

ИНТЕРВАЛЫ РОБАСТНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМ ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В. Л. Тимченко, д-р техн. наук, доц.;
О. А. Ухин, асп.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрен синтез робастной системы управления морским подвижным объектом в условиях неопределенности на основе систем с переменной структурой обратных связей. В математической модели объекта управления учтены сигнальная и параметрическая неопределенности.

Ключевые слова: интервалы робастности, системы с переменной структурой обратных связей, моменты переключения.

Анотація. Розглянуто синтез робастної системи керування морським рухомим об'єктом в умовах невизначеності на основі систем зі змінною структурою зворотних зв'язків. У математичній моделі керування об'єкта враховані сигнальна та параметрична невизначеності.

Ключові слова: інтервали робастності, системи зі змінною структурою зворотних зв'язків, моменти перемикавання.

Abstract. The synthesis of the robust control system of maritime motion object in terms of uncertainty based on the systems with variable structure feedback has been considered. The signal and parametric uncertainties are taken into account in the mathematical model of control object.

Keywords: robustness intervals, systems with variable feedback structure, shift points.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Традиционные методы синтеза систем управления, основанные на предположении, что математическая модель объекта является известной и абсолютно точно описывает его поведение, объединяют под общим названием классической теории управления. Однако для современных подходов к постановке и решению задач управления характерен более критический взгляд на точность математических моделей, имеющихся в распоряжении разработчика, так как практически любая модель представляет собой идеализированное описание реального объекта. Кроме того, некоторые характеристики объекта могут быть заранее неизвестными или значительно изменяться в процессе его функционирования, что указывает на неопределенность математической модели объекта. Математическую модель, положенную в основу синтеза алгоритма управления, называют номинальной или эталонной [4]. В условиях существенной неопределенности классические методы теории управления оказываются неэффективными, поэтому необходимо применять специальные инженерные методы анализа и синтеза систем управления объектами с неопределенными математическими моделями.

Математические модели реальных объектов управления могут включать в себя следующие основные типы неопределенностей: параметрическую, сигнальную, функциональную и структурную. Данные типы неопределенностей негативно влияют на

процесс управления объектом, вследствие чего возникает задача синтеза системы управления, которая обеспечивала бы инвариантность к внешним факторам, влияющим на процесс управления объектом, а также к неопределенностям математической модели объекта.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ показал, что проблема построения робастной системы управления динамическим объектом рассматривалась в работах [4, 6] и других, авторы которых сформировали основные принципы построения робастных систем.

Так, в работе [1] исследуется робастный подход к задаче построения системы стабилизации бокового движения судна. В описанном подходе при расчете оптимальных управляющих воздействий требуется решать уравнение Риккати, что влечет за собой определенные вычислительные сложности из-за высокого порядка системы.

Модифицированный алгоритм высокого порядка для многосвязной системы, описанный в работе [5], позволяет снизить порядок замкнутой системы, однако в алгоритме используется ряд ограничений, что уменьшает область применения данного метода.

ЦЕЛЬЮ СТАТЬИ является построение и исследование робастной системы управления динамическим объектом на основе систем переменной структуры обратных связей, а также определение эффективности предложенного подхода.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В качестве объекта управления рассмотрим морской подвижный объект (МПО), а в качестве управляемого процесса – стабилизацию угловой скорости МПО, управляемого пером руля, в режиме малого маневрирования. Уравнение изменения угловой скорости без учета динамики рулевого привода примет следующий вид [3, 6]:

$$\ddot{\omega} + a_1\dot{\omega} + a_2\omega = b_1\dot{\alpha} + b_2\alpha, \quad (1)$$

где α – угол перекадки руля; ω – угловая скорость судна; a_1, a_2, b_1, b_2 – приведенные коэффициенты, заданные для конкретной модели судна.

