

¹Д-р техн. наук, профессор кафедры компьютеризованных систем управления, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина

²Магистрант, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Актуальность. Для решения задач повышения уровня автоматизации процессов управления морскими подвижными объектами при маневрировании и динамическом позиционировании предложены алгоритмические процедуры синтеза оптимальных по быстродействию систем с переменной структурой обратных связей для заданной размерности модели объекта, требуемого вида траекторий стабилизации и ограничений на управляющие воздействия. Объектом исследования являются динамические процессы стабилизации морских подвижных объектов в условиях неполной информативности моделей и среды. Предметом исследований есть автоматизированные алгоритмические процедуры синтеза оптимальных по быстродействию систем управления с переменной структурой обратных связей.

Цель работы – повышение уровня автоматизации и показателей качества процессов управления морскими подвижными объектами на основе создания автоматизированных процедур синтеза робастно-оптимальных систем.

Метод. Для оптимизации процессов управления формируются оптимальные траектории стабилизации, определяются необходимые моменты переключения и вид управляющих функций в цепях обратных связей. Рассматриваются нелинейные модели морских подвижных объектов с учетом неполной информативности параметров модели и внешних возмущающих воздействий. Предложено использование робастного корректирующего контура управления, обеспечивающего компенсацию отклонения текущей траектории физического объекта от оптимальной траектории, которое возникает вследствие рассогласования параметров модели и физического объекта, а также влияния неконтролируемых возмущений. Таким образом, достигается инвариантность системы управления к неполной информативности моделей и минимальные значения ошибок управления.

Результаты. Разработанные алгоритмические процедуры синтеза робастно-оптимальных систем переменной структуры программно реализованы и исследованы при имитационном моделировании процесса стабилизации морского подвижного объекта на заданной траектории, результаты которого подтвердили корректность и эффективность предложенного подхода.

Выводы. На основе систем с переменной структурой обратных связей для критерия оптимальности по максимальному быстродействию разработаны алгоритмические процедуры автоматизированного синтеза управляющих функций для многомерных нелинейных систем, описывающих динамику морских подвижных объектов. Созданные программные средства автоматизации процесса синтеза и схемные решения систем управления практически применимы для широкого класса подвижных объектов различного технического назначения.

Ключевые слова: робастно-оптимальное управление, системы с переменной структурой обратных связей, морской подвижный объект.

НОМЕНКЛАТУРА

БКП – блок ключей переключения;

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор;

A^* – матрица, полученная из матрицы $A(V)$ линеаризацией в окрестностях начального значения $V(0)$;

a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} – параметры матриц $A(V)$, B и C соответственно;

$A(V)$, B , C – матрицы параметров, зависящих от координат, инерционных и аэродинамических коэффициентов соответственно;

$E(t)$ – вектор ошибок;

$F(t)$ – вектор сил и момента внешних возмущений;

G_1, G_2 – положительно определенные симметричные матрицы весовых коэффициентов;

q_1, q_2, s_1, s_2 – приведенные коэффициенты модели судна;

$T_x(t), T_y(t), T_\omega(t)$ – управляющие силы и момент;

t_i^s – момент переключения управлений на i -ом отрезке траектории;

$t_{0m}^s, t_{1m}^s, t_{2m}^s, T_m$ – моменты времени начала движения, переключений управляющих функций и окончания

движения, соответственно, определяемые для каждого из m отрезков маневрирования;

$U(t)$ – вектор управляющих сил и момента;

$v_x(t), v_y(t), \omega(t)$ – координаты морского подвижного объекта;

$V(t)$ – вектор координат морского подвижного объекта;

$V(t_i^s)$ – значения вектора координат в i -ый момент переключения;

(m)

$V_{\max}^{(m)}$ – максимальное значение максимального порядка производной вектора координат;

α – угол перекладки пера руля;

σ – дисперсия волновых ординат;

ω – угловая скорость судна;

$\Psi(t)$ – угол курса судна.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение движения по оптимальным траекториям стабилизации и точного позиционирования морских подвижных объектов в условиях неопределенности и с учетом функциональных ограничений требует усовершенствования и практической реализации принципов робастно-оптимального управления, которое обеспечивает решение соответствующих функциональных задач

в режиме реального времени [1]. Морские подвижные объекты, которые функционируют на границе раздела возмущенных воздушной и жидкостной сред, описываются многомерными нелинейными стохастическими дифференциальными системами уравнений. Основные общеприменимые упрощения для рассматриваемых функциональных задач управления морскими подвижными объектами включают: стационарность внешних случайных возмущений, горизонтальную плоскость динамических колебаний объекта и ряд других допущений [2, 3]. Формирование управляющих воздействий в системах динамического позиционирования, при применении классических методов оптимального управления, для нелинейных систем приводит к определенным вычислительным сложностям, которые связаны с необходимостью [4, 5] решения краевых задач высокого порядка, решения многомерных нестационарных матричных уравнений Рикатти, корректной формализации матриц весовых коэффициентов, используемых для квадратичных критериев оптимальности.

