

УДК 681.5.013

В. Л. Тимченко, д-р техн. наук,

О. А. Ухин, аспирант

РОБАСТНО–ОПТИМАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ МОРСКИХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

***Аннотация.** Рассмотрено решение проблемы повышения уровня и качества автоматизации процессов управления морскими подвижными объектами на основе робастно–оптимальных систем с переменной структурой обратных связей в условиях неопределенности. Синтезирован робастный контур с использованием дополнительного сигнала управления, формируемого эталонной системой управления, что обеспечивает минимальные значения ошибок и затрат энергии.*

***Ключевые слова:** морские подвижные объекты, динамическое позиционирование, робастно-оптимальные системы, переменная структура, обратные связи*

V. L. Timchenko, ScD.,

O. A. Ukhin, postgraduate

ROBUST–OPTIMAL STABILIZATION OF MARINE MOTION OBJECTS IN THE DYNAMIC POSITIONING MODE

***Abstract.** The solution of the problem of improving the level and quality of control processes automation of marine movable objects based on robust-optimal systems with variable feedback structure in conditions of uncertainty is considered. Robust circuit with an additional control signal generated by reference control system that provides the minimum error value and energy expenditure is synthesized.*

***Keywords:** dynamic positioning of marine motion objects, robust-optimal systems, variable feedback structure*

В. Л. Тимченко, д-р техн. наук,

О. О. Ухін, аспірант

РОБАСТНО–ОПТИМАЛЬНА СТАБІЛІЗАЦІЯ МОРСЬКИХ РУХОМИХ ОБ’ЄКТІВ У РЕЖИМІ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

***Анотація.** Розглянуто рішення проблеми підвищення рівня та якості автоматизації процесів керування морськими рухомими об’єктами на основі робастно–оптимальних систем зі змінною структурою зворотних зв’язків в умовах невизначеності. Синтезовано робастний контур із використанням додаткового сигналу керування, який формується еталонною системою керування, що забезпечує мінімальні значення похибок та витрат енергії.*

***Ключові слова:** морські рухомі об’єкти, динамічне позиціонування, робастно–оптимальні системи, змінна структура, зворотні зв’язки*

Постановка проблемы. Интенсивное освоение подводного шельфа мирового океана, а также сложность и разнообразие выполняемых технологических задач морскими подвижными объектами (МПО) 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 исследованы учеными достаточно глубоко. В то же время анализ, например, принципов синтеза авторулевых демонстрирует широкое практическое применение пропорцио-

нально–интегрально–дифференциальных (ПИД) регуляторов на различных судах, несмотря на их известные недостатки с точки зрения сложности настройки параметров, затрат энергии, чувствительности к влиянию параметрических шумов. Исходя из вышесказанного, следует, что необходимо проведение дополнительных научных исследований в данной области. Для усовершенствования существующих систем динамического позиционирования и маневрирования также актуальны требования повышения быстродействия системы, энергетической экономичности, времени продолжительности рабочего функционирования и точности управления с учетом действия значительных контролируемых и неконтролируемых внешних возмущений в открытом море.

© Тимченко В.Л., Ухин О.А., 2014

Управление 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 является фундаментальным элементом для создания эффективных и прикладных алгоритмов управления. [2, 12].

Обеспечение точного позиционирования МПО и движения по безопасным траекториям в условиях значительной неопределенности базируется на модернизации и практической реализации управления на основе робастно-оптимальных систем, которые обеспечивают решение задач оптимального и субоптимального управления при выполнении соответствующих технологических работ в режиме реального времени [4]. 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 быстродействия системы, затрат энергии и ошибок управления при достаточном уровне инвариантности к неопределенности объектов и внешней среды [2, 3].

Решение первой задачи робастно-оптимального управления – синтеза оптимального управления – при использовании классических методов обладает основной и принципиальной трудностью, которой является вычислительная сложность решения краевых задач для синтеза программного управления и матричных уравнений Риккати при построении оптимального регулятора с учетом многомерности математической модели МПО. Формирование оптимального управления на основе квадратичных критериев требует формализации матриц весовых коэффициентов, которая не всегда может быть определена корректно или нуждается в выполнении дополнительных процедур вычислений [5]. Необходимость решения второй задачи робастно-оптимального управления обусловлена неполной априорной ин-

формацией о динамической модели МПО и внешней среде. Применение в условиях неопределенности «скользящих» режимов требует повышенных затрат энергии и частых переключений, что может приводить к снижению работоспособности. Одним из эффективных путей реализации робастных алгоритмов, который не требует значительных вычислений, есть синтез с использованием эталонной математической модели объекта управления.