Подставив численные значения коэффициентов для судна водоизмещением 5000 т, запишем уравнение (1) в виде

$$\ddot{\omega} + 0,084\dot{\omega} + 0,001\omega = 0,0063\dot{\alpha} + 0,0002\alpha.$$

Зададим граничные условия для угловой скорости с $\omega(0) = 0, \omega(T) = 5 \cdot 10^{-3}; \dot{\omega}(0) = 0, \dot{\omega}(T) = 0; \ddot{\omega}(0) = 2 \cdot 10^{-6}$ при нулевой производной $\ddot{\omega}$ ($\ddot{\omega} = \pm \text{const}$). Для обеспечения выполнения данных граничных условий формируется траектория стабилизации [8], состоящая из двух участков. Для движения по первому участку траектории уравнение изменения ω запишем в виде

$$\omega(t_p) = \omega(0) + \dot{\omega}(0)t_p + \ddot{\omega}(0)\frac{t_p^2}{2};$$

$$\dot{\omega}(t_p) = \dot{\omega}(0) + \ddot{\omega}(0)t_p,$$

а по второму участку –

$$\omega(T) = \omega(t_p) + \dot{\omega}(t_p)(T - t_p) - \ddot{\omega}(0)\frac{(T - t_p)^2}{2};$$

$$\dot{\omega}(T) = \dot{\omega}(t_p) - \ddot{\omega}(0)(T - t_p).$$

Приняв (1) как математическую модель эталонного объекта управления, в состав которой не входят неопре-

деленности, запишем выражение в операторной форме для управляющего воздействия эталонной системы:

$$\alpha_m(p) = \frac{-((a_1^2 - a_2)p + a_1a_2)\omega(p) + (a_1^2 - a_2)\omega_0 + (b_1p + (b_2 - a_1b_1))\alpha_0 + b_1\dot{\alpha}_0}{b_1p^2 + (b_2 - a_1b_1)p - a_1b_2} =$$

$$= \frac{-(605,6p + 8,4)\omega(p) + 605,6\omega_0 + (630p - 32,92)\alpha_0 + 630\dot{\alpha}_0}{630p^2 - 32,92p - 1,68},$$

для второго –

$$\alpha_m(p) = \frac{-((a_1^2 - a_2)p + a_1a_2)\omega(p) + (a_1^2 - a_2)\omega_{t_p} + (b_1p + (b_2 - a_1b_1))\alpha_{t_p} + b_1\dot{\alpha}_{t_p}}{b_1p^2 + (b_2 - a_1b_1)p - a_1b_2} =$$

$$= \frac{-(605,6p + 8,4)\omega(p) + 605,6\omega_{t_p} + (630p - 32,92)\alpha_{t_p} + 630\dot{\alpha}_{t_p}}{630p^2 - 32,92p - 1,68}.$$

Для обеспечения стабилизации угловой скорости МПО предлагается использование робастной системы управления на основе систем с переменной структурой обратных связей. В состав данной системы управления МПО в условиях неопределенности входит эталонная модель, выходной сигнал которой сравнивается с выходным сигналом реальной системы управления, в результате чего формируется ошибка системы [7, 9]. На базе данной ошибки вырабатывается корректирующий сигнал системы (рис. 1).

Управляющий сигнал реальной системы представляет собой сумму управляющего сигнала эталонной системы и корректирующего сигнала [2]:

$$\alpha(p) = \alpha_m(p) + \alpha_k(p).$$

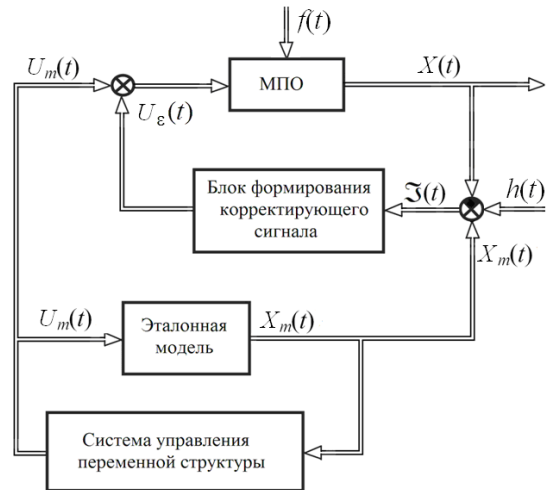


Рис. 1. Функциональная схема робастной системы управления

Предлагается в момент переключения изменять не управляющее воздействие, а его производную. Это позволяет избежать появления разрывов функции управляющего сигнала, так как разрыв ведет за собой появление сингулярных процессов внутри системы из-за резкого изменения значения управляющего сигнала.