Объектом исследования являются динамические процессы стабилизации морских подвижных объектов в условиях неполной информативности моделей и окружающей среды. Предметом исследований есть автоматизированные алгоритмические процедуры синтеза оптимальных по быстродействию систем управления с переменной структурой обратных связей. Цель работы – повышение уровня автоматизации и показателей качества процессов управления морскими подвижными объектами на основе создания автоматизированных процедур синтеза робастно-оптимальных систем.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Морской подвижный объект функционирует в условиях недостаточной априорной информации о параметрах объекта и действия неконтролируемых случайных внешних возмущений (нерегулярного морского волнения, пульсаций ветра) и параметрических шумов, обусловленных качкой объекта. Требования к максимальному быстродействию и точности управления морским подвижным объектом определяются необходимостью обеспечения безопасности мореплавания и выполнения условий рабочего технологического процесса. Одним из возможных направлений создания эффективных структур и алгоритмов робастно-оптимального синтеза нелинейных систем управления морскими подвижными объектами является применение структур переменных обратных связей, при этом ставится задача разработки автоматизированных алгоритмических процедур синтеза для заданной размерности моделей объектов, различного вида граничных условий и траекторий стабилизации с учетом ограничений на управляющие воздействия. Критерий оптимальности задает требование минимального времени T переходного процесса, а инвариантность системы к неполной информативности модели, должна с минимальными значениями ошибок и их производных обеспечиваться контурами робастной коррекции.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Эффективные подходы для решения задач робастно-оптимального управления подвижными объектами, ис-

пользующие фундаментальные свойства обратных связей [6,7] приводят к статическим решениям [8], которые не всегда обеспечивают требуемые показатели качества управления. Применение принципов решения обратных задач динамики и структурного синтеза [9] не позволяют оптимизировать параметры программных (назначенных) траекторий. Широкое применение ПИД-регуляторов [10] также имеет определенные недостатки: значительная сложность настройки параметров регулятора при увеличении количества управляемых переменных; высокий уровень затрат энергии; чувствительность к влиянию параметрических шумов; появление интегрального насыщения в контурах; необходимость калибровки системы.

Реализация высокотехнологических функциональных требований при маневрировании и позиционировании морских подвижных объектов может быть осуществлена на применении прикладных систем управления с переменной структурой на основе специальных переключающихся обратных связей. Эти системы обеспечивают минимизацию энергозатрат или максимальное быстродействие, для конкретной функциональной задачи (рабочего технологического или переходного критического режимов) управления морскими подвижными объектами, с требуемой точностью управления и достаточной инвариантностью к неопределенности объектов и окружающей среды [11–13]. Робастно-оптимальное управление предполагает оптимальную систему управления как эталонную модель, сформированную на основе априорной информации о параметрах объекта и контролируемых (измеряемых) возмущениях. Робастное управление обеспечивает компенсацию отклонения текущей траектории физического объекта от оптимальной траектории, возникающей вследствие рассогласования параметров модели и физического объекта, а также влияния неконтролируемых возмущений.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемый подход базируется на использовании обратных связей с переменной структурой и включает следующие основные этапы: планирование оптимальной траектории; синтез управляющих функций и определение моментов их переключения в соответствующих цепях обратной связи многомерного объекта, изложенные для линейных моделей в [11–13].

Планирование траектории динамического объекта (в общем случае нелинейного нестационарного вида), для заданных критериев оптимальности и граничных условий, заключается в определении необходимого количества отрезков траектории с постоянными значениями соответствующих производных координат состояния, а также моментов времени переключения управляющих функций в цепях обратных связей при переходе с начального отрезка на заданный отрезок траектории. Переключение управляющих функций изменяет структурную конфигурацию обратных связей и решает задачу обеспечения оптимальной траектории объекта с требуемым порядком производной координаты состояния с соответствующим позитивным или негативным постоянным значением.

Синтез управляющих функций определяется на основе уравнений соответствующего баланса сил (момен-

тов) и их производных, при которых на определенных отрезках траектории выполняются условия постоянства соответствующих производных координат состояния. При этом можно сделать обобщенный вывод относительно прямых условий оптимальности для построения траекторий морского подвижного объекта в координатной форме при положительных значениях производных вектора координат состояния. Траектория для заданных граничных условий будет оптимальной по быстродействию при движении с максимальным порядком максимальных значений производных вектора координат состояния, с учетом ограничений на управляющее воздействие, при этом данная траектория будет с наибольшим расходом энергии. Моменты переключения управляющих функций в обратных связях рассчитываются путем решения системы алгебраических уравнений, составленных на основе вида планируемых оптимальных траекторий, с учетом ограничений на управляющее воздействие и заданных граничных условий [13].

Динамику морского подвижного объекта в наиболее обобщенном виде для систем динамического позиционирования с учетом общепринятых допущений о колебаниях в горизонтальной плоскости можно представить в векторно-матричной форме [2, 13]

$$\dot{\mathbf{V}}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{V})\mathbf{V}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{V})\mathbf{U}(t) + \mathbf{CF}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{V}(t) = \begin{bmatrix} v_x(t) & v_y(t) & \omega(t) \end{bmatrix}^T$; $\mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} T_x(t) & T_y(t) & T_\omega(t) \end{bmatrix}^T$; $\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} f_x(t) & f_y(t) & f_\omega(t) \end{bmatrix}^T$;

$$\mathbf{A}(\mathbf{V}) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12}\omega & a_{13}\omega \\ a_{21}\omega & a_{22} & a_{23} \\ a_{31}v_y & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix}.$$

Предполагается, что измеряемые внешние возмущения (ветровое воздействие, морское течение) учитываются в модели морского подвижного объекта и, таким образом, формируется соответствующее управление, компенсирующее их влияние. Компенсация неконтролируемого (неизмеряемого) внешнего возмущения (нерегулярного морского волнения) осуществляется введением корректирующего робастного канала управления.

