

РОБАСТНО-ОПТИМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Рассмотрено решение проблемы повышения качества управления морскими подвижными объектами на основе робастно-оптимальных систем с переменной структурой обратных связей при требованиях максимального быстрого действия или минимума расхода энергии в условиях неопределенности объекта и внешней среды. Сформирована процедура синтеза управляющих функций, которые реализуются с помощью специальных переменных структур цепей обратных связей для сформированных условий оптимальности.

Ключевые слова: динамическое позиционирование морских подвижных объектов, робастно-оптимальные системы, переменная структура обратных связей.

Розглянуто розв'язок проблеми підвищення якості керування морськими рухомими об'єктами на основі робастно-оптимальних систем зі змінною структурою зворотних зв'язків при вимогах максимальної швидкодії чи мінімуму розходу енергії в умовах невизначеності об'єкта та зовнішнього середовища. Сформовано процедуру синтезу керуючих функцій, які реалізуються за допомогою спеціальних змінних структур ланцюгів зворотних зв'язків для сформованих умов оптимальності.

Ключові слова: динамічне позиціонування морських рухомих об'єктів, робастно-оптимальні системи, змінна структура зворотних зв'язків.

The decision of problem of upgrading control of marine mobile objects is considered on the basis of the robust-optimal systems with the variable structure of feed-backs at the requirements of maximal fast-acting or a minimum of expense of energy in the conditions of uncertainty of object and external environment. Procedure of synthesis of control functions which will be realized by the special variable structures of chains of feed-backs for the formed terms of optimumness is formed.

Key words: dynamic positioning of marine mobile objects, robust-optimal systems, variable structure of feed-backs.

Введение. Актуальность решения снижения эксплуатационных затрат транспортного флота и повышения безопасности мореплавания требует дальнейших исследований в области разработки и создания надежных и эффективных систем управления МПО при маневрировании в условиях ограниченных акваторий и при выполнении технологических операций в открытом море. Теоретические основы автоматизации процессов управления МПО разработаны отечественными и зарубежными научными учеными достаточно глубоко. В то же время анализ, например, принципов построения авторулевых на транспортных судах демонстрирует широкое практическое применение ПИД-регуляторов, несмотря на их известные недостатки с точки зрения настройки параметров, затрат энергии, чувствительности к влиянию параметрических шумов, который требует для автоматизации процессов управления движением МПО проведения дополнительных научных исследований на современном этапе. Для усовершенствования существующих систем

позиционирования и маневрирования актуальными есть требования повышения энергетической экономичности, времени продолжительности рабочего функционирования и точности управления с учетом действия значительных возмущений в открытом море.

Обеспечение гарантобезопасных траекторий и точного позиционирования МПО в условиях неопределенности базируется на усовершенствовании и практической реализации управления на основе робастно-оптимальных систем, которые будут обеспечивать решение задач оптимального и субоптимального управления для решения соответствующих функциональных задач в режиме реального времени [1]. Выполнение повышенных технологических требований к характеристикам процессов маневрирования и позиционирования МПО может быть осуществлено путем реализации процессов управления на основе создания и развития прикладных систем переменной структуры, которые базируются на использовании специальных переключаемых структур обратных связей и

обеспечивают эффективность по показателям затрат энергии и ошибок управления при достаточном уровне инвариантности к неопределенности объектов и внешней среды [2; 3].

Для создания эффективных и прикладных алгоритмов управления фундаментальным элементом, который постоянно развивается, есть управления с обратными связями, в том числе переменной структуры, а также на основе использования линейных матричных неравенств, построения ограниченных обратных связей с обеспечением дополнительных свойств переходных процессов и др. [2; 4-6].

При решении первой задачи робастно-оптимального управления – синтеза оптимального управления – основной и принципиальной трудностью при использовании классических методов есть вычислительная сложность решения краевых задач для синтеза программного управления и матричных уравнений Риккати при построении оптимального регулятора с учетом многомерности математической модели МПО. Формирование критериев оптимальности на основе квадратичных критериев требует формализации матриц весовых коэффициентов, которая не всегда может быть определена корректно или нуждается в выполнении дополнительных процедур вычислений [7]. Необходимость решения второй задачи робастно-оптимального управления обусловлена неполной априорной информацией о динамической модели МПО и внешней среды. Применение в условиях неопределенности «скользящих» режимов требует повышенных затрат энергии и частых переключений, что для органов управления МПО может приводить к снижению работоспособности. Одним из эффективных путей реализации робастных алгоритмов есть синтез с использованием эталонной модели объекта управления.

