

УДК 681.51  
Т 41

## СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ СУДНА НА ЗАДАННОМ КУРСЕ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВЕТРОВОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

В. Л. Тимченко, канд. техн. наук, доц.;  
Е. А. Куклина, асп.

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Предложены процедуры формирования алгоритмов управления движением судна на заданном курсе, которые позволяют более точно формировать управляющие сигналы и компенсировать действие ветрового возмущения благодаря введению в состав системы стабилизации многофункциональной анемометрической системы повышенной точности.

**Ключевые слова:** система стабилизации, многофункциональная анемометрическая система повышенной точности, ветровое возмущение.

**Анотація.** Запропоновано процедури формування алгоритмів керування рухом судна на заданому курсі, що дозволяють більш точно формувати керуючі сигнали і компенсувати дію вітрового збурення завдяки введенню до складу системи стабілізації багатофункціональної анемометричної системи підвищеної точності.

**Ключові слова:** система стабілізації, багатофункціональна анемометрична система підвищеної точності, вітрове збурення.

**Abstract.** The log-MAP algorithm is considered which is one of the methods to work with a perspective turbo-code for error correction. The algorithm of decoder operation is shown for «hard» and «soft» solutions finding. The mathematic technique for metrics calculation is considered and the hardware architecture is developed for working with the log-MAP decoder. Simulation is shown for the algorithm of the log-MAP for a turbo-code with different length of the block and in terms of decoding iterations increase.

**Keywords:** turbo-code, log-MAP, turbo-code system, hardware architecture, BER simulation.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Анализ аварийности на морском транспорте, особенно при движении в ограниченных акваториях, показал, что 44% аварийных ситуаций вызвано неблагоприятными гидрометеорологическими условиями, особенно влиянием шквальных порывов [11]. Таким образом, проблема усовершенствования анемометрических систем, позволяющих повысить точность оценивания параметров ветрового возмущения при формировании корректирующих воздействий для стабилизации движения судна по гарантобезопасной траектории, является актуальной и требует дальнейших исследований.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В работах [1, 7] рассмотрена проблема повышения качества управления судном при прямолинейном движении и маневрировании в условиях воздействия ветрового возмущения. Данная проблема решается за счет более точного расчета аэро- и гидродинамических коэффициентов, что позволит более корректно математически описать силы и моменты, воздействующие на корпус и влияющие на параметры движения судна, а также путем синтеза оптимального регулятора, который формирует управляющие сигналы, удовлетворяющие заданным ограничениям.

Проводятся исследования, посвященные усовершенствованию комбинированных систем управления

судном на заданном курсе [8, 9], но анализ научных результатов показывает, что повышенные требования к точности стабилизации движения судна предполагают проведение дальнейших исследований в этой области. Применяемые в настоящее время в системах стабилизации анемометрические системы не всегда в достаточной степени обеспечивают получение точных данных, необходимых для формирования управляющего воздействия, компенсирующего возмущение и обеспечивающего движение по гарантобезопасной траектории.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — разработка системы стабилизации движения судна на основе формирования канала измерения параметров ветрового возмущения многофункциональной анемометрической системой повышенной точности и учета полученных данных при формировании управления для компенсации возмущающего ветрового воздействия.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для повышения безопасности мореплавания в районах интенсивного судоходства и ограниченных акваторий необходимо с требуемой точностью оценивать параметры ветрового возмущения (скорость, ускорение и направление ветра), особенно его проявления в виде шквальных порывов, что позволит более точно формировать корректирующие сигналы управления. Введение в состав системы стабилизации

движения судна на заданном курсе анемометрической системы повышенной точности позволяет получить более корректные значения параметров ветрового возмущения для последующего учета при формировании сигналов коррекции.

Синтез системы стабилизации состоит из следующих этапов:

- планирование гарантобезопасной траектории;
- разработка алгоритма компенсации ветрового возмущающего воздействия на основе измерения скорости, определения ускорения и нахождения направления движения воздушных масс.

Структура системы стабилизации движения с компенсацией возмущающего ветрового воздействия, в состав которой входит анемометрическая система, представлена на рис. 1.

В блоке формирования заданного угла курса осуществляется планирование гарантобезопасной траектории судна. Блок формирования корректирующего сигнала вырабатывает управляющее воздействие  $u_1(t)$ , необходимое для коррекции текущего угла курса, на основе рассогласования  $\varepsilon(t)$  между заданным углом курса  $\psi_{зад}(t)$  и текущим  $\psi_{тек}(t)$ .