Для учета в математической модели реального объекта сигнальных и параметрических неопределенностей примем приближенное уравнение для ошибки

$$\ddot{\varepsilon}(t) + 0,084\dot{\varepsilon}(t) + 0,001\varepsilon(t) \approx -0,0063\dot{\alpha}_k(t) - 0,0002\alpha_k(t). \quad (2)$$

Зададим условия для обобщенной ошибки системы стабилизации:

$$\ddot{\varepsilon} + \gamma_1\dot{\varepsilon} + \gamma_2\varepsilon = 0, \quad (3)$$

и на основе (2), (3) получим выражение для корректирующего сигнала управления, применяя преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях:

$$\alpha_k(p) = \frac{(\gamma_1 - 0,084)p + (\gamma_2 - 0,001)}{0,0063p + 0,0002} \varepsilon(p),$$

где γ_1, γ_2 – весовые коэффициенты, которые подстраиваются в процессе моделирования.

Исходя из полученных управляющих воздействий, формируется робастная система управления (рис. 2).

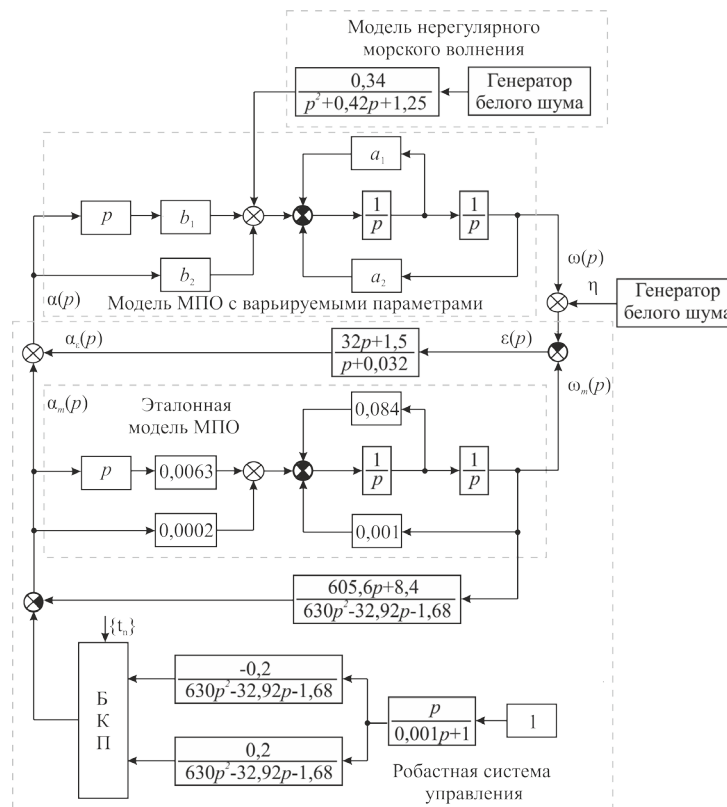


Рис. 2. Структурная схема робастной системы управления

В качестве сигнальных неопределенностей примем нерегулярное морское волнение (рис. 3), действующее на МПО, а также белый шум в выходном канале системы управления. Задав значения параметров a_1 и a_2 объекта управления отличными от номинальных, учтем параметрическую неопределенность.

Управляющие воздействия, компенсирующие влияние неопределенностей на процесс управления МПО, представлены на рис. 4 и 5.

Моделирование работы робастной системы управления показало, что угловая скорость и ее первая производная были переведены в заданные граничные условия за заданное время (рис. 6, a, θ), а траектории изменения координат отвечают требуемым показателям качества управления.

