

УДК 629.5.061

А.В. Маттис

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МОРСКОГО ПОДВИЖНОГО КОМПЛЕКСА

Маттис Алексей Валерьевич, окончил машиностроительный факультет Ульяновского государственного технического университета по специальности «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств». Заместитель главного конструктора ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет публикации в области моделирования и разработки АСУ. [e-mail: mars@mv.ru].

Аннотация

Проводится сравнительное исследование алгоритмов совместного и раздельного оценивания параметров и управления движением морского подвижного комплекса (МПК) при его следовании по заданной прямолинейной траектории. Приводятся результаты численного моделирования на ЭВМ.

Ключевые слова: моделирование, оптимальное управление, система автоматического управления движением (САУД), совместное управление движением, судно, подводный аппарат.

Abstract

The article gives a comparative study of algorithms of joint and separate evaluation of parameters and control of movement of a sea-going mobile complex when it goes as per a given straight trajectory. It also gives the results of the computational modeling using computers.

Key words: modeling, optimal control, automatic movement-control system, joint control of movement, vessel, underwater vehicle.

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве существующих систем автоматического управления движением морских подвижных комплексов, состоящих из надводного судна и необитаемого подводного аппарата (НПА), осуществляется раздельное оценивание параметров движения судна и НПА [1–4]. При этом информация о курсе φ_s и угловой скорости ω_s с инерциальной навигационной системы (ИНС), координатах x_s, z_s и составляющих скорости V_{xs}, V_{zs} с приемоиндикатора спутниковой навигационной системы (СНС) поступает в контур обработки навигационной информации судна, где с использованием фильтра Калмана (ФК) осуществляется оценка вектора параметров движения судна \hat{x}_s (рис. 1, а). Аналогичная схема используется для оценки вектора параметров движения НПА \hat{x}_a . При этом абсолютные координаты НПА x_a, z_a определяются косвенно по информации о координатах судна x_s, z_s с приемоиндикатора СНС и относительном положении НПА $\Delta x_a, \Delta z_a$ по данным гидроакустической навигационной станции (ГАНС). Информация об абсолютной скорости НПА V_{xa}, V_{za} поступает с гидроакустического лага (ГАЛ).

В работах [5–7] отмечается, что оптимальные оценки вектора параметров движения судна \hat{x}_s и НПА \hat{x}_a должны находиться с помощью общего алгоритма оптимальной фильтрации (рис. 1, б), так как наблюдения абсолютных координат НПА, получаемые с помощью СНС и ГАНС, включают как элементы вектора состояния судна (x_s, z_s), так и координаты НПА ($\Delta x_a, \Delta z_a$).

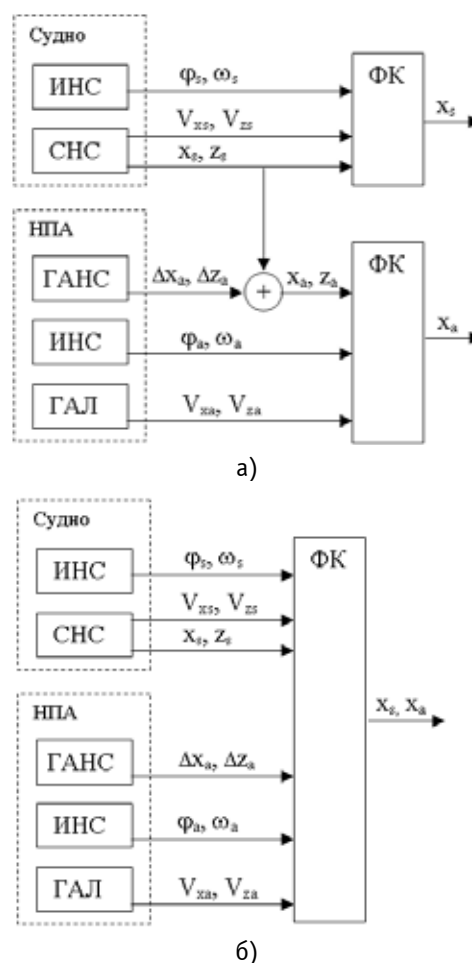


Рис. 1. Схемы алгоритмов раздельного (а) и совместного (б) оценивания параметров движения МПК

Исследование оптимальных алгоритмов раздельного и совместного оценивания и управления движением МПК, приведенных в [5], в реальных условиях представляет собой довольно сложную задачу. В связи с этим целесообразно выполнить математическое моделирование разработанных алгоритмов на ЭВМ с целью сравнения их эффективности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МОРСКОГО ПОДВИЖНОГО КОМПЛЕКСА

Моделирование движения судна осуществлялось с использованием стохастической модели движения в базовой системе координат (СК) [5]:

$$\bar{x}_{si} = F_{s(i-1)} \cdot \bar{x}_{s(i-1)} + B_{s(i-1)} \cdot \bar{u}_{s(i-1)} + \xi_{gs(i-1)},$$

$$i = i_0, i_0 + 1, \dots, i_N,$$

где $F_{s(i-1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\omega_s \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_s \cdot \Delta t & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$

$$B_{s(i-1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{\cos(\varphi_s) \cdot dt}{m_x} & \frac{-\sin(\varphi_s) \cdot dt}{m_z} & 0 \\ \frac{\sin(\varphi_s) \cdot dt}{m_x} & \frac{\cos(\varphi_s) \cdot dt}{m_z} & 0 \\ 0 & 0 & dt/J_y \end{pmatrix},$$

$$\xi_{gs(i-1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \xi_{V_s(i-1)} \cos \varphi_s \\ -\xi_{V_s(i-1)} \sin \varphi_s \\ \xi_{\omega_s(i-1)} \end{pmatrix},$$

$\bar{x}_s = (x_s \ z_s \ \varphi_s \ V_{xg_s} \ V_{zg_s} \ \omega_s)^T$ – вектор параметров движения; $\bar{u}_{s(i-1)}$ – вектор управления, $\bar{\xi}_{gs(i-1)}$ – последовательность гауссовских независимых векторов в базовой СК; $\xi_{V_{xs}(i-1)}$ – случайные воздействия на судно вдоль оси OX , связанной СК; $\xi_{\omega_s(i-1)}$ – случайная составляющая момента, вызванная ветро-волновыми воздействиями. Аналогичные формулы с заменой индекса «s» на «a» использовались для моделирования движения НПА.

Исследовался режим равномерного прямолинейного движения с начальными параметрами $\varphi_s = 15^\circ, V_s = 2$ м/с, $V_{zs} = 0$ м/с, $\omega_s = 0$ рад/с для судна и $\varphi_a = 30^\circ, V_{xa} = 2$ м/с, $V_{za} = 0$ м/с, $\omega_a = 0$ рад/с для НПА.

Так как случайные воздействия на судна, вызванные ветро-волновыми возмущениями, значительно больше случайных воздействий, действующих на НПА, то при моделировании принимались значения случайных воздействий $\sigma_{\xi_{V_s}} = 0.01$ м/с, $\sigma_{\xi_{\omega_s}} = 0.005^\circ/с$, $\sigma_{\xi_{V_a}} = 0.005$ м/с, $\sigma_{\xi_{\omega_a}} = 0.002^\circ/с$.

Результаты исследования точности алгоритмов оценивания параметров движения МПК приведены на рисунках 2–5. В результате моделирования на ЭВМ было установлено, что экспериментальные значения дисперсии ошибок оценивания координат судна и НПА, вычисленные путем усреднения 1000 реализаций случайного процесса, практически совпадают с теоретическими значениями, вычисленными в ковариационной матрице ошибок фильтра.

На рисунке 2 приведены зависимости среднеквадратической ошибки (СКО) оценивания координат судна и НПА от СКО спутниковой навигационной системы и СКО гидроакустической навигационной станции при совместном и раздельном оценивании параметров движения МПК.