Для формирования управляющих функций с учетом измеряемых значений управления сформируем уравнения баланса сил (моментов) для второй и третьей производных координат состояния для нелинейных стационарных моделей морских подвижных объектов (1) в виде

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}(t) &= \mathbf{A}(\mathbf{V})\dot{\mathbf{V}}(t) + \dot{\mathbf{A}}(\mathbf{V})\mathbf{V}(t) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{CF}(t), \\ \ddot{\mathbf{V}}(t) &= \mathbf{A}(\mathbf{V})\ddot{\mathbf{V}}(t) + 2\dot{\mathbf{A}}(\mathbf{V})\dot{\mathbf{V}}(t) + \ddot{\mathbf{A}}(\mathbf{V})\mathbf{V}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{CF}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Векторно-матричные преобразования системы (2) (обозначив матрицу $\mathbf{A}(\mathbf{V})$ как \mathbf{A}_v) дают выражения уп-

равлений для нулевых векторов соответствующих второй и третьей производных координат состояния

$$\begin{aligned} \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{A}_v\mathbf{B}\mathbf{U}(t) &= -(\dot{\mathbf{A}}_v + \mathbf{A}_v^2)\mathbf{V}(t) + \mathbf{A}_v\mathbf{CF}(t) + \mathbf{CF}(t), \\ \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{A}_v\mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) + (\mathbf{A}_v^2 + 2\dot{\mathbf{A}}_v\mathbf{B})\mathbf{U}(t) &= \\ = -(\mathbf{A}_v^3 + 2\dot{\mathbf{A}}_v\mathbf{A}_v + \mathbf{A}_v\dot{\mathbf{A}}_v + \ddot{\mathbf{A}}_v)\mathbf{V}(t) + \\ + \mathbf{C}\ddot{\mathbf{F}}(t) + \mathbf{A}_v\mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t) + 2\dot{\mathbf{A}}_v\mathbf{CF}(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, уравнения (3) формируют управление, которые определяют баланс приведенных сил (моментов) управления и демпфирования (т.е. балансировочный режим), для движения по соответствующим отрезкам траекторий с нулевыми значениями вектора координат $\ddot{\mathbf{V}}(0) = 0$ и $\ddot{\mathbf{V}}(0) = 0$ соответственно.

Моменты переключения управляющих функций являются статическими точками, для которых конечные значения переменных состояния для i -го отрезка траектории определяют совместно с новым значением высшей производной координаты, определенным на основе сформированных отрезков оптимальной траектории, начальные значения $(i + 1)$ -го отрезка траектории. Необходимые начальные значения управляющих функций для обеспечения движения морского подвижного объекта с заданными начальными условиями ($\mathbf{V}(t_i^s)$, $\dot{\mathbf{V}}(t_i^s)$, $\ddot{\mathbf{V}}(t_i^s)$) по соответствующему отрезку траектории получим из следующих алгебраических соотношений

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(t_i^s) &= \mathbf{B}^{-1}[\dot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \mathbf{A}_v(t_i^s)\mathbf{V}(t_i^s) - \mathbf{CF}(t_i^s)], \\ \dot{\mathbf{U}}(t_i^s) &= \mathbf{B}^{-1}[\ddot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \dot{\mathbf{A}}_v(t_i^s)\mathbf{V}(t_i^s) - \mathbf{A}_v(t_i^s)\dot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \mathbf{CF}(t_i^s)], \\ \ddot{\mathbf{U}}(t_i^s) &= \mathbf{B}^{-1}[\ddot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \ddot{\mathbf{A}}_v(t_i^s)\mathbf{V}(t_i^s) - \\ - 2\dot{\mathbf{A}}_v(t_i^s)\dot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \mathbf{A}_v(t_i^s)\ddot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \mathbf{CF}(t_i^s)]. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом заданных ограничений на управляющее воздействие (максимальные, физически реализуемые начальные значения управляющих функций), максимальные начальные значения первой и второй производной вектора координат состояния морского подвижного объекта будут иметь вид

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_{\max}(t_i^s) &= \mathbf{A}\mathbf{V}(t_i^s) + \mathbf{B}\mathbf{U}_{\max}(t_i^s) + \mathbf{CF}(t_i^s), \\ \ddot{\mathbf{V}}_{\max}(t_i^s) &= (\mathbf{A}^2 + \dot{\mathbf{A}})\mathbf{V}(t_i^s) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}_{\max}(t_i^s) + \\ + \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{U}_{\max}(t_i^s) + \mathbf{A}\mathbf{CF}(t_i^s) + \mathbf{CF}(t_i^s). \end{aligned}$$

Таким образом, формируется система управления с переменной структурой обратных связей (структурная схема представлена на рис. 1 для канала управления с нулевой третьей производной вектора координат состояния объекта управления) обеспечивающая, при определенном положении ключа БКП, отрезки траектории с соответствующими нулевыми производными вектора координат состояния.