Анемометрическая система оценивает скорость, направление и ускорение ветра, а блок компенсации возмущения учитывает полученные данные при формировании управляющего сигнала  $u_2(t)$ , необходимого для компенсации действия ветрового возмущения. Суммарное управляющее воздействие  $u_{\Sigma}(t)$  подается на рулевую машину, которая переключает перо руля на угол  $\alpha(t)$  для стабилизации движения судна по заданной гарантобезопасной траектории.

Структурная схема (рис. 2) системы стабилизации движения судна на заданном курсе формируется с компенсирующей связью по возмущению.

Для проверки корректности и эффективности работы анемометрической системы в составе системы стабилизации необходимо построить имитационную математическую модель стабилизации движения судна на заданных гарантобезопасных траекториях, обеспечивающих высокую вероятность отсутствия аварии в условиях экстремального ветрового возмущения [10].

Уравнение движения судна при отсутствии внешних возмущений имеет вид [6]

$$\ddot{\psi}_{тек}(t) + r\dot{\psi}_{тек}(t) + q\psi_{тек}(t) = -s_{31}\dot{\alpha}(t) + \bar{s}\alpha(t),$$

где  $\psi_{тек}(t)$  — текущий угол курса;  $r, q, s_{31}, \bar{s}$  — аэро- и гидродинамические коэффициенты судна;  $\alpha(t)$  — угол переключки пера руля.

После применения преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях уравнение движения судна в операторном виде выражается следующим образом:

$$p^3\psi_{тек}(p) + rp^2\psi_{тек}(p) + qp\psi_{тек}(p) = -s_{31}p\alpha(p) + \bar{s}\alpha(p).$$

Передаточная функция судна  $W_c(p)$  принимает вид

$$W_c(p) = \frac{-s_{31}p + \bar{s}}{p^3 + rp^2 + qp}.$$

Управляющее воздействие системы  $u(p)$ , необходимое для стабилизации текущего значения угла курса  $\psi_{тек}(p)$ , формируется на основе рассогласования

$$\varepsilon(p) = \psi_{зад}(p) - \psi_{тек}(p), \quad (1)$$

где  $\psi_{зад}(p)$  — заданный курс судна, и выражается следующим образом [4]:

$$u(p) = k_n\varepsilon(p) + \frac{\varepsilon(p)}{T_n p} + \frac{T_d p \varepsilon(p)}{T_L p + 1}, \quad (2)$$

где  $k_n, T_n, T_d$  — коэффициенты ПИД-регулятора;  $T_L$  — постоянная времени фильтра по производной.

Тогда передаточная функция ПИД-регулятора  $W_{ПИД}(p)$  принимает вид

$$W_{ПИД}(p) = \frac{k_n T_n T_L p^2 + (k_n T_n + T_n T_d + T_L)p + 1}{T_n T_L p^2 + T_n p}. \quad (3)$$

Рулевой механизм моделируется как апериодическое звено, его передаточная функция  $W_{рм}(p)$  определяется выражением

$$W_{рм}(p) = \frac{k_s}{\tau p + 1},$$

где  $k_s$  — коэффициент усиления;  $\tau$  — постоянная времени переключки пера руля.

Передаточная функция блока компенсации ветрового возмущения  $W_{комп}(p)$  определяется как

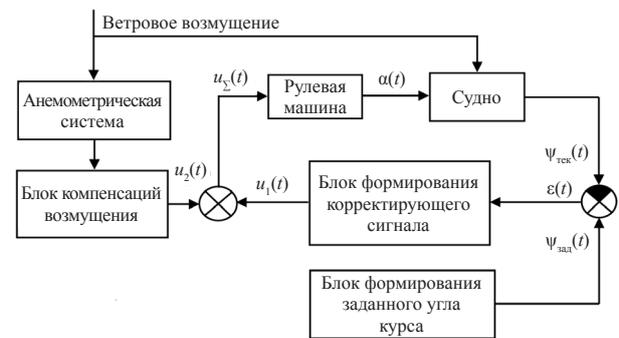


Рис. 1. Функциональная схема системы стабилизации движения судна

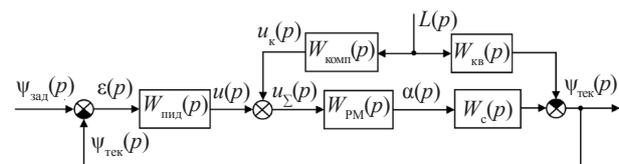


Рис. 2. Структурная схема системы стабилизации движения судна на заданном курсе с компенсирующей связью по возмущению