Анализ многолетней статистики аварийности морского флота, литературных источников и региональных транспортных проблем позволил определить основные функциональные задачи управления МПО для дальнейших научных исследований:

– стабилизация маневрирующих судов с винторулевым комплексом на заданных траекториях в условиях ограниченных акваторий с обеспечением переходных процессов (маневрирования) с максимальным быстродействием при учете ограничений на управляющее воздействие, а также стабилизацию на заданном курсе при движении в открытом море с минимумом затрат энергии и количества переключений руля;

– стабилизация МПО с динамическим позиционированием в заданной безопасной области рабочего функционирования, например, при проведении перегрузочных или геологоразведочных работ в условиях открытого моря с минимумом затрат энергии в технологических режимах и максимальным быстродействием в условиях экстремальных ситуаций, обусловленных воздействием значительных внешних возмущений.

Оптимизация процессов управления морскими подвижными объектами. Рассмотрим порядок синтеза управляющих функций для наиболее общей задачи стабилизации морского подвижного объекта с динамическим позиционированием (рис. 1). Задача динамического позиционирования МПО в «безопасном круге» с ограниченным радиусом $R_{\text{без}}$ (3÷6 % от глубины стоянки) характеризуется малыми скоростями допустимых колебаний МПО. Необходимо отметить, что высокие требования к точности динамического позиционирования предполагают конструктивные решения компоновки двигателей МПО, обеспечивающих создание управляющего усилия по каждой управляемой координате [8]. Это позволяет описать динамику МПО (без учета реакции технологического инструмента) в горизонтальной плоскости системой линеаризованных дифференциальных уравнений относительно управляемых координат: поперечно-горизонтальной v_x и продольно-горизонтальной v_y скоростей, а также угловой скорости ω вращения (рысканья) относительно центра масс с учетом принятых допущений и значений приведенных инерционных и аэрогидродинамических коэффициентов [8; 9]

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

где $\mathbf{V}(t) = \begin{bmatrix} v_x(t) & v_y(t) & \omega(t) \end{bmatrix}^T$ – вектор координат состояния;

$\mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} T_x(t) & T_y(t) & M_\omega(t) \end{bmatrix}^T$ – вектор управляющих сил и момента;

$\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} f_x(t) & f_y(t) & m_\omega(t) \end{bmatrix}^T$ – вектор контролируемых сил и момента внешних сил;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix} \text{ – матрицы коэффициентов.}$$