Решение задачи робастного управления морским подвижным объектом, в условиях неполной определен-

Сформируем траекторию стабилизации судна при нулевой третьей производной $\ddot{\omega}$ ($\ddot{\omega}(t) = \pm \text{const}$), состоящую из трех отрезков ($m = 3$) маневрирования для следующих граничных условий:

Граничные условия:

$$I) \psi(0) = 0, \omega(0) = 0, \dot{\omega}(0) = 0, |\ddot{\omega}(0)| = 2 \cdot 10^{-6} c^{-3},$$

$$\psi(T_1) = 8 \text{ град}, \omega(T_1) = 0,$$

$$\dot{\omega}(T_1) = 0, |\ddot{\omega}(T_1)| = 2 \cdot 10^{-6} c^{-3};$$

$$II) \psi(T_2) = 10 \text{ град}, \omega(T_2) = 0, \dot{\omega}(T_2) = 0,$$

$$|\ddot{\omega}(T_2)| = 1 \cdot 10^{-6} c^{-3};$$

$$III) \psi(T_3) = \psi_{\text{зад}} = 12 \text{ град}, \omega(T_3) = 0, \dot{\omega}(T_3) = 0,$$

$$|\ddot{\omega}(T_3)| = 5 \cdot 10^{-7} c^{-3}.$$

Каждый из m отрезков траектории маневрирования состоит из трех участков фазовой траектории:

– первый участок:

$$\psi(t_{1m}^s) = \psi(T_{m-1}) + \ddot{\omega}(T_m) \frac{(t_{1m}^s - t_{0m}^s)^3}{6}, \quad (12)$$

$$\omega(t_{1m}^s) = \ddot{\omega}(T_m) \frac{(t_{1m}^s - t_{0m}^s)^2}{2},$$

$$\dot{\omega}(t_{1m}^s) = \ddot{\omega}(T_m)(t_{1m}^s - t_{0m}^s);$$

– второй участок:

$$\psi(t_{2m}^s) = \psi(t_{1m}^s) + \omega(t_{1m}^s)(t_{2m}^s - t_{1m}^s) + \dot{\omega}(t_{1m}^s) \frac{(t_{2m}^s - t_{1m}^s)^2}{2} - \ddot{\omega}(T_m) \frac{(t_{2m}^s - t_{1m}^s)^3}{6},$$

$$\omega(t_{2m}^s) = \omega(t_{1m}^s) + \dot{\omega}(t_{1m}^s)(t_{2m}^s - t_{1m}^s) - \ddot{\omega}(T_m) \frac{(t_{2m}^s - t_{1m}^s)^2}{2},$$

$$\dot{\omega}(t_{2m}^s) = \dot{\omega}(t_{1m}^s) - \ddot{\omega}(T_m)(t_{2m}^s - t_{1m}^s); \quad (13)$$

– третий участок:

$$\psi(t_{2m}^s) + \omega(t_{2m}^s)(T_m - t_{2m}^s) + \dot{\omega}(t_{2m}^s) \frac{(T_m - t_{2m}^s)^2}{2} + \ddot{\omega}(T_m) \frac{(T_m - t_{2m}^s)^3}{6} = \psi(T_m),$$

$$\omega(t_{2m}^s) + \dot{\omega}(t_{2m}^s)(T_m - t_{2m}^s) + \ddot{\omega}(T_m) \frac{(T_m - t_{2m}^s)^2}{2} = 0, \dot{\omega}(t_{2m}^s) + \ddot{\omega}(T_m)(T_m - t_{2m}^s) = 0, \quad (14)$$

где $t_{01}^s = 0$; $T_1 = t_{02}^s$; $T_2 = t_{03}^s$; $\psi(T_0) = \psi(0) = 0$.

Решение уравнений (12–14) определяет моменты времени переключения управляющих функций для I отрезка $t_{11}^s = 32,68$ с, $t_{21}^s = 98,04$ с и окончания переходного процесса $T_1 = 130,72$ с; II отрезка $t_{12}^s = 156,66$ с, $t_{22}^s = 208,54$ с и окончания переходного процесса $T_2 = 234,47$ с; III отрезка $t_{13}^s = 267,15$ с, $t_{23}^s = 332,51$ с; и окончания переходного процесса $T_3 = 365,19$ с.

Уравнение для определения управляющих функций при условии $\ddot{\omega}(t) = 0$ будут иметь на основе уравнения (3) следующий вид

$$\ddot{\alpha}(t) + 0,0018\dot{\alpha}(t) - 0,081\alpha(t) = [0,06|\omega(t)| - 0,007|\dot{\omega}(t)| - 0,0025|\ddot{\omega}(t)|]\omega(t).$$

Начальные значения угловой скорости угла перекладки пера руля для соответствующего момента переключения t_i^s определяются выражением вида (4)

$$\dot{\alpha}(t_i^s) = 158,7\ddot{\omega}(t_i^s) + 13,3\dot{\omega}(t_i^s) + 4,76|\omega(t_i^s)|\omega(t_i^s) - 0,032\alpha(t_i^s).$$

Моделирование процесса стабилизации судна (структурная схема – рис. 3) рассматривалось на основе модели (11) с учетом воздействия неконтролируемого нерегулярного волнения, формируемого соответствующим формирующим фильтром [2] для бальности волнения с дисперсией волновых ординат $\sigma = 0,143$ м², рассогласования параметров математической модели и физического судна, задаваемого в пределах 15%, а также влияния параметрического шума заданной интенсивности.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование процесса стабилизации судна (рис. 4) показывает для робастно-оптимальной системы управления: временные (для угла курса $\psi(t)$ – рис. 4а, угловой скорости $\omega(t)$ – рис. 4б, углового ускорения $\dot{\omega}(t)$ – рис. 4в, угла перекладки руля $\alpha(t)$ – рис. 4г), траектории маневрирования в неподвижной системе координат ХОУ (рис. 4д) и фазовые ($\omega(\psi)$ – рис. 4е, $\dot{\omega}(\psi)$ – рис. 4ж, $\dot{\omega}(\omega)$ – рис. 4з, $\dot{\omega}(\omega, t)$ – рис. 4и) характеристики, обеспечивающие точность процесса управления с ошибками менее 1%.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты имитационного моделирования с использованием программных средств MatLab'a позволили сделать следующие заключения: предложенная алгоритмическая процедура синтеза системы управления морского подвижного объекта является эффективной и позволяет корректно описывать динамические процессы управления; разработанные системы управления применимы для многомерных объектов и при построении оптимальных по максимальному быстродействию траекторий используют разделение переменных на ведущие, субведущие и ведомые для формирования последовательности моментов времени переключения управляющих функций в обратных связях объекта управления; применение автоматизированных процедур синтеза позволяет использовать системы с переменной структу-

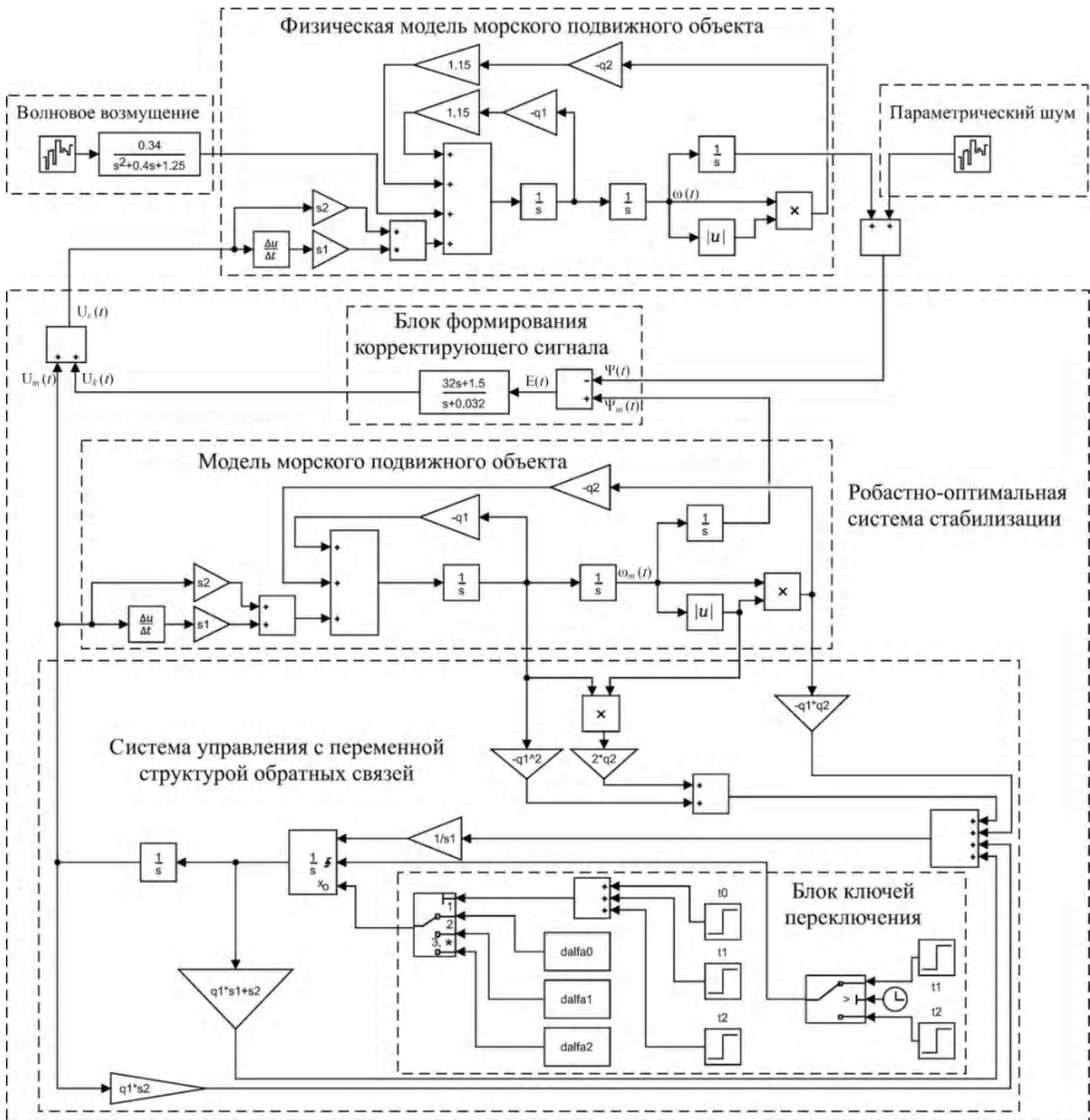


Рисунок 3 – Структурная схема робастно-оптимальной стабилизации судна на заданной траектории

рой для широкого класса задач стабилизации морских подвижных объектов с обеспечением требуемого уровня инвариантности управления в условиях неполной информативности модели объекта управления с необходимой точностью в окрестностях сформированной оптимальной траектории или области динамического позиционирования.

ВЫВОДЫ

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые на основе систем с переменной структурой обратных связей предложены алгоритмические процедуры автоматизированного синтеза управляющих функций для многомерных нелинейных систем, описы-

вающих динамику морских подвижных объектов, которые позволяют решать задачи оптимизации процессов стабилизации для критерия максимального быстродействия. Формирование балансирующих уравнений сил и моментов, действующих на объект, в т. ч. возмущающих воздействий, а также их производных позволяет синтезировать требуемые управляющие воздействия. Практическая ценность полученных результатов заключается в создании программных средств автоматизации процесса синтеза робастно-оптимальных систем переменной структуры для конкретных систем маневрирования и динамического позиционирования морских подвижных объектов.

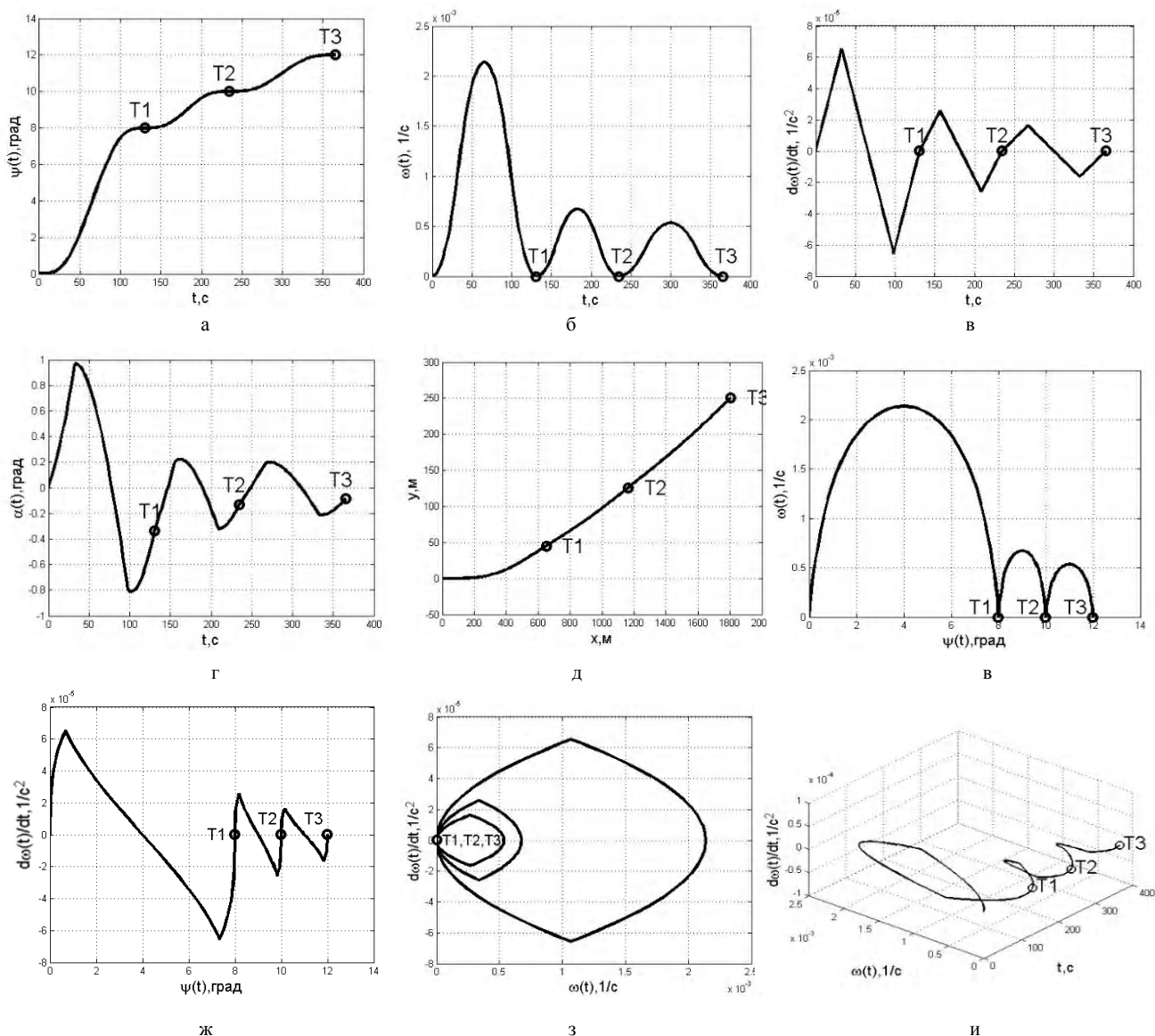


Рисунок 4 – Временные и фазовые характеристики стабилизации судна на заданной траектории