Анализ графиков (рис. 2) показывает, что применение алгоритмов оптимальной калмановской фильтрации по-

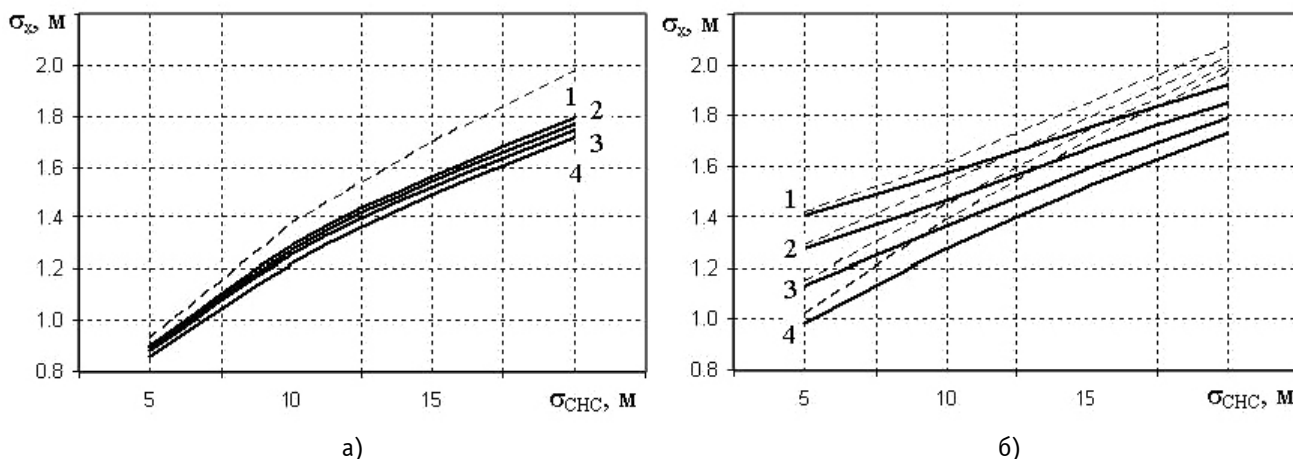


Рис. 2. Зависимость СКО оценивания координат судна (а) и НПА (б) от СКО СНС и СКО ГАНС при совместном (сплошная линия) и раздельном (пунктирная линия) оценивании параметров МПК:
 1) $\sigma_{ГАНС} = 10$ м; 2) $\sigma_{ГАНС} = 8$ м; 3) $\sigma_{ГАНС} = 6$ м; 4) $\sigma_{ГАНС} = 4$ м

зволяет значительно уменьшить СКО оценивания координат судна (до 5–10 раз) по сравнению с СКО измерений СНС. Уменьшение СКО оценивания координат НПА достигает 7–11 раз по сравнению с суммарной СКО измерений СНС и ГАНС. Отметим, что приведенный результат является максимально возможным, так как в реальных условиях наблюдается отклонение законов распределения погрешностей порождающего шума и наблюдений от гауссовского, несоответствие реальных и моделируемых процессов, в результате чего эффект от использования алгоритмов может быть существенно меньше. В связи с этим, для определения эффективности разработанных алгоритмов целесообразно производить сравнительную оценку точности алгоритмов совместного и раздельного оценивания параметров движения МПК.

На рисунке 3 приведены результаты сравнения точности оценивания координат судна и НПА для алгоритмов совместного и раздельного оценивания параметров МПК при различной СКО СНС и СКО ГАНС. Анализ результатов (рис. 3) показывает, что использование алгоритма совместного оценивания параметров движения МПК позволяет уменьшить СКО оценивания координат судна на 3–13% и НПА на 1–12% по сравнению с алгоритмом раздельного оценивания. Наибольший эффект от использования алгоритма наблюдается в случае минимальных ошибок определения места НПА с помощью ГАНС при значительных ошибках определения положения судна с помощью СНС.

Повышение точности оценивания координат судна объясняется тем, что в случае совместного оценивания координат МПК появляется дополнительное измерение координат судна относительно НПА, полученное с помощью ГАНС, которое не учитывается в алгоритме раздельного оценивания. Проводя аналогию с определением места судна по донным гидроакустическим маякам-ответчикам, приходим к выводу, что НПА в случае совместного оценивания играет роль подвижного донного маяка-ответчика, при этом чем выше будет точность определения позиции НПА, тем точнее будут определены и координаты судна. Данное предположение подтверждается экспериментально (см. рис. 2, а): с уменьшением СКО ГАНС точность определения места судна увеличивается.

Повышение точности оценивания координат НПА для алгоритма совместного оценивания объясняется тем, что при раздельном оценивании информация о координатах судна учитывается только соответствующим измерением, полученным с помощью СНС, в то время как при совместном оценивании используется результат комплексной обработки информации, поступающей от различных навигационных измерителей судна, полученный в том числе с учетом математической модели движения судна.

