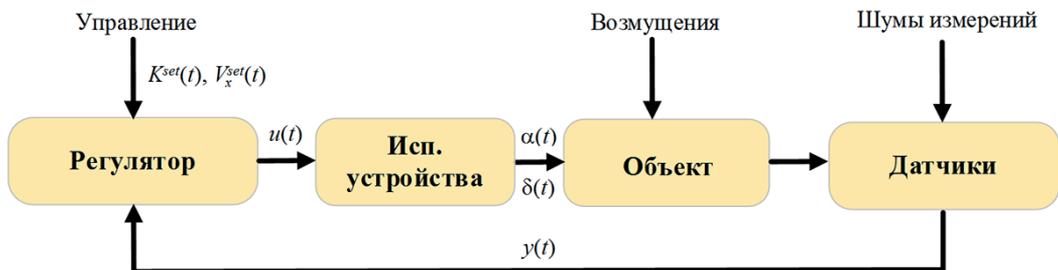


Рис. 4. Система стабилизации судна на курсе и скорости

Стабилизация заданной скорости  $V_x^{set}$  осуществляется поворотом лопастей ВРШ на угол  $\alpha(t)$  и реализуется с помощью ПИ-регулятора. Стабилизация на заданном курсе  $K^{set}$  выполняется путем перекладки рулей на угол  $\delta(t)$  с использованием ПИД-регулятора. Коэффициенты регуляторов определены в соответствии с методикой, изложенной в [24].

Исполнительные устройства, на которые подаются управляющие воздействия с выходов регуляторов, представлены апериодическими звеньями второго порядка с известными постоянными времени.

При формировании выходных сигналов исполнительных устройств учитываются ограничения на максимальный угол отклонения лопастей и максимальную скорость изменения этого угла:

$$\begin{aligned} |\alpha(t)| \leq \alpha_m, \quad |\dot{\alpha}(t)| \leq \dot{\alpha}_m, \\ |\delta(t)| \leq \delta_m, \quad |\dot{\delta}(t)| \leq \dot{\delta}_m; \end{aligned}$$

при этом полагаем, что  $\alpha_m = 35^\circ$ ,  $\dot{\alpha}_m = 1,5^\circ/\text{с}$ ,  $\delta_m = 25^\circ$ ,  $\dot{\delta}_m = 2,5^\circ/\text{с}$ .

Моделирование измерений навигационных параметров, поступающих на входы регуляторов, осуществляется путем учета аддитивных шумов измерителей (лага и ИНС с чувствительными элементами навигационного класса точности). Для описания погрешности лага использована модель экспоненциально коррелированного случайного процесса с заданными значениями среднеквадратической погрешности (СКП) и интервала корреляции. Для описания погрешности определения курса  $\Delta K$  используем следующую приближенную модель:

$$\Delta \dot{\omega}_z = -\alpha_\omega \Delta \omega_z + w_1,$$

$$\Delta \dot{K} = \Delta \omega_K,$$

$$\Delta \dot{\omega}_K = -\beta_K^2 \Delta K - 2\alpha_K \Delta \omega_K + k \Delta \omega_z + w_2,$$

где  $\Delta \omega_z$  – погрешность измерения угловой скорости, описываемая экспоненциально коррелированным процессом с постоянной времени корреляции  $1/\alpha_\omega$ ;  $\Delta \omega_K$  – вспомогательная величина, позволяющая учесть наличие шулеровских колебаний с круговой частотой  $\beta_K$  в погрешности определения курса;  $\alpha_K$  – величина, обратная времени корреляции погрешности измерения курса;  $k$  – коэффициент, учитывающий взаимную корреляцию погрешностей определения угловой скорости и курса;  $w_i$  – порождающие некоррелированные между собой белые шумы.

На первом этапе синтеза управление формируется для модели движения с отсутствующими внешними возмущениями. Выбор коэффициентов регулятора направлен в первую очередь на минимизацию времени переходного процесса без перерегулирования. На втором этапе принималось во внимание влияние внешних возмущений, при этом эмпирически уточнялись коэффициенты закона управления с целью повышения устойчивости судна на курсе при движении с заданной скоростью.

На рис. 5 представлены графики изменения угла, скорости поворота лопастей ВРШ, а также продольной и поперечной составляющих линейной скорости при разгоне судна с  $V_x = 5$  м/с до 10 м/с и дальнейшей стабилизации на заданной скорости. Результаты получены при воздействии волнения и ветра на уровне 5 баллов;  $K_b = 180^\circ$ , заданный курс –  $10^\circ$ . В качестве среды моделирования был использован пакет MATLAB версии 2018b.

