

OPTIMIZATION OF THE MOTION RIVER VESSELS REGIMES CONTROL

O. V. Soliakov¹, A. A. Potemkin¹, N. V. Pershin²

¹ — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

² — Public Joint Stock Company Gazprom, St. Petersburg, Russian Federation

The article considers questions of management of the movement of river vessels. The analysis of the structures of automatic control vessel traffic systems (VTS) is carried out. The main tasks are shown for the organization of the control modes. For the task of optimal control presents a general solution that determines the minimum weighted sum mean squared error and control signals VTS. It is shown that the most important model of the yaw of the vessel in which the state vector includes three variable parameters: the yaw angle, yaw rate, drift angle. Presents the general solution of the related tasks of integration of different measuring systems and produce the necessary control signals of a vessel in conditions of wind and wave disturbances. It is established that the occurrence of any additional sources of information about the position of the vessel, and the use of a variety of thrusters does not change the basic mathematical relationships, but the basic formulas can be written for the solution of optimal control task in discrete time, corresponding to the modern methods of collecting and processing the information using the on-board computer. The possibility of creation of automatic system of VTS, which are designed not only to provide the ship's course, but also for dynamic positioning in the presence of significant wind and wave disturbances. Presented that in VTS with feedback mode included: object control (ship), the sensors of kinematic parameters of movement and control, a local control system of the executive bodies system to retrieve information matrices of the errors on the components of the state vector, including ship radar station (radar), gyro compass, hydro acoustic station, reception indicators satellite navigation system and radio-navigation systems, display system information and computing device, forming together with the manual controls remote control for movement. It is established that the state of the vessel changes under the influence of external wind and wave perturbations and control actions providing motion. It is shown that computing device performs the following tasks: estimation of the state vector, which includes the kinematic parameters of the appropriate control mode based on the most informative observations for a given component of the motion vectors; generating control signals taking into account assessments of the state and the state of the vessel based on the requirement of maximizing the measurement of the performance of VTS.

Keywords: traffic management, optimization, vessel, wind and wave disturbance, onboard computer.

For citation:

Soliakov, Oleg V., Andrey A. Potemkin, and Nikita V. Pershin. "Optimization of the motion river vessels regimes control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1186–1196. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1186-1196.

УДК: 621.37

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РЕЧНЫХ СУДОВ

О. В. Соляков¹, А. А. Потемкин¹, Н. В. Першин²

¹ — ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Российская Федерация

² — Публичное акционерное общество «Газпром», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы управления движением речных судов. Выполнен анализ структур автоматических систем управления движением судном (СУДС). Показаны основные задачи, требующие решения для организации режимов управления. Для задачи оптимального управления представлено общее решение, определяющее минимум взвешенной суммы среднеквадратичной ошибки и управляющих сигналов СУДС. Показано, что наиболее важной является модель рыскания судна, в которой вектор состояния включает три переменных параметра: угол рыскания, угловую скорость рыскания, угол дрейфа. Представлено общее решение связанных между собой задач комплексирования различных измерительных систем

и выработки необходимых сигналов управления судном в условиях ветровых и волновых возмущений. Установлено, что появление каких-либо дополнительных источников информации о положении судна, а также использование разнообразных подруливающих устройств не приводит к изменению основных математических соотношений, а основные формулы могут быть записаны для решения задачи оптимального управления в дискретном времени, соответствующей современным способам сбора и переработки информации с помощью бортового вычислителя. Показана возможность создания автоматических СУДС, которые предназначены не только для обеспечения курса судна, но и для динамического позиционирования при наличии значительных ветровых и волновых возмущений. Представлено, что в СУДС с обратной связью входят: объект управления (судно), датчики кинематических параметров движения и управляющих воздействий, локальная система управления исполнительными органами, системы извлечения информации с матрицами ошибок о компонентах вектора состояния, включающие судовую радиолокационную станцию, гироскоп, гидроакустическую станцию, индикаторы приема спутниковой навигационной системы и радионавигационных систем, система отображения информации и вычислительное устройство, образующие вместе с органами ручного управления пульт управления движением. Установлено, что состояние судна меняется под воздействием внешних ветровых и волновых возмущений и управляющих воздействий, обеспечивающих движение. Показано, что вычислительные устройства осуществляет решение следующих задач: оценка вектора состояния, в который входят кинематические параметры соответствующего режима управления на основе наблюдения наиболее информативных для данного движения компонент векторов; формирование управляющих сигналов с учетом оценок состояния и состояния судна, исходя из требования максимизации показателя качества работы СУДС.

Ключевые слова: управление движением, оптимизация, судно, ветровые и волновые возмущения, бортовой вычислитель.

Для цитирования:

Соляков О. В. Оптимизация режимов управления движением речных судов / О. В. Соляков, А. А. Потемкин, Н. В. Першин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1186–1196. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1186-1196.