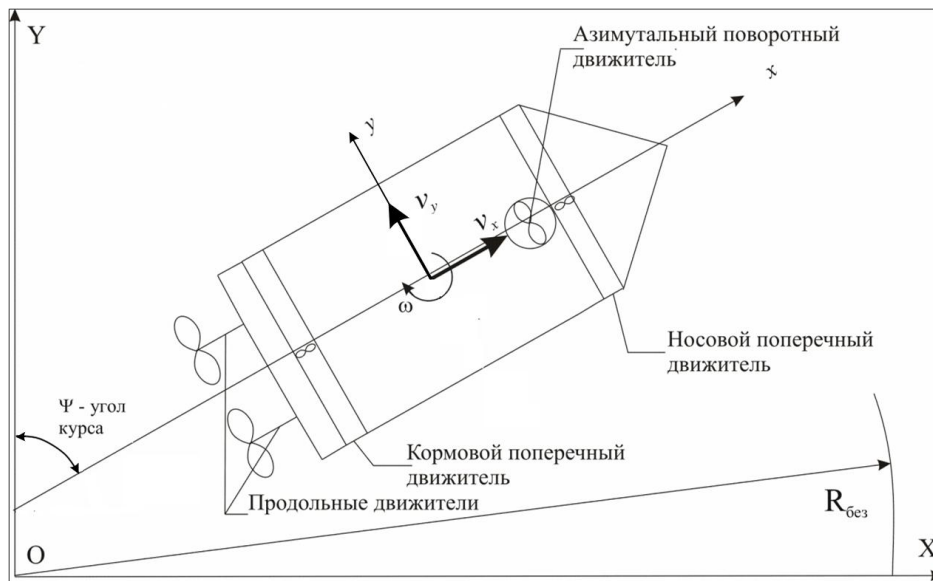


Рис. 1. Морской подвижный объект с динамическим позиционированием

Для обеспечения процесса управления МПО в режиме ДП рассмотрим применение систем с переменной структурой обратных связей [10; 11], так как данный подход позволяет при синтезе оптимального управления избежать ряд вычислительных сложностей для многомерных динамических моделей МПО, и включает основные этапы: планирование оптимальной траектории; определение моментов переключения управляющих функций в цепях обратной связи объекта; синтез управляющих функций в соответствующих цепях обратной связи многомерного объекта. Планирование оптимальной траектории для заданных граничных условий заключается в определении требуемого 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. На основе анализа многообразия траекторий сформированы прямые условия оптимальности для практического построения траекторий стабилизации МПО с максимальным быстродействием или минимумом израсходованной энергии [10]. При позитивных значениях производных вектора координат состояния траектория для заданных граничных условий будет оптимальной по быстродействию при движении с максимально возможным количеством возможных максимальных значений производных вектора координат состояния, с учетом ограничений на управляющее воздействие. На основе полученных траекторий формируются управляющие воздействия в цепях обратной связи, обеспечивающие требуемый порядок производной координаты состояния с соответствующим позитивным или негативным постоянным значением.

Для обеспечения движения по заданным отрезкам траектории стабилизации определим соответствующие управляющие функции на основе дифференциального преобразования

уравнения (1) относительно нулевой третьей производной вектора скоростей МПО, с учетом требования физической реализуемости управляющего усилия движителей, обеспечивающих движения по заданным отрезкам траектории. Это позволяет сформировать уравнение баланса приведенных сил и момента управления и демпфирования, а также их производных:

$$A^3 \dot{\mathbf{V}}(t) + A^2 \mathbf{B} \mathbf{U}(t) + A \mathbf{B} \ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{B} \ddot{\mathbf{U}}(t) + A^2 \mathbf{C} \mathbf{F}(t) + A \mathbf{C} \dot{\mathbf{F}}(t) + \mathbf{C} \ddot{\mathbf{F}}(t) = 0. \quad (2)$$

После векторно-матричных преобразований уравнения (2) и применения преобразования Лапласа управляющая функция с учетом заданных начальных условий для управления запишется для первого отрезка в виде

$$\mathbf{U}(p) = -\mathbf{B}^{-1}(p^2 \mathbf{I} + p\mathbf{A} + \mathbf{A}^2)^{-1} \times \times [\mathbf{A}^3 \mathbf{V}(p) - (p\mathbf{I} + \mathbf{A}) \mathbf{B} \mathbf{U}_0 - \mathbf{B} \dot{\mathbf{U}}_0 + (p^2 \mathbf{I} + p\mathbf{A} + \mathbf{A}^2) \mathbf{C} \mathbf{F}(p) - (p\mathbf{I} + \mathbf{A}) \mathbf{C} \dot{\mathbf{F}}_0 - \mathbf{C} \ddot{\mathbf{F}}_0] \quad (3)$$

для i -го отрезка:

$$\mathbf{U}_i(p) = -\mathbf{B}^{-1}(p^2 \mathbf{I} + p\mathbf{A} + \mathbf{A}^2)^{-1} \times \times [\mathbf{A}^3 \mathbf{V}(p) - (p\mathbf{B} + \mathbf{A} \mathbf{B}) \mathbf{U}_i - \mathbf{B} \dot{\mathbf{U}}_i + (p^2 \mathbf{I} + p\mathbf{A} + \mathbf{A}^2) \mathbf{C} \mathbf{F}(p) - (p\mathbf{I} + \mathbf{A}) \mathbf{C} \dot{\mathbf{F}}_i - \mathbf{C} \ddot{\mathbf{F}}_i]. \quad (4)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица, t_{ip} – i -й момент переключения.