На рис. 6 показаны графики изменения угла перекладки руля, скорости поворота РУ, а также угла курса и измеренных значений скорости его изменения при повороте судна на  $90^\circ$  и дальнейшей стабилизации на заданном курсе.

В результате были получены следующие характеристики системы управления при наличии ветро-волновых возмущений до 5 баллов включительно:

- время маневра при изменении курса на  $90^\circ$  – 4 мин;
- время переходного процесса при изменении скорости с 5 до 10 м/с при фиксированной частоте оборотов вала ГД – 3 мин.

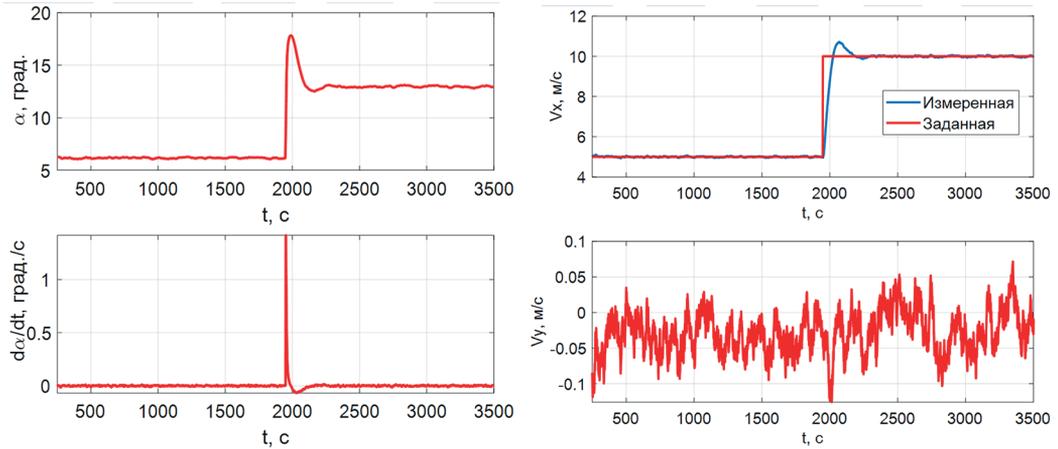


Рис. 5. Результаты моделирования системы управления движением при выходе на заданную скорость и стабилизации на ней

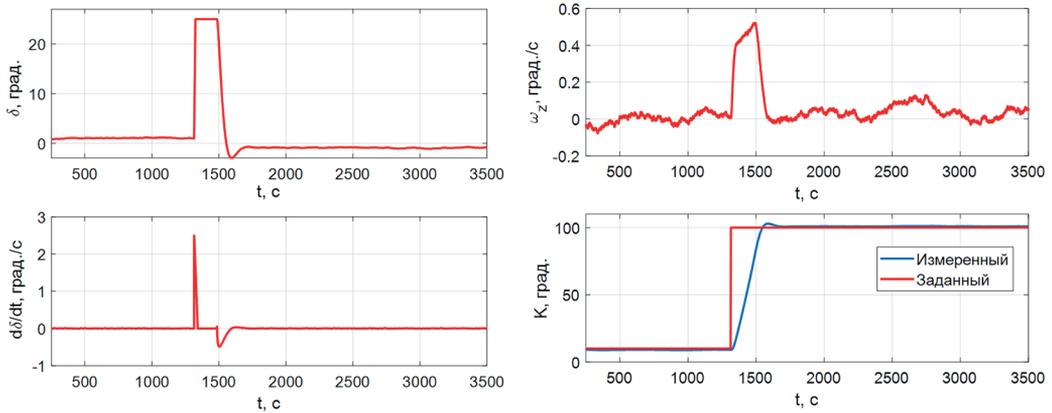


Рис. 6. Результаты моделирования системы управления движением при выходе на заданный курс и стабилизации на нем

## Заключение

Предложенная методика построения имитационной модели движения надводного судна предполагает использование данных МБ. В результате ее применения может быть осуществлено построение полноценной динамической модели, в достаточной степени адекватной реальному движению судна и вырабатывающей полный перечень навигационных и динамических параметров, необходимых, в частности, для имитации работы навигационных систем. Модель задействована для формирования закона управления, позволяющего обеспечить стабилизацию продольной составляющей скорости судна и его курса. Продемонстрирована эффективность синтезированных законов управления в условиях внешних возмущающих воздействий.