Введение

Известно, что движение судна по внутренним водным путям происходит в самых разнообразных и постоянно изменяющихся путевых и гидрометеорологических условиях, к которым относятся ширина и извилистость фарватера, течения разных направлений и интенсивности, ограничения по глубине акватории, разнообразные по направлению и силе ветра, различная загрузка самого судна, а также путевые ограничения, рассмотренные в работе [1]. Как показывает практика эксплуатации речных судов, для каждого из сочетаний этих условий характерны свои целесообразные режимы движения судна и, следовательно, параметры работы его энергетической установки. При этом целесообразные режимы работы судового комплекса могут значительно отличаться от номинальных. Одновременно наблюдается резкое снижение нагрузки на судовые двигатели, что приводит к существенной экономии топлива, а также снижению вредных выбросов и сбросов в окружающую среду согласно исследованиям, выполненным работе [2].

Судоводитель не в состоянии оперативно реагировать на постоянное и трудно прогнозируемое изменение условий движения судна, так как количество параметров, подлежащих одновременному учёту, достаточно велико, а следовательно, реальные режимы движения речных судов в настоящее время далеки от оптимальных. Поэтому проблема оптимизации режимов управления движением речных судов в зависимости от постоянно изменяющихся условий является весьма актуальной и серьёзной. При этом оптимизация режимов работы управления движением судов связана не только со снижением нагрузок на судовые двигатели, экономией их моторесурса и расхода топлива, но и заметным, целесообразным снижением траекторий движения, что является достоинством такого подхода согласно исследованиям [3], [4].

При управлении движением речных судов необходимо двигаться по заданной траектории или менять направление движения вполне определенным образом, отвечающим намерениям судоводителя. Свойство управляемости является одним из главных факторов, определяющих эффективность эксплуатации и безопасность плавания в условиях изменяющегося судового хода. Осо-

бые требования предъявляются к управлению движением судов, эксплуатируемых на внутренних водных путях, где требуется обеспечить высокий уровень безопасности при движении по узким и извилистым фарватерам, на мелководье, в условиях сильных течений и существенных ветровых воздействий, что отражено в работах [5], [6].

Сложность динамических процессов управления судном требует создания информационного обеспечения, позволяющего на качественно новом уровне, с использованием современных компьютерных технологий, решать задачи оптимизации технологических процессов управления сложным динамическим объектом, моделировать поведение судна в сложившихся путевых условиях с целью обеспечения безопасности и безаварийности плавания, использовать при управлении движением речных судов автоматизацию движения судна по заданному маршруту, динамическое позиционирование судна, а также глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS. Подробно преимущества и недостатки показаны в работе [1]. Поэтому задача исследования и разработки автоматических систем управления движением судном (СУДС), которые предназначены не только для обеспечения курса судна, но и для динамического позиционирования при наличии значительных ветровых и волновых возмущений, является весьма актуальной.

Методы и материалы

В СУДС (рис. 1) с обратной связью по наблюдаемым переменным $\bar{y}_1(t), \bar{y}_2(t)$ входят, согласно данным источников [1], [3], следующие элементы:

- объект управления (ОУ) (судно), описываемый вектором состояния $\bar{x}(t)$;
- датчики кинематических параметров движения и управляющих воздействий, осуществляющие оценку части составляющих вектора состояния $x(t)$ на основе сигналов $\bar{y}_1(t)$;
- локальная система управления (ЛСУ) исполнительными органами (ИО);
- системы извлечения информации $\bar{y}_2(t)$ с матрицами ошибок $R_2(t)$ о компонентах вектора состояния, включающие судовую радиолокационную станцию (РЛС), гироскоп (ГК), гидроакустическую станцию (ГАС), индикаторы приема программы методики испытаний (ПМИ) спутниковой навигационной системы (СНС) и радионавигационных систем (РНС) [1], [3];
- система отображения информации (СОИ) и вычислительное устройство (ВУ), образующие вместе с органами ручного управления пульт управления движением (ПУД).

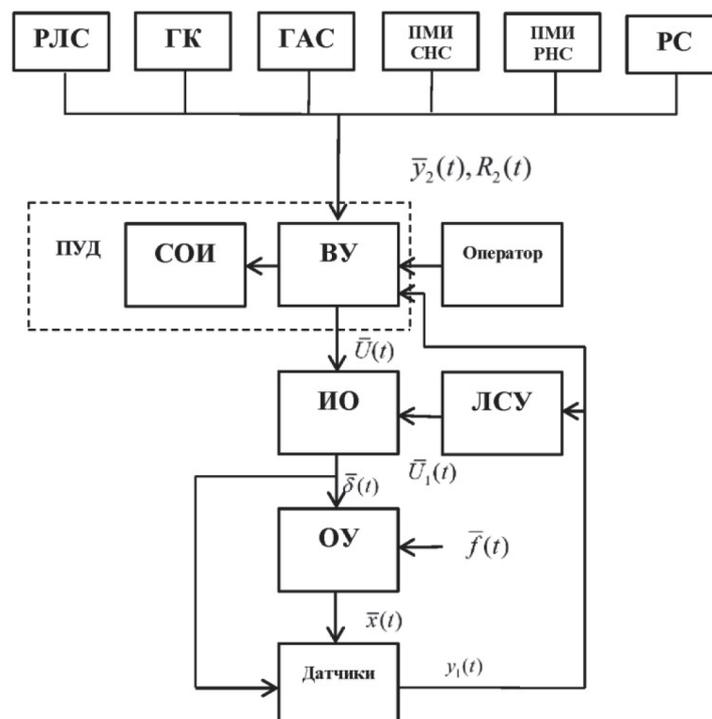


Рис. 1. Структурная схема СУДС

Состояние ОУ $x(t)$ меняется под воздействием внешних ветро-волновых возмущений $\bar{f}(t)$ и управляющих воздействий $\delta(t)$, обеспечивающих движение.