Необходимые начальные значения управляющих функций для обеспечения движения МПО с заданными начальными условиями по соответствующему отрезку траектории получим из следующих соотношений

$$\mathbf{U}_0 = \mathbf{B}^{-1}[\dot{\mathbf{V}}(0) - \mathbf{A} \mathbf{V}(0) - \mathbf{C} \mathbf{F}(0)], \quad \dot{\mathbf{U}}_0 = \mathbf{B}^{-1}[\ddot{\mathbf{V}}(0) - \mathbf{A} \dot{\mathbf{V}}(0) - \mathbf{C} \dot{\mathbf{F}}(0)]; \quad (5)$$

$$\mathbf{U}_{t_{ip}} = \mathbf{B}^{-1}[\dot{\mathbf{V}}(t_{ip}) - \mathbf{A} \mathbf{V}(t_{ip}) - \mathbf{C} \mathbf{F}(t_{ip})], \quad \dot{\mathbf{U}}_{t_{ip}} = \mathbf{B}^{-1}[\ddot{\mathbf{V}}(t_{ip}) - \mathbf{A} \dot{\mathbf{V}}(t_{ip}) - \mathbf{C} \dot{\mathbf{F}}(t_{ip})].$$

С учетом заданных ограничений на управляющее воздействие максимальными, физически реализуемыми начальными значениями управляющих функций, максимальное начальное значение второй производной вектора координат состояния МПО будет иметь вид

$$\ddot{\mathbf{V}}_{\max}(0) = \mathbf{A}^2 \mathbf{V}(0) + \mathbf{A} \mathbf{B} \mathbf{U}_{\max}(0) + \mathbf{B} \dot{\mathbf{U}}_{\max}(0).$$

Для общего случая нулевой производной вектора фазовых координат k -го порядка $\mathbf{V}^{(k)}(t) = 0$, приняв нулевые начальные значения возмущения,

в результате соответствующих векторно-матричных преобразований, вектор управляющих функций запишется в виде:

$$U(p) = -B^{-1}A_k^{-1}[A^k V(p) - U_0(p) + A_k C F(p)], (6)$$

где матрица коэффициентов $A_k = \sum_{j=0}^{k-1} p^j A^{k-j-1}$;

$U_0(p)$ – вектор начальных значений управляющей функции и ее производных; $k \leq k_{оп}$ – порядок

системы, ограниченный условием физической реализуемости управляющего воздействия.

Таким образом, формируется система управления со специальной структурой обратных связей (рис. 2, БКП – блок ключей переключения) для многомерной стационарной линейной модели МПО, которая обеспечивает движение по определенным отрезкам оптимальной траектории с соответствующими граничными условиями.

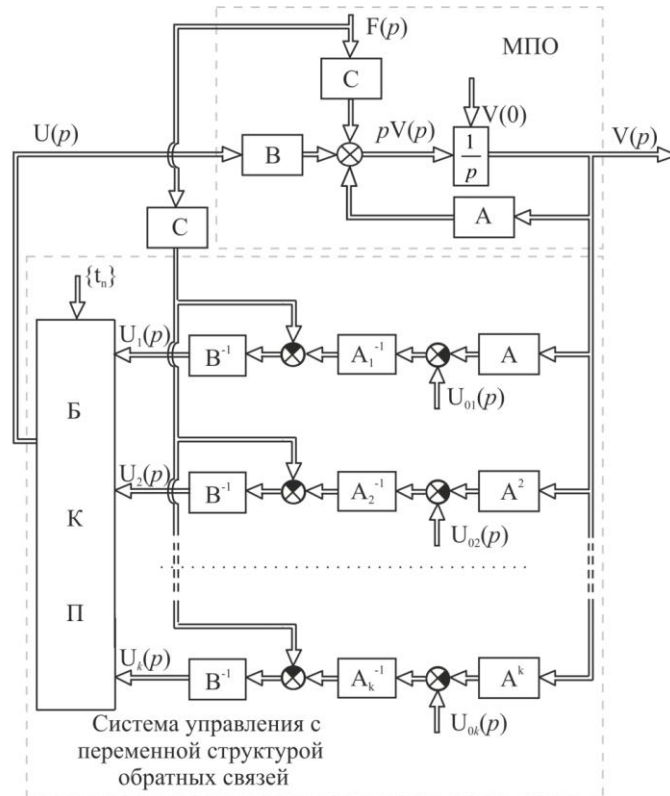


Рис. 2. Структурная схема системы управления с переменной структурой обратных связей

При решении практических задач динамического позиционирования необходимо компенсировать отклонение МПО от центра позиционирования за минимальный интервал времени. Переход

динамического объекта из начального отрезка на заданный отрезок траектории с учетом требований физической реализуемости управляющих воздействий описывается следующими уравнениями:

$$X(t_i^p) = X(t_{i-1}^p) + \dots + X^{(m-1)}(t_{i-1}^p) \frac{(t_i^p - t_{i-1}^p)^{m-1}}{(m-1)!} \pm X(t_{i-1}^p) \frac{(t_i^p - t_{i-1}^p)^m}{m!},$$

$$\dot{X}(t_i^p) = \dot{X}(t_{i-1}^p) + \dots + X^{(m-1)}(t_{i-1}^p) \frac{(t_i^p - t_{i-1}^p)^{m-2}}{(m-2)!} \pm X(t_{i-1}^p) \frac{(t_i^p - t_{i-1}^p)^{m-1}}{(m-1)!},$$

$$X^{(m-1)}(t_i^p) = X^{(m-1)}(t_{i-1}^p) \pm X^{(m)}(t_{i-1}^p)(t_i^p - t_{i-1}^p),$$

где $X(t_i^p)$ – вектор координат МПО; t_{i-1}^p – моменты переключения управляющих функций на i -ом отрезке траектории.

Формируя далее уравнения движения в виде (7) с учетом заданных граничных условий для координат МПО, а также используя выражения для управляющих функций вида (3-6), обеспечиваем процесс стабилизации МПО в

заданной области функционирования. Для заданных граничных условий и значений производных вектора координат объекта, определенных с учетом ограничений на управление вида (6), на основе решения систем алгебраических уравнений вида (7) разработаны алгоритмы формирования последовательностей моментов времени переключения управляющих функций в обратных связях объекта управления, включающие для

многомерной системы введение ведущих, субведущих и ведомых переменных [12].

Синтез робастного контура управления. Решение задачи робастного управления МПО в условиях неполной определенности базируется на использовании системы переменной структуры, которая формирует эталонную модель движения

объекта с учетом контролируемых внешних возмущений. Управляющий сигнал с эталонной модели поступает на вход реального МПО (рис. 3) и далее в контуре робастного управления формируется корректирующий сигнал на основе сравнения сигнала с выхода модели с сигналом на выходе физического объекта управления.

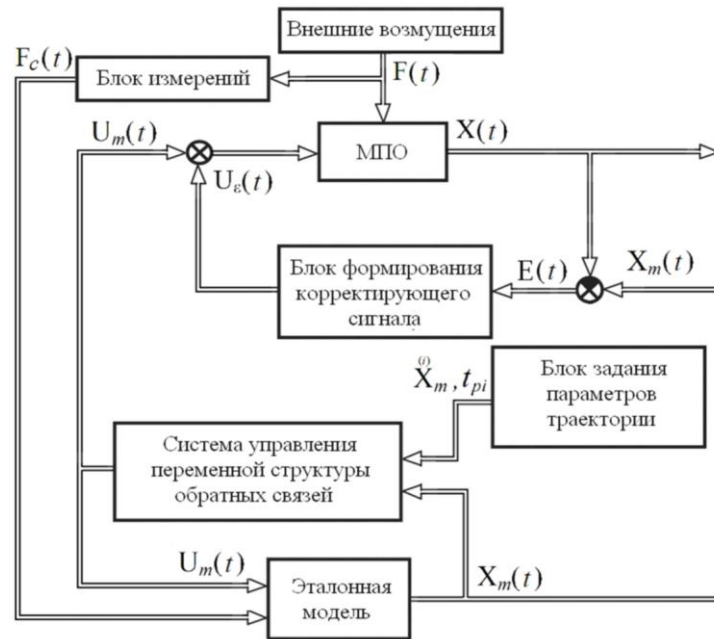


Рис. 3. Функциональная схема робастно-оптимальной системы управления МПО

Дифференциальное уравнение (1) с учётом робастного контура примет вид:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B[U_m(t) + U_k(t)] + CF(t). \quad (8)$$