отношение передаточной функции канала возмущения  $W_{\text{КВ}}(p)$  и  $W_{\text{общ}}(p) = W_c(p) \cdot W_{\text{РМ}}(p)$  [2]:

$$W_{\text{комп}}(p) = \frac{W_{\text{КВ}}(p)}{W_{\text{общ}}(p)} = \frac{(p^3 + rp^2 + qp)(\tau p + 1)k_b}{(-s_{31}p + \bar{s})k_s},$$

где  $k_b$  — редуцированный коэффициент канала возмущения. Для физической реализации [2] звена  $W_{\text{комп}}(p)$  вводим дополнительные звенья  $(T_1 + 1)^3$  в  $W_{\text{КВ}}(p)$ . Тогда  $W_{\text{комп}}(p)$  примет вид

$$W_{\text{комп}}(p) = \frac{(p^2 + rp + q)(\tau p + 1)k_b}{(-s_{31}p + \bar{s})(T_1 p + 1)^3 k_s},$$

где  $T_1$  — постоянная времени.

С учетом выражений (1)–(3) при возмущающем воздействии на судно силы давления ветра система уравнений для стабилизации курса запишется в виде (см. рис. 2)

$$\begin{cases} \varepsilon(p) = \psi_{\text{зад}}(p) - \psi_{\text{тек}}(p); \\ u_{\Sigma}(p) = W_{\text{ПИД}}(p) \cdot \varepsilon(p) + W_{\text{комп}}(p) \cdot L(p); \\ \psi_{\text{тек}}(p) = W_{\text{РМ}}(p) \cdot W_c(p) \cdot u_{\Sigma}(p) - W_{\text{КВ}}(p) \cdot L(p). \end{cases}$$

Здесь  $L(p)$  — ветровое возмущающее воздействие, параметры которого измеряются анемометрической системой.

Для получения уравнения системы стабилизации курса относительно  $\psi_{\text{тек}}(p)$  исключаются промежуточные переменные  $u_{\Sigma}(p)$  и  $\varepsilon(p)$ . Тогда уравнение системы стабилизации по углу курса  $\psi_{\text{тек}}(p)$  принимает вид

$$\begin{aligned} [1 + W_{\text{ПИД}}(p) \cdot W_{\text{РМ}}(p) \cdot W_c(p)] \cdot \psi_{\text{тек}}(p) = \\ = W_{\text{ПИД}}(p) \cdot W_{\text{РМ}}(p) \cdot W_c(p) \cdot \psi_{\text{зад}}(p) + \\ + [W_{\text{комп}}(p) \cdot W_{\text{РМ}}(p) \cdot W_c(p) - W_{\text{КВ}}(p)] \cdot L(p). \end{aligned}$$

Значение управляемой координаты  $\psi_{\text{тек}}(p)$  рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} \psi_{\text{тек}}(p) = \frac{W_{\text{ПИД}}(p) \cdot W_{\text{РМ}}(p) \cdot W_c(p)}{1 + W_{\text{ПИД}}(p) \cdot W_{\text{РМ}}(p) \cdot W_c(p)} \cdot \psi_{\text{зад}}(p) + \\ + \frac{W_{\text{комп}}(p) \cdot W_{\text{РМ}}(p) \cdot W_c(p) - W_{\text{КВ}}(p)}{1 + W_{\text{ПИД}}(p) \cdot W_{\text{РМ}}(p) \cdot W_c(p)} \cdot L(p), \end{aligned}$$

угол дрейфа  $\beta(p)$  — по уравнению [3]

$$p^2 \beta(p) + rp \beta(p) + q \beta(p) = -s_{21} p \alpha(p) + s \alpha(p),$$

где  $s_{21}$ ,  $s$  — аэро- и гидродинамические коэффициенты судна. Тогда  $\beta(p)$  определится по формуле

$$\beta(p) = \frac{-s_{21} p + s}{p^2 + rp + q} \cdot \alpha(p),$$

где  $\alpha(p)$  рассчитывается следующим образом:

$$\alpha(p) = [W_{\text{комп}}(p) \cdot L(p) + W_{\text{ПИД}}(p) \cdot \varepsilon(p)] \cdot W_{\text{РМ}}(p). \quad (4)$$

Подставив  $\varepsilon(p) = \psi_{\text{тек}}(p) - \psi_{\text{зад}}(p)$  в выражение (4), получим

$$\begin{aligned} \alpha(p) = \{ W_{\text{комп}}(p) \cdot L(p) + \\ + W_{\text{ПИД}}(p) \cdot [\psi_{\text{зад}}(p) - \psi_{\text{тек}}(p)] \} \cdot W_{\text{РМ}}(p). \end{aligned}$$

Угол скорости судна  $\varphi_c(p)$  определяется из уравнения [3]

$$\varphi_c(p) = \psi_{\text{тек}}(p) - \beta(p).$$

При моделировании продольное  $X$  и поперечное  $Y$  смещения судна рассчитываются следующим образом [3]:

$$X = \int v_x \sin \varphi_c dt; \quad Y = \int v_y \cos \varphi_c dt,$$

где  $v_x$  и  $v_y$  — продольная и поперечная скорости судна в неподвижной системе координат.

Для получения уточненных оценок параметров ветрового возмущения анемометрическая система программно усовершенствована дополнением процедуры подсчета ускорения ветра, необходимого для более точного формирования корректирующего сигнала [5].

На функциональной схеме (рис. 3) применены следующие обозначения: БКНВ — блок контроля направления ветра, АЦП — аналогово-цифровой преобразователь; БККИ — блок контроля количества импульсов; БФСК — блок фильтрования случайных колебаний; БПИУ — блок пересчета количества импульсов в ускорение ветра; БПИС — блок пересчета количества импульсов в скорость ветра; БКСЗ — блок контроля скорости по заданному значению; БСЗС — блок световой и звуковой сигнализации; ПУ — пульт управления; ПК — персональный компьютер; ЖКД — жидкокристаллический дисплей; БКВ — блок компенсации возмущения.

Процедуры получения значений скорости ветра и данных об изменении направления ветра выполняются в соответствии с [5]. Ускорение ветрового возмущения определяется следующим образом.

Входные параметры:  $i$  — постоянный шаг измерений;  $V_i(t)$  — значение скорости ветра на  $i$ -м шаге измерений;  $\bar{V}_i(t)$  — среднее значение скорости ветра;  $n$  — количество проведенных измерений;  $T$  — интервал времени, в течение которого производились измерения. Выходной параметр:  $a(t)$  — ускорение ветрового возмущения.

Алгоритм определения ускорения ветровых возмущающих нагрузок (рис. 4):

1. Провести измерения  $V_i(t)$  с шагом  $i$ .
2. Записать полученные значения в массив данных.
3. Вычислить  $\bar{V}_i(t) = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n V_i(t) \right]$ .
4. Повторно выполнить операции 1–3 на  $(i+1)$ -м шаге для получения  $\bar{V}_{(i+1)}(t)$ .
5. Вычислить  $a(t) = \frac{1}{T} [\bar{V}_{(i+1)}(t) - \bar{V}_i(t)]$ .
6. Остановиться.

При превышении рассчитанной средней скоростью  $\bar{V}_i(t)$  заданного предварительно значения  $V_{\text{const}}$

срабатывает световая и звуковая сигнализация. В этом случае необходимо увеличить предел измерения и повторить процедуру измерения скорости ветра и определения его ускорения.

В окне визуализации данных анемометрической системы (рис. 5) выводятся графическая зависимость скорости ветра  $V_i(t)$ , текущие значения скорости и ускорения ветрового возмущения.

Рассмотрим пример моделирования движения судна по заданной траектории в условиях действия

ветрового возмущения с постоянным курсовым углом, силой ветра 7 баллов (средняя скорость ветра  $V_{cp} = 15$  м/с).

Результаты проведенного имитационного моделирования, демонстрирующего движение судна в условиях действия ветрового возмущения и при компенсации его системой стабилизации движения, приведены на рис. 6–10.

Компенсация ветрового возмущения позволяет снизить интенсивность переключений пера руля (кривая 2

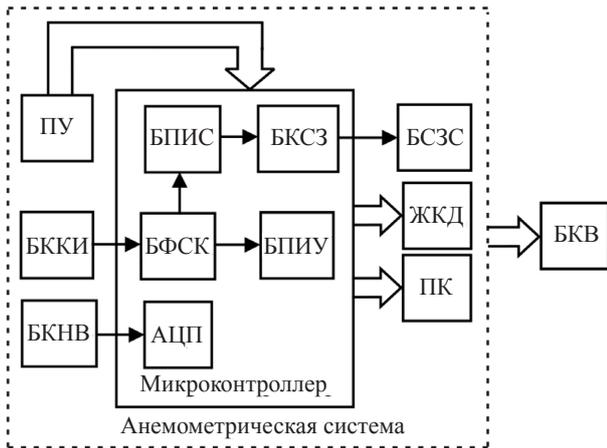


Рис. 3. Функциональная схема анемометрической системы

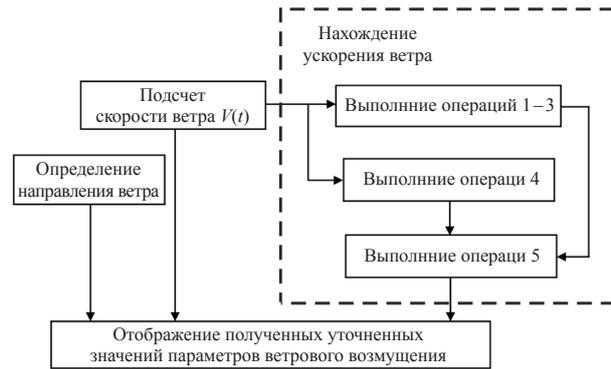
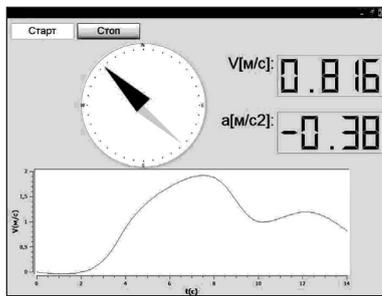
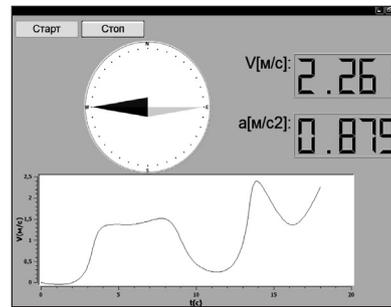


Рис. 4. Алгоритм работы анемометрической системы



а)



б)

Рис. 5. Различные виды удара судна днищем о набегающую волну [8]: а — удар о склон волны, б — удар о подошву волны

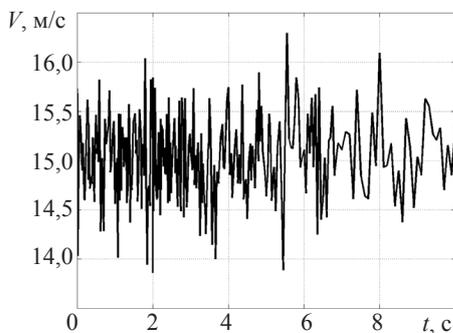


Рис. 6. Зависимость изменения скорости ветра

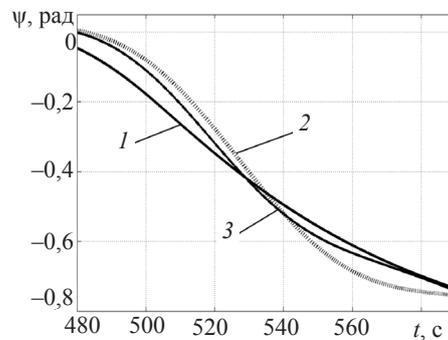
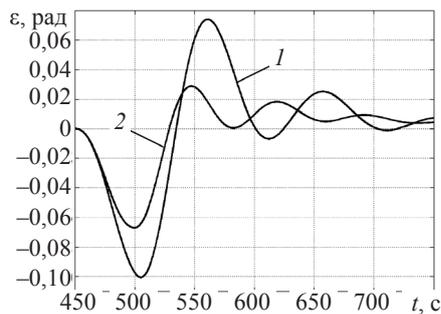
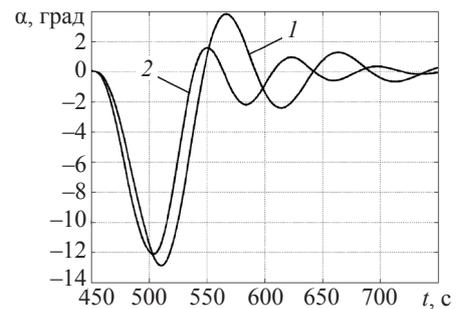


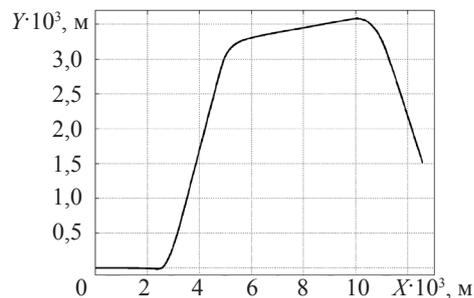
Рис. 7. Изменение угла курса при выполнении маневра: 1 — заданный угол курса; 2 — без компенсации ветрового возмущения; 3 — с учетом компенсации ветрового возмущения



**Рис. 8.** Зависимость рассогласования по углу курса при выполнении маневра: 1 — без компенсации ветрового возмущения; 2 — с учетом компенсации ветрового возмущения



**Рис. 9.** Зависимость угла перекладки пера руля при выполнении маневра: 1 — перекладка пера руля без компенсации ветрового возмущения; 2 — перекладка пера руля при компенсации ветрового возмущения.



**Рис. 10.** Траектория движения судна с учетом компенсации ветрового возмущения

на рис. 9), что, в свою очередь, влияет на снижение расхода топлива. Как следует из результатов моделирования, среднеквадратичная ошибка управления в системе стабилизации с компенсационным каналом снижается по сравнению с системой без компенсационной связи на 15,6%, а расход энергии — на 4,3%. Отсутствие компенсирующей связи по возмущению обуславливает снижение точности формируемых сигналов управления (кривая 2 на рис. 7, кривая 1 на рис. 8) и увеличение поперечного смещения (см. рис. 10), что может повысить риск возникновения аварийной ситуации.

### ВЫВОДЫ

1. Предложенная многофункциональная анемометрическая система повышенной точности может быть

использована в системах стабилизации на судах различных типов, для чего в систему стабилизации движения необходимо ввести аэро- и гидродинамические характеристики конкретного судна.

2. Включение анемометрической системы в состав системы стабилизации судна позволяет получить положительный эффект в повышении точности удержания судна на заданном курсе.

3. Система стабилизации с компенсирующей связью по возмущению обладает достаточной инвариантностью по отношению к ветровому воздействию и возможностью достижения судном заданного пункта назначения с меньшими затратами энергии, по сравнению с существующими аналогами, на 3–5%.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Вагущенко, Л.Л. Системы автоматического управления движением судов [Текст] / Л.Л. Вагущенко, Н.Н. Цымбал. — О. : Транслит, 2007. — 376 с.
- [2] Зайцев, Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования [Текст] / Г.Ф. Зайцев. — К. : Выща школа, 1989. — 431 с.
- [3] Лукомский, Ю.А. Системы управления морскими подвижными объектами [Текст] / Ю.А. Лукомский, В.С. Чугунов. — Л. : Судостроение, 1988. — 272 с.
- [4] Олсон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления [Текст] / Г. Олсон, Дж. Пиани. — СПб. : Невский диалект, 2001. — 548 с.
- [5] Пат. 72946 Україна МПК 2009 G01P 5/06. Анемометрична система [Текст] / Тимченко В.Л., Тимченко І.В., Кукліна К.О.; заявник та патентовласник Нац. ун-т кораблебудування ім. адм. Макарова. — №u201112524; заявл. 25.10.2011; надрук. 11.09.2012, Бюл. №17/2012. — 5 с.

- [6] **Першиц, Р.Я.** Управляемость и управление судном [Текст] / Р.Я. Першиц — Л. : Судостроение, 1983. — 272 с.
- [7] Справочник по теории корабля [Текст] : в 3 ч. Ч.1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / под ред. Я.И. Войткунского. — Л. : Судостроение, 1985. — 768 с.
- [8] **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.
- [9] **Тимченко, В.Л.** Синтез систем переменной структуры для стабилизации судна при неполной управляемости [Текст] / В.Л. Тимченко // Проблемы управления и информатики : междунар. науч.-техн. журнал. — К., 2012. — №3. — С. 73–83.
- [10] **Тимченко, В.Л.** Система керування морським рухомим об'єктом на основі компенсації збурювального впливу [Текст] / В.Л. Тимченко, К.О. Кукліна //Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2010. — №1 (430). — С. 126–131.
- [11] **Федоров, А.** Разумная стоимость ремонта — страхование каско морских судов [Текст] / А. Федоров // Страхование ревью. — М., 2006. — № 11 (151). — С. 22–26.

---

© В.Л. Тимченко, К.О. Кукліна

Надійшла до редколегії 01.08.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. *Ю.П. Кондратенко*

Статтю розміщено у Віснику НУК №4, 2012