Вычислительное устройство (ВУ) осуществляет решение следующих задач:

- оценку вектора состояния, в который входят кинематические параметры соответствующего режима управления на основе наблюдения наиболее информативных для данного движения компонент векторов $\bar{y}_1(t), \bar{y}_2(t)$;
- формирование управляющих сигналов с учетом оценок $\hat{\bar{x}}(t)$ состояния $\bar{x}(t)$ и состояния ОУ, исходя из требования максимизации показателя качества работы СУДС.

Метод решения

Для задачи оптимального управления общее решение, определяющее минимум взвешенной суммы среднеквадратичной ошибки и управляющих сигналов, описано и представлено в работе [4]:

$$J = M\{\bar{x}(t_f)^T S \bar{x}(t_f)\} + \int_{t_0}^{t_f} (\bar{x}^T(\tau) Q_1 \bar{x}(\tau) + \bar{U}(\tau) R_1(\tau) \bar{U}(\tau)) d\tau,$$

где S, Q_1, Q_2 — весовые матрицы, симметричные и неотрицательно определенные. Вектор наблюдений:

$$\bar{y}(t) = C(t) \cdot x(t) + \bar{V}(t), \quad (1)$$

по размерности отличается от вектора состояния $\bar{x}(t)$ тем, что учитывается $r \times n$ -матрицей $C(t)$.

Отличие размерностей получается ввиду причин, указанных в работе [5]:

- некоторые компоненты вектора $\bar{x}(t)$ не могут быть измерены;
- составляющие $\bar{x}(t)$ могут быть определены с учетом различных систем.

Например, параметры поступательного перемещения могут быть определены по сигналам РНС и СНС. Суммирование измерений имеет место в данном случае, что определено в работе [4].

Погрешности измерений определяются с использованием векторного белого шума $\bar{V}(t)$ с ковариационной матрицей:

$$M\{\bar{V}(t)\bar{V}^T(t-\tau)\} = R_2(t)'(t-\tau).$$

Исследования, проведенные в работах [4], [5], показали, что модель изменения состояния за счет динамических свойств судна, сигналов управления $\bar{U}(t)$ и внешних воздействий $\bar{f}(t)$ имеет вид

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{U}(t) + \bar{f}(t), \quad (2)$$

где $M\{\bar{f}(t)\bar{f}^T(t-\tau)\} = Q_2(t)'(t-\tau)$;

$A(t)$ — $n \times m$ -матрица коэффициентов, которые определяются линеаризованными характеристиками ОУ в соответствующем управляющем режиме;

$B(t)$ — $n \times m$ -матрица линеаризованных коэффициентов для исполнительных органов судна.

Теорема разделения показывает, что при процессах по Гауссу наилучшая (минимум дисперсии ошибки) оценка $\hat{\bar{x}}(t)$ состояния $\bar{x}(t)$ ОУ определяется следующими выражениями по Калману, представленными в работах [4], [11]:

$$\frac{d\hat{\bar{x}}(t)}{dt} = A(t)\hat{\bar{x}}(t) + B(t)\bar{U}(t) + K(t)(\bar{y}(t) - C(t)\hat{\bar{x}}(t)), \quad (3)$$

где $\hat{\bar{x}}(t_0) = \bar{x}(t_0)$, $\hat{\bar{x}}(t_0)K(t) = P_2(t)C^T(t)R_2^{-1}(t)$;

$\dot{P}_2(t) = A(t)P_2(t)A^T(t) - P_2(t)C^T(t)R_2^{-1}(t)C(t)P_2(t) + Q_2(t)$ с начальным условием $P_2(t_0) = P_{20}$.

Ковариационная матрица вектора ошибок оценки $P_2(t)$ независима от наблюдений $\bar{y}(t)$ и закона управления $\bar{U}(t)$, который принят, и записана в память компьютера до начала работы СУДС для каждого из возможных балансировочных режимов.

Оптимально допустимое управление формируется как показано в работах [7], [8]:

$$\bar{U}(t) = K_1(t)\hat{x}(t);$$

$$K_1(t) = -R_1^{-1}B^T(t)P_1(t); \quad (4)$$

$$P_1(t) = -P_1(t)A(t) - A^T(t)P_1(t) + P_1(t)B(t)R_1^{-1}(t)P_1(t) - Q(t),$$

где $P_1(t_f) = S$.

На рис. 2 приведена схема вычислений для реализации оптимального управления. Такое решение содержит матрицы $A(t)$ и $B(t)$, в большой степени зависящие от кинематических параметров движения. В зависимости от параметров поступательного движения судна возникает необходимость корректировать элементы этих матриц. Меняющийся уровень внешних воздействий и погрешностей оценивания состояния также требует корректировки соответствующих матриц $Q_2(t)$ и $R_2(t)$.

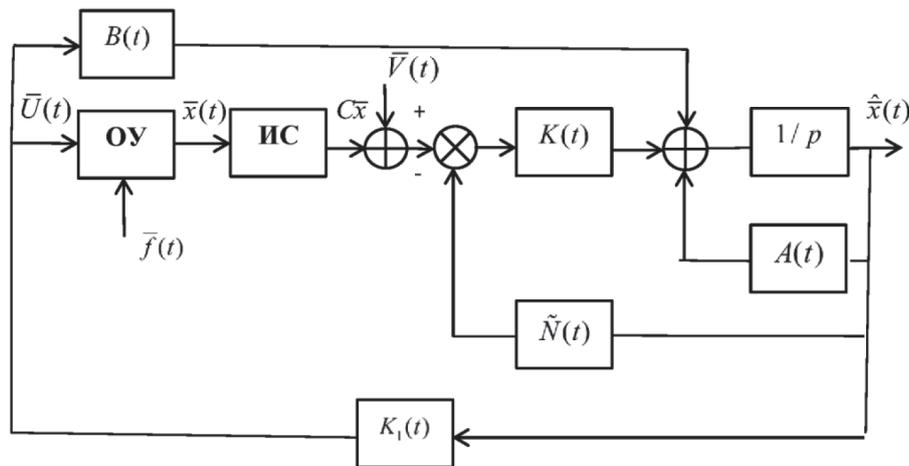


Рис. 2. Оптимальная СУДС

Исследования, проведенные в работах [7], [8], показали, что условие выполняется с использованием дополнительных блоков адаптации параметров СУДС. В этих задачах могут эффективно применяться безыдентификационные псевдоградиентные процедуры параметрической адаптации, носящие рекуррентный характер и требующие минимальных вычислительных затрат, что определено в работах [9], [10].

Пространственное движение судна в общем случае описывается системой, состоящей из двенадцати обыкновенных дифференциальных уравнений для производных линейных координат центра масс судна x_g, y_g, z_g в полусвязанной системе, углов Эйлера θ, φ, ψ и составляющих линейной V_x, V_y, V_z и угловой $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ скорости [10]. Вектор f в модели определяется проекциями сил и моментов течения, ветра и волнения моря.

Нелинейные тригонометрические функции от углов Эйлера, а также произведения переменных состояния и нелинейных функциональных зависимостей гидродинамических сил и моментов при переменных параметрах движения определили нелинейность характера дифференциальных уравнений динамики движения, что показано в работах [11], [12]. Тем не менее при малых отклонениях кинематических параметров можно применять линейризованные математические модели. Это является недостатком в исследованиях [1].

Разлагая в ряд Тейлора относительное состояние ОУ в режиме баланса, получим линейную модель движения судна в приращениях

$$d\bar{x} / dt = A_1 \cdot \bar{x}(t) + B_1 \cdot \bar{\delta}(t) + C_1 \cdot \bar{f}(t),$$

где матрицы A_1, B_1, C_1 получаются путем дифференцирования соответствующих нелинейных функций в стационарной точке.

Наиболее важной является модель рыскания судна, у которой вектор его состояния включает три переменных параметра [1], [12]:

- угол рыскания $\varphi(t)$,
- угловую скорость рыскания $\omega_y(t)$,
- угол дрейфа $\beta(t)$ — рис. 3.

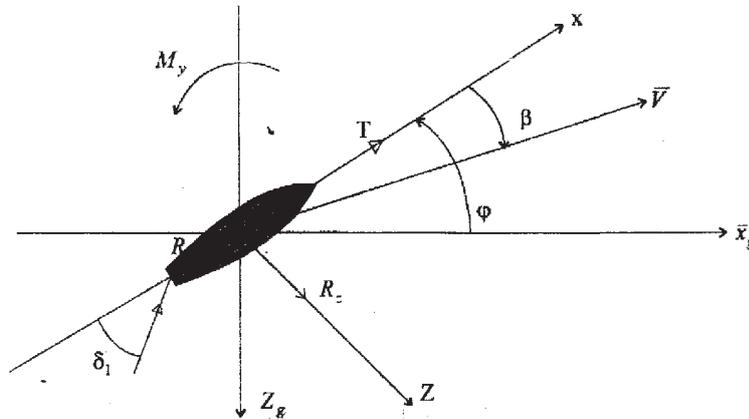


Рис. 3. Силы и моменты при рыскании судна

Линеаризация этой модели выглядит следующим образом. В общем случае угловая скорость рыскания $\omega_y = \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta + \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi$, где φ — угол дифферента; θ — угол крена. При малых θ и φ можно приближенно полагать $\omega_y(t) \cong \dot{\varphi}(t)$.