Анализ многолетней статистики эксплуатации морского транспорта позволил определить основные функциональные задачи управления МПО:

- стабилизацию маневрирующих судов с винто-рулевым пропульсивным 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;

- стабилизацию МПО в режиме динамического позиционирования 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.

Цель статьи. Решение проблемы повышения уровня и качества автоматизации процессов управления МПО на основе робастно-оптимальных систем с переменной структурой обратных связей в условиях неопределенности динамических моделей МПО и окружающей среды.

Изложение основного материала. Рассмотрим порядок синтеза управляющих функций для наиболее общей задачи стабилизации МПО 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.

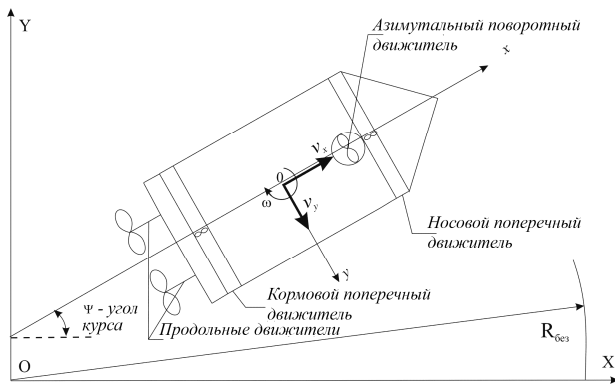


Рис. 1. Морской подвижный объект с динамическим позиционированием

Необходимо отметить, что высокие требования к точности динамического позиционирования предполагают конструктивные решения компоновки движителей МПО, обеспечивающих создание управляющего усилия по каждой управляемой координате [6]. Это позволяет описать динамику МПО (без учета реакции технологического инструмента) в горизонтальной плоскости системой 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 [6, 13]

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

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 внешних сил и момента;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13}v_y \\ a_{21}\omega & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32}v_x & a_{33} \end{bmatrix} \text{ – матрица координат и параметров;}$$

динат и параметров;

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix} \text{ –}$$

матрицы коэффициентов.

Динамические модели стабилизации МПО на заданных траекториях в заданной (безопасной) области динамического позиционирования предполагают малые (допустимые) отклонения объекта управления от заданной траектории для обеспечения безаварийного рабочего функционирования МПО. При малых колебаниях МПО квазилинеаризация нелинейных динамических моделей и элементов системы стабилизации позволяет получить аналитические решения, которые описывают динамическое поведение системы в реальном времени функционирования и исследовать качественные характеристики движения динамической системы.

Замкнутую систему управления МПО в балансировочном режиме [6, 8] с линейной обратной связью вида $\mathbf{U}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{V}(t)$ при значительном, в сравнении с запаздыванием управляющего устройства временем изменения управляемых координат [7], можно представить в виде

$$\dot{\mathbf{V}}(t) = [\mathbf{A}(\mathbf{V}) - \mathbf{B}\mathbf{K}]\mathbf{V}(t) = \bar{\mathbf{A}}(\mathbf{V})\mathbf{V}(t), \quad (2)$$

где \mathbf{K} – матрица коэффициентов усиления, $\bar{\mathbf{A}}(\mathbf{V}) = \mathbf{A}(\mathbf{V}) - \mathbf{B}\mathbf{K}$.

При линеаризации разложением в ряд Тейлора уравнения (2) запишем линейное векторно-матричное уравнение

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}(t) &\approx \bar{\mathbf{A}}(\mathbf{V}(0))\mathbf{V}(0) + \\ &+ \left[\frac{d\bar{\mathbf{A}}(\mathbf{V}(t))\mathbf{V}(t)}{d\mathbf{V}^T(t)} \right]_{\mathbf{V}(0)} [\mathbf{V}(t) - \mathbf{V}(0)] = \quad (3) \\ &= \mathbf{R}\mathbf{V}(t) + \bar{\mathbf{R}}, \end{aligned}$$

где вектор $\bar{\mathbf{R}} = [\bar{\mathbf{A}}(\mathbf{V}(0)) - \mathbf{R}]\mathbf{V}(0)$; матрица $\mathbf{R} = \left[\frac{d\bar{\mathbf{A}}(\mathbf{V}(t))\mathbf{V}(t)}{d\mathbf{V}^T(t)} \right]_{\mathbf{V}(0)}$ (матрица Якоби [1]).