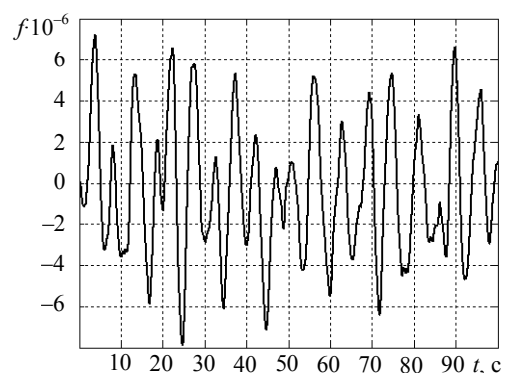


Рис. 3. Волновое возмущение, действующее на морской подвижный объект

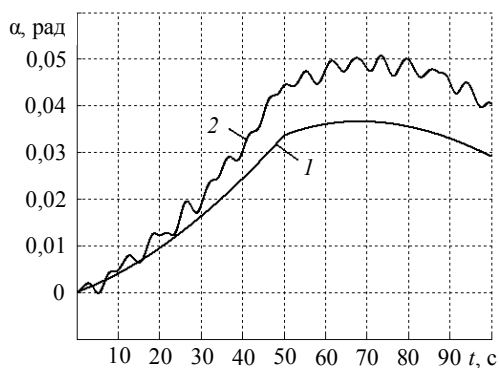


Рис. 4. Управляющие сигналы: 1 – эталонной системы; 2 – робастной системы

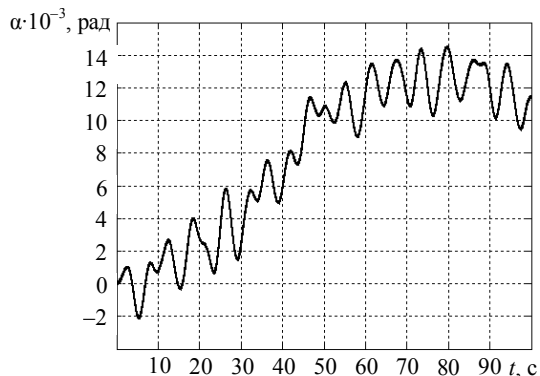


Рис. 5. Корректирующий сигнал управления

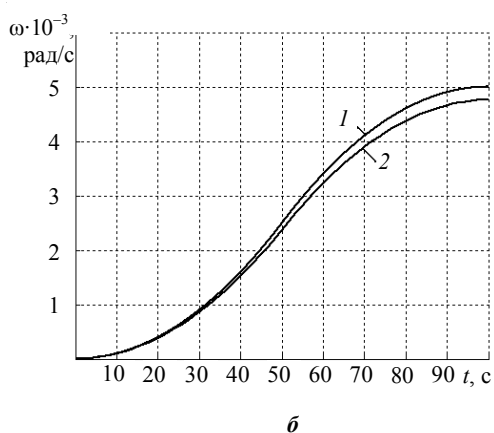
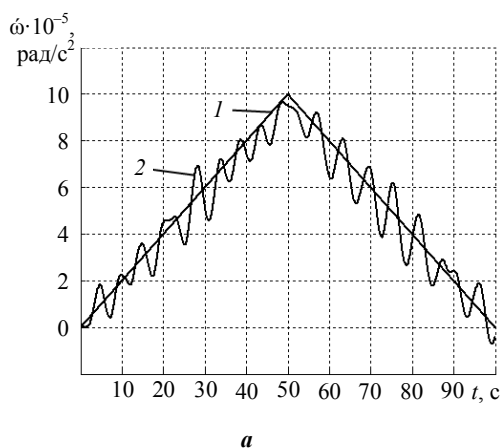


Рис. 6. Угловое ускорение (а) и угловая скорость (б) МПО при управлении системой: 1 – эталонной; 2 – робастной

На рис. 6 показано, что система инвариантна к волновым возмущениям, а также обладает фильтрующими свойствами, что позволяет избежать неточностей в управлении, вызванными присутствующим в системе шумом.