Проекции скорости \bar{V} на соответствующие связанные координаты отражают поступательное движение:

$$V_x = V \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha, V_z = V \cdot \sin \beta,$$

но при малых углах атаки и дрейфа $V_x = V$; $V_z = V \cdot \beta$.

Если судно имеет постоянную скорость движения, то вместо скорости бокового сноса V_z в качестве переменной состояния берем угол дрейфа $\beta \cong \frac{V_z}{V}$.

В системе координат $\bar{V}_g = (V_{xg} V_{yg} V_{zg})^T$ скорость движения центра масс судна связана с проекциями на связанные оси соотношением

$$\bar{V}_g = B_V^{-1} \bar{V},$$

где B_V — кинематическая матрица.

При малых углах θ , ψ , φ получим уравнения связи:

$$V_{xg} = V(1 + \beta \cdot \varphi); V_{zg} = V(\beta - \varphi).$$

С учетом этих приближений находим уравнения для движения центра масс в системе координат:

$$dx_g / dt = V; dy_g / dt = V(\varphi - \alpha); dz / dt = -V(\varphi - \beta),$$

где α — угол атаки; $\sigma = \varphi - \beta$ — приращение путевого угла.

Теоремы, указывающие на изменение количества движения \bar{K} и момента количества движения \bar{L} , отражают изменения мгновенных значений скоростей движения твердого тела:

$$d\bar{K} / dt + \bar{\Omega} \times \bar{K} = \bar{R};$$

$$d\bar{L} / dt = \bar{\Omega} \times \bar{L} + \bar{V} \times \bar{K} = \bar{M},$$

где $\bar{\Omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$;

$\bar{R}(t)$, $\bar{M}(t)$ — соответственно главные вектор и момент внешних сил относительно начала координат.

Суммарная кинетическая энергия движения МПО

$$T = 0,5(V^T \Omega^T)(D + \Lambda)(\bar{V}^T \Omega^T)^T,$$

где D — инерционная матрица;

Λ — матрица, включающая присоединенные массы и моменты инерции.

При учете $K_{x,y,z} = \partial T / \partial V_{x,y,z}$; $L_{x,y,z} = \partial T / \partial \omega_{x,y,z}$ между кинетической энергией T и проекциями скоростей и векторов \bar{K} , \bar{M} после преобразований получим общую форму уравнений динамики судна [1], [13]:

$$(\bar{m} + \mu_{11})\dot{V}_x = mV_y \omega_y + X_K + X_A + C_x U_x + f_x; \quad (5)$$

$$(\bar{m} + \mu_{22})\dot{V}_z = -mV_x \omega_y + Z_K + Z_A + C_z U_z + f_z;$$

$$(\bar{J}_y + \mu_{66})\dot{\omega}_y = M_K + M_A + M_R U_R + f_M; \omega_y = d\varphi / dt;$$

$$dx_g / dt = V_x \cos \varphi - V_z \sin \varphi; dy_g / dt = V_z \cos \varphi - V_x \sin \varphi,$$

где \bar{m} — масса судна;

\bar{J}_y — момент инерции относительно вертикальной оси;

μ_{11} , μ_{22} — присоединенные массы;

μ_{66} — присоединенный момент инерции;

X_K, Z_K, M_K — гидродинамические силы и момент на подводной части корпуса судна;

X_A, Z_A, M_A — аэродинамические характеристики надводной части;

$C_x, U_x, C_z, U_z, M_R, U_R$ — гидродинамические характеристики;

f_x, f_z, f_M — составляющие сил и момента, обусловленные течением, волнением и ветром соответственно.

Соотношения (5) можно представить в стандартной векторной форме (2), включая в вектор состояния \bar{x} различные компоненты в зависимости от выбранного режима работы СУДС. В любом режиме работы при построении СУДС вырабатывается оценка $\hat{\bar{x}}(t)$ вектора $\bar{x}(t)$ состояния судна и формируется сигнал управления $\bar{U}(t)$, пропорциональный рассогласованию между заданным состоянием $\bar{x}_0(t)$ и оценкой вектора состояния (4). Для решения частных задач управления движением в вектор состояния $\bar{x}(t)$ целесообразно включить различные компоненты, а также применять различные информационные системы для построения оценок, например, как это сделано в работе [14].

Рассмотрим два основных режима работы СУДС: движение по заданному курсу и автоматическое удержание судна в заданной точке. Система управления курсом судна автоматически ориентирует его продольную ось в заданном направлении движения. Если заданный курс судна проходит по галсу K_0 , а его настоящий курс $K(t)$, то разность между ними образует угол рыскания $\varphi(t) = K_0 - K(t)$. В задачу СУДС входит минимизация $\varphi(t)$. Реализация такой функции управления осуществляется с помощью авторулевых различных типов [1]. В этом случае формируется вектор состояния $\bar{x}(t) = (\varphi(t)\omega_y(t)\beta(t))^T$, описываемый уравнениями динамики движения (2), (5).