Решение дифференциального уравнения (3) на основе соответствующих векторно-матричных преобразований [1] находим следующим образом [8]

$$\dot{U}(t) = -B^{-1}[\bar{A}BU(t) - (\dot{\bar{A}} + \bar{A}^2)V(t)]. \quad (7)$$

Для условия $\ddot{V}(t) = 0$ получим для вектора управления выражение

$$\begin{aligned} \ddot{U}(t) = & -B^{-1}\{\bar{A}^3(t) + \bar{A}(t)\dot{\bar{A}}(t) + \\ & + 2\dot{\bar{A}}(t)\bar{A}(t) + \ddot{\bar{A}}(t)\}V(t) + \bar{A}(t)B\dot{U}(t) + \\ & + [\bar{A}^2(t)B + 2\dot{\bar{A}}(t)B]U(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, уравнения (7 и 8) формируют управление для движения по соответствующим отрезкам траекторий с нулевыми значениями вектора координат $\dot{V}(t) = 0$ и $\ddot{V}(t) = 0$, определяют баланс приведенных сил (моментов) управления и демпфирования, которые, собственно, обеспечивают заданную траекторию объекта.

С учетом заданных ограничений на управляющее воздействие (8) максимальными, физически реализуемыми начальными значениями управляющих функций, максимальное начальное значение второй производной вектора координат состояния МПО будет иметь вид

$$\begin{aligned} \ddot{V}_{\max}(0) = & (\dot{\bar{A}} + \bar{A}^2)V(0) + \\ & + ABU_{\max}(0) + B\dot{U}_{\max}(0). \end{aligned} \quad (9)$$

Структурная схема управления нестационарной системой с использованием дополнительных интеграторов представлена на рис. 2.

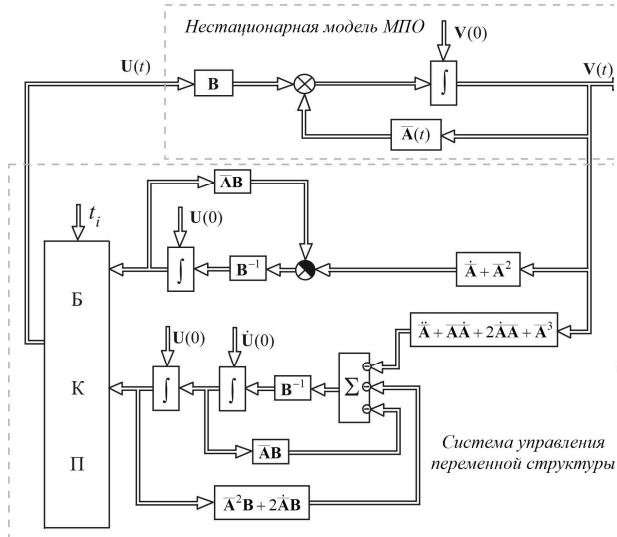


Рис. 2. Структурная схема управления нестационарным объектом

Формируя далее уравнения движения в виде (6) с учетом заданных граничных условий для координат МПО, а также используя

выражения для управляющих функций вида (7 и 8), обеспечиваем процесс стабилизации МПО в заданной области функционирования. Для заданных граничных условий и значений производных вектора координат объекта, определенных с учетом ограничений на управление (9), на основе решения систем алгебраических уравнений (6) разработаны алгоритмы, включающие для многомерной системы введение ведущих, субведущих и ведомых переменных, формирования последовательностей моментов переключения управляющих функций в обратных связях объекта 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 физического МПО (рис. 3) и далее в контуре робастного управления формируется корректирующий сигнал на основе сравнения сигнала с выхода модели с сигналом на выходе объекта управления.

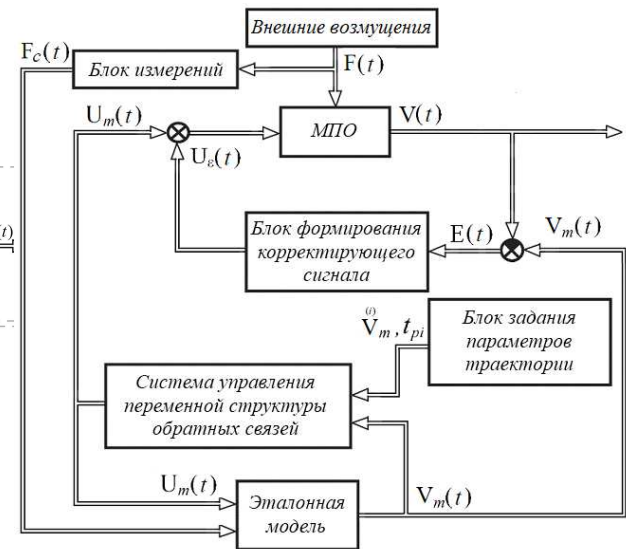


Рис. 3. Функциональная схема робастно-оптимальной системы управления МПО

Дифференциальное уравнение (5) с учетом робастного контура примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \bar{A}(t)V(t) + B[U_m(t) + \\ & + U_k(t)] + CF(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Для эталонной модели запишем:

$$\dot{\mathbf{V}}_m(t) = \bar{\mathbf{A}}(t)\mathbf{V}_m(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}_m(t) + \mathbf{C}\mathbf{F}(t). \quad (11)$$

При определении корректирующего сигнала на основе линейных уравнений (10, 11) получим приближенное выражение для вектора ошибок $\mathbf{E}(t)$

$$\dot{\mathbf{E}}(t) \approx \bar{\mathbf{A}}(t)\mathbf{E}(t) - \mathbf{B}\mathbf{U}_k(t). \quad (12)$$

Зададим условия для обобщенной ошибки системы динамического позиционирования

$$\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{G}_1\mathbf{E} = 0, \quad (13)$$

где \mathbf{G}_1 – матрица весовых коэффициентов.

На основе (12, 13) получим зависимость корректирующего сигнала $\mathbf{U}_k(t)$ от ошибки системы

$$\mathbf{U}_k(t) = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A} + \mathbf{G}_1)^{-1}\mathbf{E}(t).$$

Для апробации предложенных систем управления рассмотрено имитационное моделирование процесса динамического позиционирования МПО в начале неподвижной системы координат по линейным и угловому перемещениям и скоростям движения (рассматриваются траектории при нулевой второй производной вектора координат), обеспечивающие переходные процессы с отклонением менее 3 % (рис. 4). Неконтролируемые внешние возмущения в виде нерегулярного морского волнения задавались соответствующим формирующим фильтром [6], параметрический шум при измерении выходных координат – гауссовым белым шумом соответствующей интенсивности. Неопределенность модели физического объекта по отношению к математической модели МПО задавалась варьированием параметров (расогласованием на +15 %).

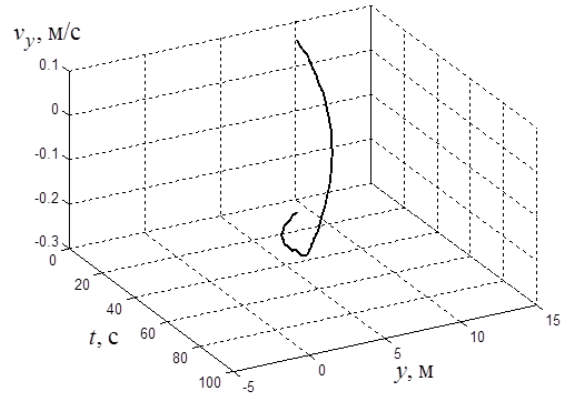
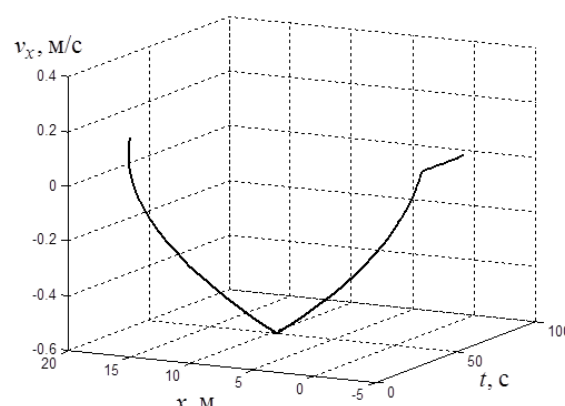
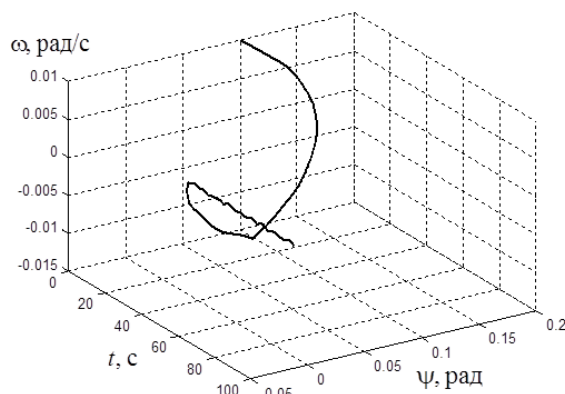
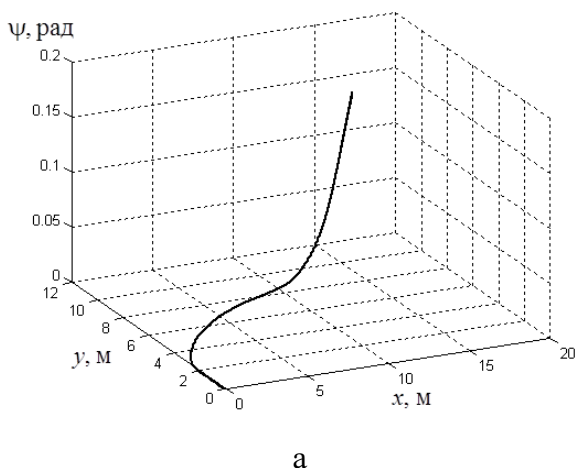


Рис. 4. Графики изменения управляемых координат (а) и фазовых траекторий (б, в, г)

Выводы. 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 движения. 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 управлений в цепях обратных связей для позиционирования МПО на оптимальных траекториях с учетом ограничений на управление.

В условиях неполной информативности модели МПО, обусловленной недостаточной априорной информацией и действием неконтролируемых внешних возмущений, в состав системы вводится робастный контур, который позволяет синтезировать корректирующие воздействия на основе отклонений выходных управляемых координат, и с учетом дополнительного эталонного сигнала управления обеспечить требуемый уровень инвариантности к внешним неконтролируемым возмущениям и неопределенности модели. 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.

Список использованной литературы

1. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц [Текст] / Ф. Р. Гантмахер – М. : Наука, 1967. – 576 с.
2. Емельянов С. В. Новые типы обратной связи / С. В. Емельянов, С. К. Коровин. – 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. К. : – 2005. – № 2. – С. 120 – 140.

4. Кунцевич В. М. Синтез робастно-оптимальных систем управления нестационарными объектами при ограниченных возмущениях / В. М. Кунцевич // Проблемы управления и информатики. – К. : – 2004. – № 2. – С. 19 – 31.

5. Ларин В. Б. Об обращении проблемы аналитического конструирования регуляторов / В. Б. Ларин // Проблемы управления и информатики. К. : – 2004. – № 1. – С. 17 – 25.

6. Лукомский Ю. А. Системы управления морскими подвижными объектами / Ю. А. Лукомский, В. С. Чугунов – Л. : Судостроение, 1988. – 272 с.

7. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном [Текст] / Р. Я. Першиц. – Л. : Судостроение, 1983. – 272 с.

8. Солодов А. В. Линейные автоматические системы с переменными параметрами [Текст] / А. В. Солодов, Ф. С. Петров. – М. : Наука, 1971. – 620 с.

9. 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. – К. : 2011. – № 3 – С. 79 – 92.

10. Тимченко В. Л. Синтез систем переменной структуры для стабилизации судна при неполной управляемости / В. Л. Тимченко // Проблемы управления и информатики. – К. : 2012. – № 3 – С. 73 – 84.

11. 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. – № 02 (78). – С. 35 – 41.

12. Horowitz I. M. Survey of Quantitative Feedback theory (QFT) / I. M. Horowitz // *Int. Journal of Robust and Non-Linear Control*. – 2001. – Vol.11. – No. 10. – P. 887 – 921.

13. 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.