*Работа проводилась при поддержке гранта РФФ №23-79-10071,  
<https://rscf.ru/project/23-79-10071/>.*

ЛИТЕРАТУРА

1. **IMO Resolution A.601**: Provision and Display of Manoeuvring Information on Board Ships. Adopted on 19 November 1987, 33 p.
2. **IMO Resolution MSC.137(76)**: Standards for Ship Manoeuvrability. Adopted on 4 December 2002, 6 p.
3. **IMO MSC/Circ.1053**. Explanatory Notes to the Standards for Ship Manoeuvrability. Adopted on 16 December 2002, 41 p.
4. **Правила классификации и постройки морских судов**. Ч. IV. Остойчивость. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. 78 с.
5. **Дегтярев А.Б., Мье М.С.** Информационная поддержка моделирования динамики судна в бортовой интеллектуальной системе // *Морские интеллектуальные технологии*. 2012. №4 (18). С. 34–38.
6. **Смоленцев С.В., Исаков Д.В.** Моделирование движения судна на основе упрощенной кинематической модели // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2018. Т. 10. №6. С. 1111–1121.
7. **NAVI TRAINER 4000**. Mathematical Models Technical Description. Transas Marine Ltd. July, 2003, 102 p.
8. **Sutulo, S., Guedes Soares, C.**, Mathematical models for simulation of manoeuvring performance of ships, *Marine Technology and Engineering*, London: Taylor & Francis Group, 2011, pp. 661–698.
9. **Luo, W.L.**, Parameter Identifiability of Ship Manoeuvring Modeling Using System Identification, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, vol. 2016, pp. 1–10, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8909170>.
10. **Taimuri, G., Matusiak, J., Mikkola, T., Kujala, P., Hirdaris, S.**, A 6-DoF maneuvering model for the rapid estimation of hydrodynamic actions in deep and shallow waters, *Ocean Engineering*, 2020, 218, pp. 1–22.
11. **Duman, S., Bal, S.**, A quick-responding technique for parameters of turning maneuver, *Ocean Engineering*, 2019, vol. 179, pp. 189–201.
12. **Kinaci, O.K.**, Ship digital twin architecture for optimizing sailing automation, *Ocean Engineering*, 2023, vol. 275, pp. 114–128.
13. **Справочник по теории корабля**. Т.3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 768 с.
14. **Мирохин Б.В., Жинкин В.Б., Зильман Г.И.** Теория корабля: учебник. Л.: Судостроение, 1989. 352 с.
15. **Fossen, T.I.**, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, New York: John Wiley & Sons, 1999, 480 p.
16. **Дмитриев С.П., Пелевин А.Е.** Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории. СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2004. 160 с.
17. **Гофман А.Д.** Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна: справочник. Л.: Судостроение, 1988. 360 с.
18. **Математическое моделирование системы управления**: метод. указания к курсовому проектированию / сост.: О.Ю. Лукомская, А.Г. Шпекторов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 40 с.
19. **Как устроен двухтопливный паром «Маршал Рокоссовский» проекта CNF19M** // МедиаПалуба. 16 ноября 2021. URL: <https://paluba.media/news/14381/>.
20. **Лукомский Ю.А., Корчанов В.М.** Управление морскими подвижными объектами. СПб.: Элмор, 1996. 318 с.
21. **Исследование ходовых качеств автомобильно-железнодорожного паром нового поколения для линии Усть-Луга – Балтийск проекта CNF19M**. Отчет ООО «Цифровые морские технологии». 2018. 45 с.
22. **Пелевин А.Е.** Идентификация параметров модели движения надводного морского объекта в условиях возмущений // *Гироскопия и навигация*. 2023. №4 (123). С. 192–205.
23. **Лукомский Ю.А., Чугунов В.С.** Системы управления морскими подвижными объектами. Л.: Судостроение, 1988. 272 с.
24. **Ziegler, J.G., Nichols, N.B.**, Optimum settings for automatic controllers, *Trans. ASME*, 1942, vol. 64, no. 8, pp. 759–765.

**Pelevin, A.E.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg; State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg), **Loparev, A.V., Lukoyanov, E.V.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO University, St. Petersburg), and **Stolyarova, A.M.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC)  
Procedure for Constructing the Ship Motion Model and Synthesizing Model-based Control Algorithms, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 1 (128), pp. 52–63.

**Abstract.** The paper proposes a technique for constructing the simulation model of a surface ship motion based on the specified composition and parameters of actuators. As an example, constructing the simulation model of a car and train ferry is considered. Based on the model, control algorithms have been developed for stabilizing the longitudinal component of the ship linear velocity and heading stabilization.

**Key words:** dynamic model, maneuvering performance, disturbances, control inputs.

Материал поступил 20.02.2025