Возможность эффективного решения задач оптимального управления в условиях неполной информативности и нестационарности нелинейной модели объекта и окружающей среды расширяет применение предлагаемых автоматизированных процедур синтеза для классов подвижных объектов различного назначения, например, дронами для мониторинга безопасности мореплавания в районах интенсивного судоходства.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем признательность д.т.н., профессору Лебедеву Дмитрию Васильевичу, многолетнему руководителю секции «Управление аэрокосмическими, морскими и другими подвижными объектами» Международной научно-технической конференции «АВТОМАТИКА» за плодотворное и критическое обсуждение научных исследований авторов в области робастно-оптимальных систем управления морскими объектами, что позволило развить методы синтеза для нелинейных многомерных систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кунцевич В. М. Синтез робастно-оптимальных систем управления нестационарными объектами при ограниченных возмущения / В. М. Кунцевич // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 2. – С.19–31.
2. Лукомский Ю. А. Системы управления морскими подвижными объектами / Ю. А. Лукомский, В. С. Чугунов. – Л. : Судостроение, 1988. – 272 с.
3. Fossen, T.I. Kinematic models for maneuvering and seakeeping of marine vessels / T.I. Fossen, T. Perez // Journal of modeling, identification and control. – 2007. – Vol. 28, Issue 1. – P. 19–30.
4. Optimal Control of Nonlinear Systems / [N. V. Balashevich, R. Gabasov, A. I. Kalinin, F. M. Kirillova] // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2002. – Vol. 42, № 7. – P. 931–956.
5. Fossen T. I. Nonlinear output feedback control of dynamically positioned ships using vectorial observer backstepping / T. I. Fossen, A. Grovlen // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 1998. – Vol. 6, Issue 1. – P. 121–129.
6. Емельянов С. В. Новые типы обратной связи / С. В. Емельянов, С. К. Корвин. – М. : Наука, Физматлит, 1997. – 352 с.

7. Емельянов С. В. Системы автоматического управления переменной структуры: синтез скалярных и векторных систем по состоянию и по выходу / С. В. Емельянов // Нелинейная динамика и управления. – 2007. – Вып. 5. – С. 5–24.
8. Banos A. Nonlinear quantitative stability / A. Banos, I. M. Horowitz // Int. Journal of Robust and Non-Linear Control. – 2004. – Vol. 14. – P. 289–306.
9. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления / П. Д. Крутько. – М. : Машиностроение, 2004. – 576 с.
10. Comastlivas, R. Automatic design of robust PID controllers based on QFT specifications / R. Comastlivas, T. Escobet, J. Quevedo // Proceeding of IFAC Conference on Advances in PID Control. – 2012. – P. 715–720.
11. Тимченко В. Л. Робастная стабилизация морских подвижных объектов на основе систем с переменной структурой обратных связей / В. Л. Тимченко, Ю. П. Кондратенко // Проблемы управления и информатики. – 2011. – № 3. – С. 79–92.
12. Тимченко В. Л. Синтез структурно переключаемых систем для управления многомерными подвижными объектами / В. Л. Тимченко, Ю. П. Кондратенко // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2011. – № 1(24). – С. 158–163.
13. Тимченко В. Л. Оптимизация процессов стабилизации морского подвижного объекта в режиме динамического позиционирования / В. Л. Тимченко, О. А. Ухин // Проблемы управления и информатики. – 2014. – № 4. – С. 77–88.

Статья поступила в редакцию 29.03.2017.
После доработки 24.06.2017

Тимченко В. Л.¹, Лебедев Д. О.²

¹Д-р техн. наук, профессор кафедри комп'ютеризованих систем управління, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

²Магістрант, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

АЛГОРИТМІЧНІ ПРОЦЕДУРИ СИНТЕЗУ СИСТЕМ ЗМІННОЇ СТРУКТУРИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ МОРСЬКИМИ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Актуальність. Для розв'язання задач підвищення рівня автоматизації процесів керування морськими рухомими об'єктами при маневруванні і динамічному позиціонуванні запропоновані алгоритмічні процедури синтезу оптимальних за швидкодією систем зі змінною структурою зворотних зв'язків для заданої розмірності моделі об'єкту, необхідного виду траєкторій стабілізації та обмежень на керуючі впливи. Об'єктом дослідження є динамічні процеси стабілізації морських рухомих об'єктів в умовах неповної інформативності їх моделей і навколишнього середовища. Предметом дослідження є автоматизовані алгоритмічні процедури синтезу оптимальних за швидкодією систем керування зі змінною структурою зворотних зв'язків.

Мета роботи – підвищення рівня автоматизації та показників якості процесів керування морськими рухомими об'єктами на основі створення автоматизованих процедур синтезу робастно-оптимальних систем.

Метод. Для оптимізації процесів керування формуються оптимальні траєкторії стабілізації, визначаються необхідні моменти перемикачів і вигляд керуючих функцій в ланцюгах зворотних зв'язків. Розглядаються нелінійні моделі морських рухомих об'єктів з урахуванням неповної інформативності параметрів моделі та зовнішніх збурень. Запропоновано використання робастного корегувального контуру керування, який забезпечує компенсацію відхилення поточної траєкторії фізичного об'єкта від оптимальної траєкторії, що виникає внаслідок розузгодження параметрів моделі та фізичного об'єкта і впливу неконтрольованих збурень. Таким чином, досягається інваріантність системи керування до неповної інформативності моделей та мінімальні значення похибок керування.

Результати. Розроблені алгоритмічні процедури синтезу робастно-оптимальних систем змінної структури програмно реалізовані та досліджені при імітаційному моделюванні процесу стабілізації морського рухомого об'єкту на заданій траєкторії, результати якого підтвердили коректність і ефективність запропонованого підходу.

Висновки. На основі систем зі змінною структурою зворотних зв'язків для критерію оптимальності по максимальній швидкодії розроблені алгоритмічні процедури автоматизованого синтезу керуючих функцій для багатовимірних нелінійних систем, що описують динаміку морських рухомих об'єктів. Створені програмні засоби автоматизації процесу синтезу і схемні рішення систем керування можуть бути практично застосовні для широкого класу рухомих об'єктів різного технічного призначення.

Ключові слова: робастно-оптимальне керування, системи зі змінною структурою зворотних зв'язків, морський рухомий об'єкт.

Timchenko V. L.¹, Lebedev D. O.²

Doctor of Science, Professor of Department of the Computer's Control Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

²Graduate student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

ALGORITHMIC PROCEDURES OF SYNTHESIS OF VARIABLE STRUCTURE SYSTEMS FOR MARINE VEHICLES CONTROL

Context. Algorithmic procedures for synthesizing optimal speed systems with variable feedback structure and a given dimension of the vehicle model, required type of stabilization trajectories and constraints on control actions are proposed for solving the tasks of increasing level of automatization control processes of marine vehicles at maneuvering and dynamic positioning. The study object are dynamic processes which stabilize marine mobile objects in conditions of incomplete informative nature of their models and the environment. The subject of the research is automated algorithmic procedures for synthesis of optimal control systems with variable feedback structure.

Objective – to increase the level of automation and quality indicators for the control processes of marine mobile objects on the basis of creating automated procedures for the synthesis of robust-optimal systems.

Method. To optimize control processes, optimal stabilization trajectories are formed, also the necessary switching moments and the type of control functions are determined for the feed-backs of optimizing control processes. Nonlinear models of marine vehicles with incomplete informativeness of model parameters and external disturbances are considered. The robust correcting control circuit providing compensation of the errors of the actual trajectory of physical object from the optimal trajectories, which arise from a mismatch between the parameters of the model and the physical object and from the effect of uncontrolled disturbances, is proposed. Thus, the control system is invariant for incomplete informativeness of models and minimal values errors of control can be achieved.

Results. The algorithmic procedures for synthesizing robust optimal systems of variable structure have been implemented and studied in the simulation of the stabilizing process of a mobile marine object on a given trajectory, the results of which confirmed the correctness and effectiveness of the proposed approach.

Conclusions. On the basis of systems with variable feedback structure for the criterion of optimality for the maximum operating speed, algorithmic procedures for the automated synthesis of control functions for multidimensional nonlinear systems describing the dynamics of

mobile marine objects have been developed. The software tools for automating the synthesis process and schematic solutions of control systems are practically applicable for a wide class of mobile objects of various technical purposes.

Keywords: robust-optimal control, systems with the variable structure of feed-backs, marine vehicles.

REFERENCES

1. Kuncевич V. M. Sintez robustno-optimal'nyh sistem upravlenija nestacionarnymi ob'ektami pri ogranichennyh vozmushhenijah, *Problemy upravlenija i informatiki*, 2004, No. 2, pp. 19–31.
2. Lukomskij Ju. A., Chugunov V. S. Sistemy upravlenija morskimi podvizhnymi ob'ektami. Leningrad, Sudostroenie, 1988, 272 p.
3. Fossen T. I., Perez T. Kinematic models for maneuvering and seakeeping of marine vessels, *Journal of modeling, identification and control*, 2007, Vol. 28, Issue 1, pp. 19–30.
4. Balashevich N. V., Gabasov R., Kalinin A. I., Kirillova F. M. Optimal Control of Nonlinear Systems, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2002, Vol. 42, No. 7, pp. 931–956.
5. Fossen T. I., Grovlen A. Nonlinear output feedback control of dynamically positioned ships using vectorial observer backstepping, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1998, Vol. 6, Issue 1, pp. 121–129.
6. Emel'janov S. V., Korovin S. K. Novye tipy obratnoj svjazi. Moscow, Nauka, Fizmatlit., 1997, 352 p.
7. Emel'janov S. V. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija peremennoj struktury: sintez skaljarnyh i vektornyh sistem po sostojaniju i po vyhodu, *Nelinejnaja dinamika i upravlenija*, 2007, Vyp. 5, pp. 5–24.
8. Banos A., Horowitz I. M. Nonlinear quantitative stability / A. Banos, *Int. Journal of Robust and Non-Linear Control*, 2004, Vol. 14, pp. 289–306.
9. Krut'ko P. D. Obratnye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravlenija. Moscow, Mashinostroenie, 2004, 576 p.
10. Comastri R., Escobet T., Quevedo J. Automatic design of robust PID controllers based on QFT specifications, *Proceeding of IFAC Conference on Advances in PID Control*, 2012, pp. 715–720.
11. Timchenko V. L., Kondratenko Ju. P. Robastnaja stabilizacija morskikh podvizhnyh ob'ektov na osnove sistem s peremennoj strukturoj obratnyh svjazej, *Problemy upravlenija i informatiki*, 2011, No. 3, pp. 79–92.
12. Timchenko V. L., Kondratenko Ju. P. Sintez strukturno perekljuchaemyh sistem dlja upravlenija mnogomernymi podvizhnymi ob'ektami, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2011, No. 1(24), pp. 158–163.
13. Timchenko V. L., Uhin O. A. Optimizacija processov stabilizacii morskogo podvizhnogo ob'ekta v rezhime dinamicheskogo pozicionirovanija, *Problemy upravlenija i informatik*, 2014, No. 4, pp. 77–88.