Получено 05.03.2014

References

1. Gantmacher F.R. Teorija Matric [Matrix Theory], (1967), *Science Publ*, Moscow, Russian Federation, 576 p. (In Russian).
2. Yemelianov S.V., and Korovin S.K. Nove typy obratnoj svjazi [New Types of Feedback], (1997), *Science. Phismatlit. Publ*, Moscow, Russian Federation, 352 p. (In Russian).
3. Krutko P.D. Robastno ustojchivye struktury upravljaemyh sistem vysokoj dinamicheskoj tochnosti. Algoritmy i dinamika upravlenija dvizheniem model'nyh ob'ektov [Robustly Stable Structures of Control Systems of high Dynamic Accuracy. Algorithms and Dynamics of Movement Control of Model Objects], (2005), *Teoria i Sistemi Upravlenia. Izv. RAN Publ.*, Vol 2, pp. 120 – 140 (In Russian).
4. Kountsevich V.M. Sintez robastno-optimal'nyh sistem upravlenija nestacionarnymi obektami pri ogranichennyh vozmushhenijah [Synthesis of Robust-optimal Control Systems of Non-stationary Objects with Bounded Disturbances], (2004), *Problemi Upravleniya i Informatiki Publ.*, Kiev, Ukraine, Vol. 2, pp. 19 – 31 (In Russian).
5. Larin V.B. Ob obrashhenii problemy analiticheskogo konstruirovaniya reguljatorov [Handling the Problem of Analytical Design of Rregulators], (2004), *Problemi Upravleniya i Informatiki Publ.*, Kiev, Ukraine, Vol. 1, pp. 17 – 25 (In Russian).
6. Lukomskii Y.A., and Chugunov V.S. Sistemy upravlenija morskimi podvizhnymi obektami [Control Systems of Marine Motion Objects], (1988), *Sudostroenie Publ*, Saint-Petersburg, Russian Federation, 272 p. (In Russian).
7. Pershic R.Y. Upravljaemost' i upravlenie sudnom [Controllability and Control of the Vessel], (1983), *Sudostroenie Publ*, Saint-Petersburg, Russian Federation, 272 p. (In Russian).
8. Solodov A.V., and Petrov P.S. Linejnye avtomaticheskie sistemy s peremennymi parametrami [Linear Automatic Systems with Variable Parameters], (1971), *Science Publ*, Moscow, Russian Federation, 620 p. (In Russian).
9. Timchenko V.L., and Kondratenko Y.P. Robastnaja stabilizacija morskikh podvizhnyh obektov na osnove sistem s peremennoj strukturoj obratnyh svjazej [Robust Stabilization of Marine Mobile Objects on the Basis of System with Variable Structure of Feedbacks], (2011), *Problemi Upravleniya i Informatiki Publ.*, Kiev, Ukraine, Vol. 3, pp. 79 – 92. (In Russian)
10. Timchenko V.L. Sintez sistem peremennoj struktury dlja stabilizacii sudna pri nepolnoj upravljaemosti [Synthesis of Variable Structure Systems for Stabilization of Ship at Incomplete Controllability], (2012), *Problemi Upravleniya i Informatiki Publ.*, Kiev, Ukraine, Vol. 3, pp. 73–84. (In Russian).
11. Timchenko V.L., and Kondratenko Y.P. Sistemy s peremennoj strukturoj obratnyh svjazej dlja optimal'noj stabilizacii podvizhnyh ob'ektov [Systems with Variable Structure of Feedbacks for Optimal Stabilization of Movable Objects], (2011), *Journal Electrotechnic and Computer Systems Publ., Tehnika*, Kiev, Ukraine, Vol. 02(78), pp. 35 – 41 (In Russian).
12. Horowitz I.M. Survey of Quantitative Feedback theory (QFT), (2001), *Int. Journal of Robust and Non-Linear Control*, Vol. 11, No. 10, pp. 887 – 921.
13. Perez T., and Fossen T. Kinematic Models for Maneuvering and Seakeeping of Marine Vessels, (2007), *Journal Modeling, Identification and Control Publ.*, Vol. 28, No.1, pp. 19 – 30.



Тимченко Виктор Леонидович,
д.т.н., доцент,
проф., каф. морского приборостроения Нац. ун-та кораблестроения имени адмирала Макарова,
54003, Николаев, ул. Дзержинского 24, кв. 38,
тел: +38(063)3130676
E-mail: vl_timchenko@mail.ru,



Ухин Олег Александрович,
аспирант Нац. ун-та кораблестроения имени адмирала Макарова,
54058, Николаев, ул. Кр. Маевщиков 19, кв 73,
тел: +38(093)7299152
E-mail:
olegukhin@hotmail.com,