Для эталонной модели запишем:

$$\dot{X}_m(t) = AX_m(t) + BU_m(t) + CF(t). \quad (9)$$

При определении корректирующего сигнала на основе линейных уравнений (8, 9) получим приближенное выражение для вектора ошибок $E(t)$

$$\dot{E}(t) \approx AE(t) - BU_k(t). \quad (10)$$

Зададим условия для обобщенной ошибки системы динамического позиционирования

$$\dot{E} + G_1 \dot{E} + G_2 E = 0, \quad (11)$$

где G_1, G_2 – матрицы весовых коэффициентов.

На основе (10, 11) получим зависимость корректирующего сигнала $U_k(p)$ от ошибки системы при условии $U_k(0) = 0$

$$U_k(p) = W_k(p) E(p),$$

где $W_k(p) = B^{-1}(pI + A + G_1)^{-1}(A^2 + AG_1 + G_2)$ – матричная передаточная функция.

Результаты имитационного моделирования процесса динамического позиционирования МПО в начале неподвижной системы координат (рис. 4-5) по продольным и поперечным, а также угловым перемещениям и скоростям демонстрируют переходные процессы с отклонением менее 3%, что обеспечивает требуемые показатели качества параметров технологического процесса позиционирования.

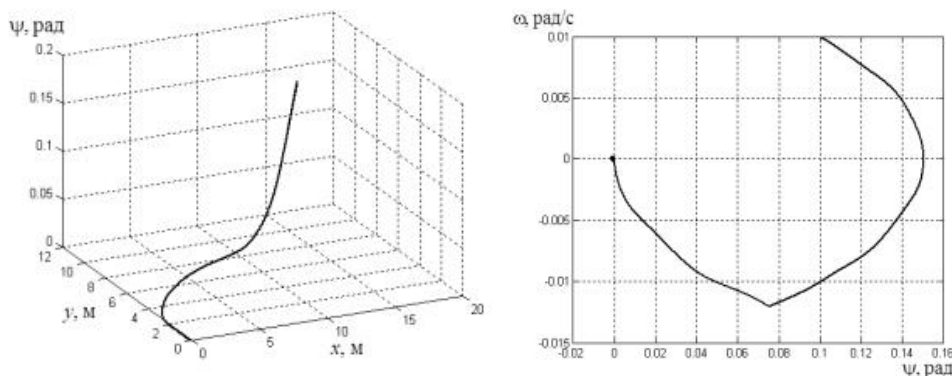


Рис. 4. Фазовые траектории позиционирования

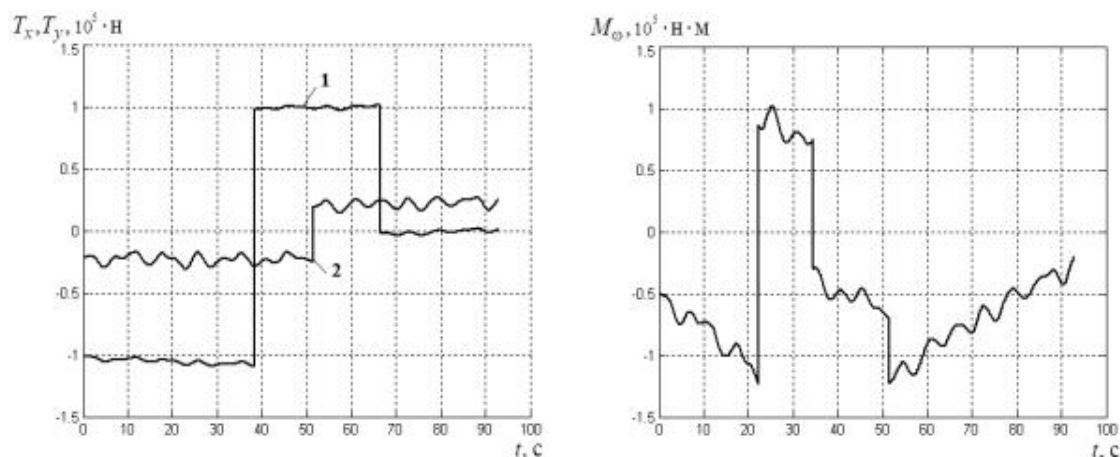


Рис. 5. Управляющие силы (1 – продольная; 2 – поперечная) и момент

Неконтролируемые внешние возмущения в виде нерегулярного морского волнения задавались соответствующим формирующим фильтром [8], параметрический шум при измерении выходных координат – гауссовым белым шумом соответствующей интенсивности.