Поставленную цель следует достигнуть путем формирования сигнала управления

$$U(t) = g_1 \varphi(t) + g_2 \omega_y(t) + g_3 \delta(t) + g_4 \int_0^t \varphi(t) dt$$

и организации соответствующих обратных связей (ПИД-регулятор, исследуемый в работе [4]).

Угол рыскания и угловую скорость рыскания, как правило, определяют с помощью гироскопа. Для реализации системы стабилизации путевого угла необходимо сформировать оценку угла дрейфа β и осуществить его компенсацию, например, с помощью поворота судна на угол рыскания $\varphi \approx \beta$. В настоящее время это выполняют с помощью спутниковых навигационных систем. Например, в дискретные моменты времени $t_i (i = 1, 2, \dots)$ осуществляется измерение двух абсолютных координат судна: x_{0_i} и z_{0_i} :

$$y_{1i} = x_{0i} + \varepsilon_{1i}; y_{2i} = z_{0i} + \varepsilon_{2i}, i = 1, 2, \dots,$$

где $\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}$ — случайные независимые погрешности таких измерений с дисперсиями σ_{ε}^2 , которые для ПМИ первого класса составляют $\sigma_{\varepsilon} \sim 10$ м.

На участке с постоянной путевой скоростью $\bar{V}_0 = (V_{x_0} V_{z_0})^T$ уравнения, описывающие динамику изменения вектора состояния $\bar{x}_i = (x_{0i} z_{0i} V_{x_{0i}} V_{z_{0i}})^T$, запишутся в следующем виде:

$$\bar{x}_{0i} = x_{0(i-1)} V_{x_{0(i-1)}}; z_{0i} = z_{0(i-1)} V_{z_{0(i-1)}}; V_{x_{0i}} = V_{x_{0(i-1)}}; V_{z_{0i}} = V_{z_{0(i-1)}}$$

или в векторной форме $\bar{x}_i = P\bar{x}_{i-1} + \bar{W}_i$, соответствующей уравнению (2).

Уравнения $\bar{y}_i = C\bar{x}_{i-1} + \bar{W}_i$ наблюдений запишутся в виде, аналогичном выражению (1):

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \bar{y}_i = \begin{pmatrix} y_{1i} \\ y_{2i} \end{pmatrix}; \bar{W}_i = \begin{pmatrix} w_{1i} \\ w_{2i} \end{pmatrix},$$

где C — матрица;

$\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}$ — случайные независимые погрешности измерений.

Для оптимальных оценок вектора состояния запишем уравнения Калмана по наблюдениям $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_i$:

$$\hat{\bar{x}}_i(t) = \hat{\bar{x}}_{0i} + P_i \cdot V_{\varepsilon}^{-1} \cdot C^T (\bar{y}_i - C\hat{\bar{x}}_{0i}).$$

Для автоматического удержания судна в заданной точке применяется система динамического позиционирования [1]. Движение судна при этом имеет малое значение линейной скорости. Силы на корпусе, вызванные собственным движением судна (гидроакустические), незначительны. Основными являются силы и моменты ветровых и волновых возмущений и средств управления.

Для информационного обеспечения системы, кроме гирокомпаса и СНС, обычно используются ГАС, определяющие пеленг $\Pi(t)$ и дальность $D(t)$ до «якорной точки» при постановке судна на носовом якоре.

Представим плоское движение центра масс в базовой неподвижной координатной системе, начало которой O_g совмещено с точкой позиционирования, а ось $O_g x_g$ направлена таким образом, чтобы силы ветра, течения и волнения, действующие на судно при угле рыскания $\varphi = 0$, были минимальными (рис. 4).

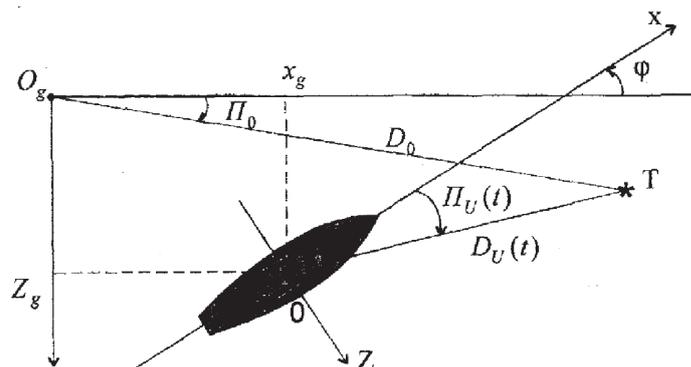


Рис. 4. Динамическое позиционирование

Для обеспечения автоматического управления судном в вектор состояния включено шесть переменных:

$$\bar{x} = (x_g z_g V_x V_z \varphi \omega_y)^T.$$

Спутниковая РНС позволяет получить информацию непосредственно о переменных состояния:

$$y_1(t) = x_g(t) + \varepsilon_1(t);$$

$$y_2(t) = z_g(t) + \varepsilon_2(t).$$

Информация от ГАС состоит в пеленге $y_{1r}(t) = \Pi_U(t) + \varepsilon_{1r}(t)$ и дальности $y_{2r}(t) = D_U(t) + \varepsilon_D(t)$ до яркой точки T (рис. 4). Прямая запись наблюдений через переменные состояния оказывается в связи с этим нелинейной.

Результаты

Для построения СУДС в этом случае можно воспользоваться известными методами нелинейной теории управления [4]. Например, применить метод построения подсистемы автоматического слежения за яркой точкой, в которой формируются текущие оценки пеленга, дальности, их производных, а также проекции этих оценок на оси базовой и связанной систем координат. В этом случае на основе гидролокационных наблюдений получим следующие оценки:

$$y_7(t) = x_g(t) + \varepsilon_7(t); y_4(t) = z_g(t) + \varepsilon_4(t); y_5(t) = V_x(t) + \varepsilon_5(t); y_6(t) = V_z(t) + \varepsilon_6(t).$$

Информация от гироскопа:

$$y_7(T) = \varphi(t) + \varepsilon_7(t); y_8(T) = \omega_y(t) + \varepsilon_8(t).$$

Стандартная форма наблюдений, согласно уравнению (1),

$$\bar{y} = C\bar{x} + \varepsilon.$$

Для описания динамики изменения состояния используем уравнения (5) в форме уравнения (2), принимая при этом, что гидродинамические силы вязкостной природы $X_k(t)$ и $Z_k(t)$ можно считать малыми.

Оценка состояния и выработка сигналов управления осуществляются в соответствии с уравнениями (3), (4). При этом получается структура СУДС, в которую включены комплексированные методы измерения состояния $\bar{x}(t)$ на основе СНС и ГАС, имеющих собственную систему автоматического слежения за яркой точкой и формирование оценок проекций координат отклонения судна от заданной точки 0_g . На основе вектора отклонений координат от 0_g и вектора скоростей по формуле (4) рассчитываются необходимые сигналы управления.

Поскольку в режиме динамического позиционирования действие ветровых и волновых возмущений $\bar{f}(t)$ играет основную роль, для задания $\bar{f}(t)$ нельзя воспользоваться моделью белого шума (2). Учитывая, что адекватное описание $\bar{f}(t)$ представляет случайный процесс с дробно-рациональным спектром, можно записать $\bar{f}(t)$ как решение стохастического дифференциального уравнения второго или более высокого порядка [4]. При этом для идентификации коэффициентов модели целесообразно воспользоваться известными методами адаптации стохастических систем управления [2]. Общая запись алгоритмов оценивания при этом будет включать расширенный вектор состояния в соответствии с общими правилами оценивания по Калману при небелых шумах формирующего фильтра [4].

Выводы

1. В результате выполненных действий можно найти общее решение связанных между собой задач комплексирования различных измерительных систем и выработки необходимых сигналов управления судном в условиях ветровых и волновых возмущений.

2. Появление каких-либо дополнительных источников информации о положении судна, а также использование разнообразных подруливающих устройств не приводит к изменению основных математических соотношений.

3. Основные формулы могут быть записаны для решения задачи оптимального управления в дискретном времени, соответствующей современным способам сбора и переработки информации с помощью бортового вычислителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соляков О. В. Использование современных глобальных навигационных спутниковых систем и их функциональных дополнений на внутренних водных путях: монография / О. В. Соляков. — М.: ФГБОУ ВО «МГАВТ», 2016. — 176 с.

2. Румянцев А. Ю. Оптимальное управление в системах электродвижения судов по критерию минимума потерь / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко, Н. В. Белоусова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 206–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-206-213.
3. Сахаров В. В. Алгоритм энергоэффективного управления курсом судна / В. В. Сахаров, А. Г. Таранин, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 38–46.
4. Korn A. G. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review / A. G. Korn, T. M. Korn. — N.-Y.: Dover Publications, Inc., 2000. — 1130 p.
5. Gao S. Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks / S. Gao, H. Huang // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2012. — Vol. 21. — Is. 1. — Pp. 196–213. DOI: 10.1016/j.trc.2011.09.007.
6. Лебедева М. П. Методика оценки безопасного движения судов в стесненной акватории / М. П. Лебедева, С. Д. Айзинов, А. О. Лебедев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 111–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120.
7. Студеникин Д. Е. Применение систем принятия решений для выбора параметров маневра судна / Д. Е. Студеникин, А. А. Григорян, Н. А. Маковецкая // Эксплуатация морского транспорта. — 2015. — № 4. — С. 58–62.
8. Мироненко А. А. Модель программного движения судна в стесненных водах / А. А. Мироненко // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 2. — С. 65–70.
9. Weng J. Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study / J. Weng, S. Xue // The Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 3. — Pp. 602–618. DOI: 10.1017/S0373463314000885.
10. Гриняк В. М. Оценка и представление параметров безопасного движения судна / В. М. Гриняк, М. В. Трофимов, В. И. Люлько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 51–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-51-61.
11. Burmeister H. C. Interaction of Harsh Weather Operation and Collision Avoidance in Autonomous Navigation / H. C. Burmeister, W. C. Bruhn, L. Walthe // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2015. — Vol. 9. — Nr. 1. — Pp. 31–40. DOI: 10.12716/1001.09.01.04.
12. Benedict K. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling / K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2014. — Vol. 8. — Nr 1. — Pp. 131–141. DOI: 10.12716/1001.08.01.15.
13. Baldauf M. Energy-efficient Ship Operation – Training Requirements and Challenges / M. Baldauf, R. Baumler, A. Olcer, T. Nakazawa, K. Benedict, S. Fischer, M. Schaub // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2013. — Vol. 7. — Nr 2. — Pp. 283–290. DOI: 10.12716/1001.07.02.16.
14. Masjed-Jamei M. Unified error bounds for all Newton–Cotes quadrature rules / M. Masjed-Jamei // Journal of Numerical Mathematics. — 2015. — Vol. 23. — Is. 1. — Pp. 67–80. DOI: 10.1515/jnma-2015-0006.

REFERENCES

1. Solyakov, O.V. *Ispol'zovanie sovremennykh global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem i ikh funktsional'nykh dopolnenii na vnutrennikh vodnykh putyakh: monografiya*. M.: FGBOU VO «MGAVT», 2016.
2. Rummyantsev, Alexey Yurevich, Veniamin Frantsevich Samoseiko, and Nadezhda Vladislavovna Belousova. “Optimal control of the electric propulsion systems of vessels on the criterion of minimum losses.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 206–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-206-213.
3. Sakharov, V.V., A.G. Taranin, and A.A. Chertkov. “Energoefficient ship steering control algorithm.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 38–46.
4. Korn, A.G., and T.M. Korn. *Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review*. N.Y.: Dover Publications, Inc., 2000.
5. Gao, Song, and He Huang. “Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 21.1 (2012): 196–213. DOI: 10.1016/j.trc.2011.09.007.

6. Lebedeva, Marina P., Sergei D. Aizinov, and Aleksei O. Lebedev. "Technique of assessment of the safe navigation in the «constrained» water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 111–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120.

7. Studenikin, D., A. Grigoryan, and N. Makovetskaya. "The use of decision support systems for choosing parameters of vessel's maneuvering." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (2015): 58–62.

8. Mironenko, A.A. "Vessel's program motion model in restricted waters." *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* 2 (2013): 65–70.

9. Weng, Jinxian, and Shan Xue. "Ship collision frequency estimation in port fairways: A case study." *The Journal of Navigation* 68.3 (2015): 602–618. DOI: 10.1017/S0373463314000885.

10. Grinyak, Victor Mihajlovich, Maxim Valerevich Trofimov, and Victor Ivanovich Lulko. "Data visualization of ship collision avoidance system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(38) (2016): 51–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-51-61.

11. Burmeister, H-C., W. C. Bruhn, and Laura Walther. "Interaction of harsh weather operation and collision avoidance in autonomous navigation." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 9.1 (2015): 31–40. DOI: 10.12716/1001.09.01.04.

12. Benedict, Knud, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, and M. Schaub. "Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring—a New Method for Advanced Ship Handling." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 8.1 (2014): 131–141. DOI: 10.12716/1001.08.01.15.

13. Baldauf, Michael, R. Baumler, A. Olcer, T. Nakazawa, K. Benedict, S. Fischer, and M. Schaub. "Energy-efficient Ship Operation—Training Requirements and Challenges." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 7.2 (2013): 283–290. DOI: 10.12716/1001.07.02.16.

14. Masjed-Jamei, Mohammad. "Unified error bounds for all Newton–Cotes quadrature rules." *Journal of Numerical Mathematics* 23.1 (2015): 67–80. DOI: 10.1515/jnma-2015-0006.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соляков Олег Владимирович — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)»

127994, Российская Федерация, г. Москва, ул. Образцова 9, стр. 9

e-mail: solyakovl@yandex.ru

Потемкин Андрей Александрович — аспирант Научный руководитель:

Соляков Олег Владимирович ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)»

127994, Российская Федерация, г. Москва, ул. Образцова 9, стр. 9

e-mail: andrey.potemkin@inbox.ru

Першин Никита Вячеславович — инспектор Публичное акционерное общество «Газпром» 196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 156, лит. А e-mail: nikita.pershin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Soliakov, Oleg V. — PhD, associate professor, assistant to the rector Russian University of Transport (MIIT) 9b9 Obrazcova Str., Moscow, 127994, Russian Federation e-mail: solyakovl@yandex.ru

Potemkin, Andrey A. — Postgraduate Supervisor:

Soliakov, Oleg V. — Russian University of Transport (MIIT) 9b9 Obrazcova Str.,

Moscow, 127994, Russian Federation

e-mail: andrey.potemkin@inbox.ru

Pershin, Nikita V. — Inspector Public Joint Stock Company Gazprom 156/lit.A Moskovskii Av., St. Petersburg, 196105, Russian Federation e-mail: nikita.pershin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 октября 2017 г.

Received: October 15, 2017.