Следует отметить, что увеличение точности ГАНС свыше 4–6 м при значительных ошибках СНС порядка 15–20 м не приводит к увеличению точности определения места НПА, так как в этом случае погрешность оценки координат НПА определяется в основном погрешностью оценки координат судна.

Результаты (рис. 2–3) были получены для случая использования гидроакустического лага средней точности с СКО измерения скорости 0.2 м/с. В ряде случаев работа МПК происходит в условиях отсутствия достоверной информации об абсолютной скорости движения НПА. В этом случае счисление координат НПА по данным ИНС и ГАЛ сопровождается значительными ошибками, и основным источником навигационной информации о положении НПА становится ГАНС. Отметим, что низкая точность ГАЛ характерна для режимов движения НПА при больших расстояниях до дна, когда лаг работает в относительном режиме и выдает вектор скорости движения относительно воды.

Исследование точности алгоритмов оценивания для случая отсутствия достоверных измерений скорости НПА с помощью ГАЛ (СКО ГАЛ принималась равной 1 м/с) показало, что при использовании алгоритма совместного оценивания точность оценивания координат судна увеличивается незначительно (до 3–4%) по сравнению с алгоритмом раздельного оценивания. Это объясняется уменьшением точности определения координат НПА (вследствие отсутствия измерений скорости) и уменьшением веса дополнительного измерения координат судна по данным ГАНС. При этом точность ГАНС не оказывает значительного влияния на точность оценивания координат судна. В случае отсутствия достоверных данных о ско-

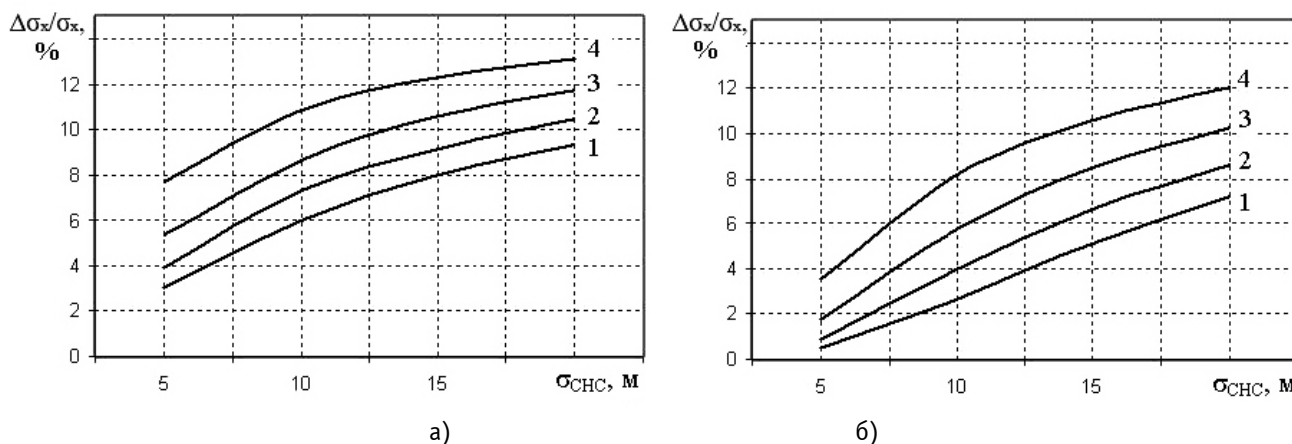


Рис. 3. Разность СКО оценивания координат судна (а) и НПА (б) для алгоритмов совместного и раздельного оценивания параметров МПК при различной СКО СНС и СКО ГАНС:

1) σ_{ГАНС} = 10 м; 2) σ_{ГАНС} = 8 м; 3) σ_{ГАНС} = 6 м; 4) σ_{ГАНС} = 4 м

рости НПА наблюдается ухудшение точности оценивания координат НПА для обоих алгоритмов. При этом алгоритм совместного оценивания характеризуется большей точностью (до 28%) по сравнению с точностью алгоритма раздельного оценивания.

В результате исследований было установлено значительное влияние наличия достоверных измерений скорости НПА на эффективность разработанных алгоритмов. В связи с этим целесообразно выполнить исследование влияния погрешности измерений скорости НПА с помощью ГАЛ на точность оценивания координат судна и НПА.

На рисунке 4 приведены зависимости СКО оценивания координат судна и НПА от СКО ГАЛ для различных СКО СНС и СКО ГАНС при совместном и раздельном оценивании параметров движения МПК. На рисунке 5 приведены результаты сравнения точности оценивания координат судна и НПА для алгоритмов совместного и раздельного оценивания параметров МПК при различных СКО ГАЛ, СКО СНС и СКО ГАНС.

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы. С уменьшением СКО ГАЛ увеличивается точность оценивания координат как судна, так и НПА. Практически для

всех комбинаций погрешностей СНС, ГАНС, ГАЛ алгоритм совместного оценивания показывает лучшие результаты оценивания. Наибольший эффект от использования алгоритма совместного оценивания наблюдается в случае малых значений ошибок ГАНС (СКО ГАНС порядка 4–6 м) и больших ошибках СНС (СКО СНС порядка 20 м). При этом в случае использования ГАЛ высокой точности (СКО порядка 0.05 м/с) наблюдается значительное повышение точности координат судна до 40%. В случае использования ГАЛ средней и низкой точности (СКО выше 0.2 м/с) наблюдается повышение точности оценки координат НПА свыше 12%.

Выводы

Выполнено математическое моделирование на ЭВМ алгоритмов совместного и раздельного оценивания координат элементов МПК при его движении по заданной прямолинейной траектории. Анализ результатов показал более высокую точность оценивания координат как судна, так и НПА для алгоритма совместного оценивания. Выигрыш алгоритма по точности в отдельных случаях достигает 40%. Наибольший эффект от использования ал-

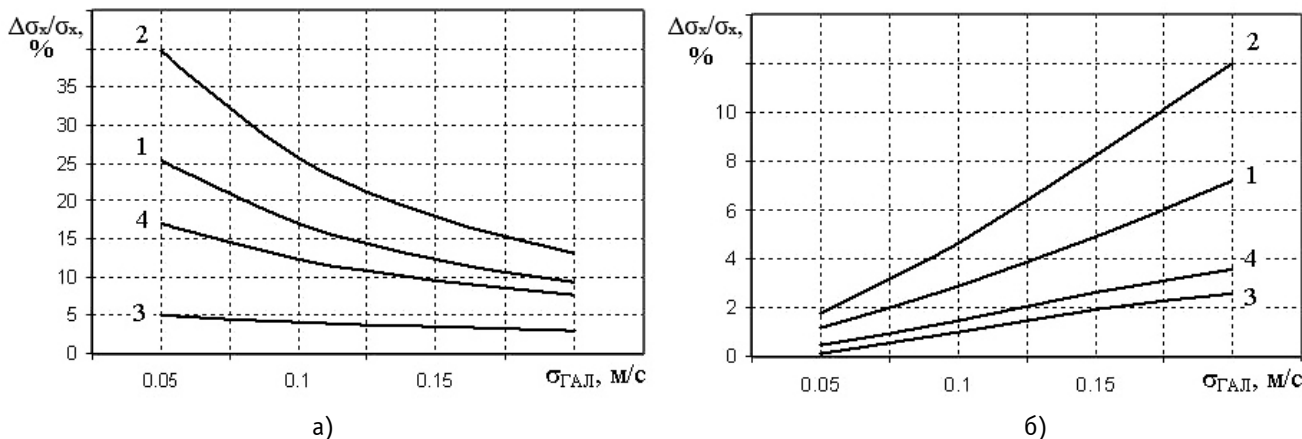


Рис. 4. Зависимость СКО оценивания координат судна (а) и НПА (б) от СКО ГАЛ, СКО СНС и СКО ГАНС при совместном (сплошная линия) и раздельном (пунктирная линия) оценивании параметров МПК:

- 1) $\sigma_{\text{СНС}} = 20 \text{ м}, \sigma_{\text{ГАНС}} = 10 \text{ м};$ 2) $\sigma_{\text{СНС}} = 20 \text{ м}, \sigma_{\text{ГАНС}} = 4 \text{ м};$ 3) $\sigma_{\text{СНС}} = 5 \text{ м}, \sigma_{\text{ГАНС}} = 10 \text{ м};$ 4) $\sigma_{\text{СНС}} = 5 \text{ м}, \sigma_{\text{ГАНС}} = 4 \text{ м}$

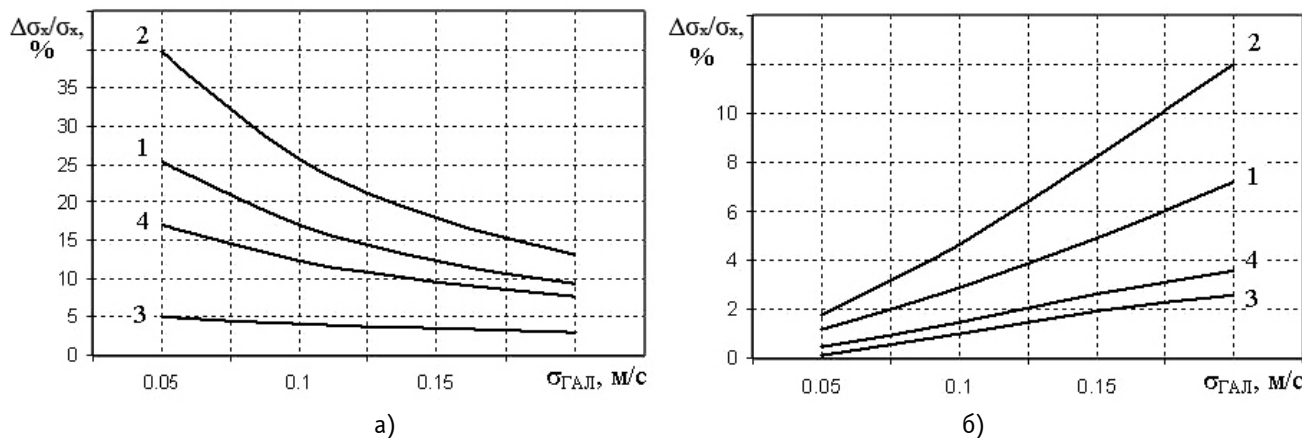


Рис. 5. Разность СКО оценивания координат судна (а) и НПА (б) для алгоритмов совместного и раздельного оценивания параметров МПК при различной СКО ГАЛ, СКО СНС и СКО ГАНС:

- 1) $\sigma_{\text{СНС}} = 20 \text{ м}, \sigma_{\text{ГАНС}} = 10 \text{ м};$ 2) $\sigma_{\text{СНС}} = 20 \text{ м}, \sigma_{\text{ГАНС}} = 4 \text{ м};$ 3) $\sigma_{\text{СНС}} = 5 \text{ м}, \sigma_{\text{ГАНС}} = 10 \text{ м};$ 4) $\sigma_{\text{СНС}} = 5 \text{ м}, \sigma_{\text{ГАНС}} = 4 \text{ м}$

горитма совместного оценивания наблюдается в случае малых значений ошибок ГАНС (СКО ГАНС порядка 4–6 м) при больших ошибках СНС (СКО СНС порядка 20 м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукомский Ю. А. Навигация и управление движением судов : учебник / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. – СПб. : Элмор, 2002. – 360 с.
2. Егоров С. А. Управление положением телеуправляемого подводного аппарата в режиме совместного с носителем движения: дис. канд. тех. наук. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 366 с.
2. Alstom. Guide to Dynamic Positioning of Vessels. Paris: Alstom, 2000. – Режим доступа: http://sylvain.andre.perso.neuf.fr/officier_pont/Alstom.pdf.
4. Dynamic positioning – DP systems – Kongsberg Maritime, 2008. – Режим доступа: <http://www.km.kongsberg.com>.
5. Васильев К. К. Моделирование и оптимизация систем управления движением морских подвижных комплексов / К. К. Васильев, А. В. Маттис // Автоматизация процессов управления – 2010. – № 2 (20). – С. 13–19.
6. Васильев К. К. Система управления совместным движением судна и телеуправляемого подводного аппарата / К. К. Васильев, А. В. Маттис // Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов : сб. докл. науч.-тех. конф. – М. : ОАО «Концерн «Моринформсистема-Агат», 2009 – С. 78–81.
7. Маттис А. В. Оптимальное управление движением морского подвижного объекта в дискретном времени / А. В. Маттис // Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации»: сб. науч. тр. Т. 1. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 189–193.