Заключение. Предложена процедура синтеза на основе систем с переменной структурой обратных связей управляющих функций для многомерных систем, описывающих динамику МПО, которые реализуются с помощью специальных структур цепей обратных связей и позволяют решать задачи оптимизации процессов стабилизации для прямых условий оптимальности. Данный подход позволяет на основе баланса сил и моментов, действующих на объект, а также их производных формировать требуемые управляющие воздействия, а также определять моменты переключения управляющих воздействий в цепях обратных связей, которые обеспечивают выполнение критерия максимального быстродействия при ограничениях на управляющее воздействие. В условиях неполной информативности модели судна, обусловленной недостаточной априорной

информацией и действием неконтролируемых внешних возмущений, в состав системы вводится робастный контур, который позволяет синтезировать корректирующие воздействия на основе отклонения выходной управляемой координаты, и с учетом дополнительного эталонного сигнала управления обеспечить требуемый уровень инвариантности к внешним неконтролируемым возмущениям. Приведенные примеры моделирования демонстрируют эффективность подхода по показателям расхода энергии и значению ошибки управления, а также наличие фильтрующих свойств управления в цепях обратных связей при сравнительном анализе с рядом существующих методов управления. Полученные результаты могут быть положены в основу дальнейших разработок по созданию робастных судовых авторулевых, которые обеспечивают стабилизацию движения морских подвижных объектов на заданных траекториях в условиях ограниченных акваторий, а также систем динамического позиционирования МПО при выполнении технологических операций в открытом море.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кунцевич В. М. Синтез робастно – оптимальных систем управления нестационарными объектами при ограниченных возмущениях / В. М. Кунцевич // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 2. – С. 19–31.
2. Емельянов С. В. Новые типы обратной связи / С. В. Емельянов, С. К. Корвин. – М. : Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.
3. Крутько П. Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем высокой динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов / П. Д. Крутько // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2005. – № 2. – С. 120–140.
4. Ларин В. Б. Стабилизация системы обратной связью по выходной переменной / В. Б. Ларин // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 2. – С. 5–18.
5. Габасов Р. Реализация ограниченной обратной связи в нелинейной задаче регулирования / Р. Габасов, Ф. М. Кириллова, Е. А. Ружицкая // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – № 1. – С. 108–116.
6. Horowitz I. M. Survey of quantitative feedback theory (QFT) / I. M. Horowitz // Int. Journal of Robust and Non-Linear Control. – 2001. – Vol. 11. – № 10. – P. 887–921.
7. Ларин В. Б. Об обращении проблемы аналитического конструирования регуляторов / В. Б. Ларин // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 1. – С. 17–25.
8. Лукомский Ю. А. Системы управления морскими подвижными объектами / Ю. А. Лукомский, В. С. Чугунов. – Л. : Судостроение, 1988. – 272 с.
9. Perez T. Kinematic models for maneuvering and seakeeping of marine vessels / T. Perez, T. Fossen // J. Modeling, identification and control. – 2007. – Vol. 28. – No. 1. – P. 19–30.

10. 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.
11. Тимченко В. Л. Синтез систем переменной структуры для стабилизации судна при неполной управляемости / В. Л. Тимченко // Проблемы управления и информатики. – 2012. – № 3 – С. 73–84.
12. Тимченко В. Л. Робастно-оптимальная стабилизация морских подвижных объектов в режиме динамического позиционирования / В. Л. Тимченко, О. А. Ухин // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 13 (89) – С. 19–26.

© Тимченко В. Л., 2014

Дата надходження статті до редколегії 23.05.2014 р.

ТИМЧЕНКО Віктор Леонідович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління, Національний університет кораблебудування.

Коло наукових інтересів: керована динаміка морських рухомих об'єктів, робастно-оптимальні системи керування, автоматизовані системи управління рухом судна, суднові інформаційно-вимірювальні системи.