При моделировании системы параметры МПО изменялись в различных диапазонах и направлениях

(в сторону увеличения или уменьшения). На рис. 7 видно, что показатели качества системы являются удовлетворительными: ошибка системы меньше 5 % при изменении параметров a_1 и a_2 объекта управления до 33 % от номинальных значений. Это полностью удовлетворяет степени изученности и адекватности модели МПО.

ВЫВОДЫ

Сформирована процедура синтеза робастной системы управления на основе систем с переменной структурой обратных связей, которая включает в свой состав эталонную модель МПО, а также дополнительный канал управления, который формирует корректирующее воздействие на основе ошибки выходной управляемой координаты. Усовершенствован подход к формированию начальных значений управляющих воздействий робастной системы в момент переключения управления, путем изменения не управляющего воздействия, а его производной, что позволяет избежать появления сингулярных про-

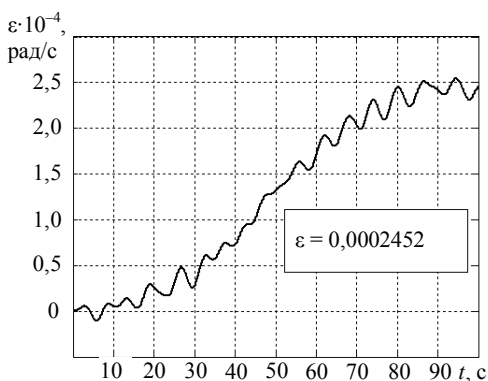


Рис. 7. График изменения ошибки выходной координаты

цессов внутри системы из-за резкого изменения значения управляющего сигнала. Предложенная робастная система управления инвариантна к сигнальным неопределенностям (неизмеримые внешние возмущения, шумы в каналах системы управления), входящим в состав математической модели объекта управления. Интервалы робастности данной системы для параметрических неопределенностей составили приблизительно $\pm 33\%$ от номинальных значений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Кабанов, А. А.** Робастная стабилизация бокового движения судна на воздушной подушке [Текст] / А. А. Кабанов // Вестник СевНТУ. – Севастополь. – 2012. – № 125/2012 – С. 179–185.
- [2] **Кунцевич, В. М.** Системы экстремального управления [Текст] / В. М. Кунцевич. – К. : Гостехиздат УССР, 1961. – 150 с.
- [3] **Лукомский, Ю. А.** Системы управления морскими подвижными объектами [Текст] / Ю. А. Лукомский, В. С. Чугунов. – Л. : Судостроение, 1988. – 272 с.
- [4] **Никифоров, В. О.** Интеллектуальное управление в условиях неопределенности [Текст] / В. О. Никифоров, О. В. Слита, А. В. Ушаков. – Санкт-Петербург, 2011. – 252 с.
- [5] **Паршева, Е. А.** Адаптивное робастное управление по выходу нелинейным многосвязным объектом [Текст] / Е. А. Паршева // Вестник АГТУ. – 2006. – № 1. – С. 49–59.
- [6] **Першиц, Р. Я.** Управляемость и управление судном [Текст] / Р. Я. Першиц. – Л. : Судостроение, 1983. – 272 с.
- [7] **Тимченко, В. Л.** Робастная стабилизация морских подвижных объектов на основе систем с переменной структурой обратных связей [Текст] / В. Л. Тимченко, Ю. П. Кондратенко // Проблемы управления и информатики : междунар. науч.-техн. журнал. – К., 2011. – № 3. – С. 79–92.
- [8] **Тимченко, В. Л.** Системы с переменной структурой обратных связей для оптимальной стабилизации подвижных объектов [Текст] / В. Л. Тимченко, Ю. П. Кондратенко // Электротехнические и компьютерные системы. – К. : Техника, 2011. – № 2 (78). – С. 35–41.
- [9] **Тимченко, В. Л.** Синтез систем переменной структуры для стабилизации судна при неполной управляемости [Текст] / В. Л. Тимченко // Проблемы управления и информатики. – К., 2012. – № 3. – С. 73–84.

© В. Л. Тимченко, О. О. Ухін

Надійшла до редколегії 14.05.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов