

*В роботі представлено підхід до ідентифікації параметрів математичної моделі руху судна і збурень при русі в умовах переходу. Для визначення параметрів моделі і статичного збурюючого моменту запропоновано використати спектральний аналіз сигналу кутової швидкості. Запропонований підхід дозволяє визначити параметри моделі судна і амплітуду статичного збурення з точністю, достатньою для синтезу і налаштування регулятора автостернового*

*Ключові слова: ідентифікація моделі руху судна, ідентифікація параметрів збурення, спектральний аналіз, обмеження при русі судна*

*В работе представлен подход к идентификации параметров математической модели движения судна и возмущений в условиях перехода. Для определения параметров модели и статического возмущающего момента предложено использовать спектральный анализ сигнала угловой скорости. Предложенный подход позволяет определить параметры модели судна и амплитуду статического возмущения с точностью, достаточной для синтеза и настройки регулятора авторулевого*

*Ключевые слова: идентификация модели движения судна, идентификация параметров возмущения, спектральный анализ, ограничения при движении судна*

УДК 681.5.015.4 + 681.5.015.87

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.42139

# ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СУДНА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ В УМОВАХ ПЕРЕХОДУ

С. В. Іванов

Кандидат технічних наук,  
завідувач науково-дослідного відділу\*

E-mail: marinex@inbox.ru

П. Б. Олійник

Кандидат технічних наук, науковий співробітник\*

E-mail: poleinik@ukr.net

В. М. Теут\*

E-mail: vm.teut@yandex.ua

\*Науково-дослідний інститут телекомунікацій  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

## 1. Вступ

Одним з методів забезпечення оптимального керування судном в процесі руху є використання адаптивного автостернового [1]. Оскільки в процесі плавання судна умови його руху постійно змінюються, то виникає проблема переналаштування автостернового в залежності від умов руху. Один з підходів до переналаштування автостернового полягає у зміні його параметрів в залежності від ідентифікованих параметрів моделі судна та збурення. Таким чином, виникає проблема ідентифікації параметрів моделі судна під час руху.

Як правило, параметри математичної моделі судна визначають при ході судна зигзагом великою амплітудою відхилення від курсу. Такий підхід до ідентифікації параметрів моделі судна, на жаль, придатний лише при його ходових випробуваннях або при русі у відкритому морі, коли нема обмежень у вигляді фарватеру або коридору для руху суден. При плаванні в умовах переходу – в рамках визначених коридорів міжнародних трас та в обмежених навігаційними безпеками фарватерах – такий підхід непридатний. Отже, існує необхідність у підході до ідентифікації параметрів ма-

тематичної моделі судна, придатному до застосування в умовах переходу.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Більшість існуючих методів ідентифікації параметрів моделі судна орієнтовані на використання зигзагу або циркуляції.

Наприклад, авторами [2] запропоновано розрахунок параметрів моделі за діаграмою керованості і результатами виконання зигзагу. А. Є. Пелєвін в [3] для моделі Номото другого порядку отримав співвідношення між параметрами моделі при застосуванні активного управління. Визначення параметрів моделі судна автор [3] пропонує виконувати чисельними методами, шляхом мінімізації запропонованого ним критерію. Спільним недоліком цих робіт є те, що для визначення параметрів моделі судна потрібно застосувати рух зигзагом з амплітудою відхилення від початого курсу мінімум  $\pm 5^\circ$ , що недопустимо при русі в обмеженнях, накладених міжнародним коридором.

Мануель Касадос і Рамон Ферейро в [4] пропонують підхід до визначення параметрів моделі Номото з

нелінійним членом (модель Вагнера-Сміта) за результатами циркуляції, що встановилась. Процедура заснована на зворотно-ступінчастому алгоритмі ідентифікації моделі та методів підстроювання параметрів моделі, і також є достатньо складною для використання в умовах рейсу.

На основі аналізу перехідного процесу в системі «автостерновий-судно» запропоновано проводити ідентифікацію параметрів моделі Номото в [5]. Недоліками такого підходу є те, що для ідентифікації потрібно по-перше, використати циркуляцію судна, а по-друге, точність визначення коефіцієнту пропорційності складає більше 10 %, що недостатньо для застосування при синтезі регулятора автостернового.

Ідентифікацію моделі Номото в частотній області на основі аналізу реакції судна на переміщення стерна таким чином, що кут відхилення стерна змінюється за законом синусоїди з лінійною розгорткою частоти (чїрп) запропоновано в [6]. Принциповим недоліком такого підходу є неможливість його практичної реалізації внаслідок ряду особливостей стернових машин (інерційність, а також часто неможливість керування кутом відхилення стерна в динаміці – можна задати лише бажаний кут відхилення).

Роботи інших авторів (зокрема і рання робота авторів даного дослідження [7]) також орієнтовані в основному на використання зигзагу, і запропоновані методи або дають низьку точність визначення параметрів, або достатньо складні для застосування в умовах рейсу і більше підходять для використання в умовах ходових випробувань.

Спроби вирішити задачу ідентифікації параметрів моделі судна при русі в умовах переходу були і раніше, зокрема А. К. Шейхот в [8] запропонував методику ідентифікації параметрів моделі Номото другого порядку за допомогою методу швидкісного градієнту. Недоліком цього методу є те, що з хоча його допомогою і можлива ідентифікація під час руху (в т.ч. без активного керування), при значному рівні збурень метод стає непрацездатним.

Габріель Елкаїм застосував до ідентифікації моделі руху катамарану Atlantis метод ідентифікації динамічної моделі в просторі станів за допомогою калманівського спостерігача (Observer Kalman IDentification method, OKID) [9]. Цей метод спирається лише на вхідні і вихідні дані та дозволяє отримати псевдокалманівський оцінювач, що ідентифікує рівняння стану. На основі ідентифікованих даних було створено лінійно-квадратичний гаусівський регулятор, який продемонстрував хорошу точність витримування шляху (відхилення не більше 1 метра). Недоліком цього підходу є висока обчислювальна потужність, необхідна для ідентифікації моделі, а також відносно високий порядок моделі (четвертий і вище), що створює певні труднощі при практичній реалізації.

Таким чином, підходу до ідентифікації параметрів математичної моделі судна, придатному до застосування в умовах переходу, наразі немає.

### 3. Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка підходу до ідентифікації параметрів математичної моделі судна та збу-

рення, що діє на нього, в умовах обмежень, накладених на рух судна при переході.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- розробити підхід до ідентифікації моделі судна, що враховує накладені на рух обмеження;
- провести моделювання та виробити практичні рекомендації по застосуванню підходу;
- провести випробування запропонованого підходу на практиці.

### 4. Опис запропонованого підходу до ідентифікації моделі судна

Проведення ідентифікації параметрів моделі судна можна забезпечити при стаціонарних чи хоча б квазістаціонарних їх значеннях протягом періоду ідентифікації (фактично, протягом часу проведення вимірювань вхідних та вихідних величин системи «автостерновий-судно»).

Як зазначено в [10], при регулярному хвилюванні моря збурення, що діє на судно, носить гармонічний характер. Тому судно в процесі руху внаслідок дії збурення (в першу чергу – збурювального моменту) буде рискати за курсом, і шлях його буде зигзагоподібним. Таким чином, рівняння руху судна при дії постійної складової збурення та регулярного хвилювання мають вид:

$$\begin{cases} \dot{\Psi} = \omega, \\ \dot{\omega} = -\mu\omega + \mu k \delta_c + m_d + m_{ds} \sin(\omega t), \\ \dot{\delta}_c = -\mu_g \delta_c + \mu_g u, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\Psi$  – курс судна зі знаком «-»,  $\omega$  – кутова швидкість рискання,  $\delta_c$  – кут перекладки стерна,  $\mu = 1/T$  – величина, обернена сталій часу судна,  $k$  – коефіцієнт передачі,  $\mu_g$  – величина обернена сталій часу привода,  $u$  – задавальна дія,  $m_d$  – стала частина приведенного збурювального моменту,  $m_{ds}$  – уявна амплітуда приведенного збурювального моменту за рахунок регулярного хвилювання,  $\omega$  – уявна частота регулярного хвилювання.

Спочатку розглянемо спрощений випадок ідентифікації при збуренні: стала частина приведенного збурювального моменту  $m_d$  відсутня, і рух судна під дією збурення відбувається в межах заданого коридору зміни курсу, внаслідок чого керуюча дія відсутня, тобто  $\delta_c = 0$ . Визначивши частоту  $\omega$  за допомогою Фур'є та вимірявши кут  $\Psi$  і кутову швидкість  $\omega$  в моменти часу  $t_1$  та  $t_2$ , що відрізняються на величину  $\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{3\pi}{2\omega}$  (тобто зсув фази хвилювання в ці моменти часу дорівнює  $3\pi/2$ ), і підставивши відповідні дані в (1), отримаємо систему рівнянь, розв'язавши яку легко можна отримати формули для  $m_{ds}$  та  $\mu$ :

$$m_{ds} = \frac{(\omega_1 + \omega_2)(-\omega^2(2\Psi_0 - \Psi_1 - \Psi_2)(\Psi_1 - \Psi_2) + \omega_1^2 - \omega_2^2)}{2\omega(\Psi_1 - \Psi_2)^2},$$

$$\mu = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\Psi_1 - \Psi_2}, \quad (2)$$

де  $\Psi_1, \Psi_2, \omega_1, \omega_2$  – курс судна зі знаком «-» і кутова швидкість судна в моменти часу  $t_1$  і  $t_2$  відповідно.

Таким чином, можна визначити амплітуду гармонічного збурювального моменту і сталу часу. Оскільки активне управління судном у вказаному випадку відсутнє, то визначити коефіцієнт передачі  $k$  неможливо – у системі рівнянь (1) при  $\delta_c = 0$  коефіцієнт передачі  $k$  відсутній. Для ідентифікації коефіцієнта передачі судна слід застосувати активне управління рухом.

Внаслідок дії збурень, зокрема через наявність квазістаціонарного збурювального моменту  $m_d$ , судно майже завжди буде виходити за межі встановленого коридору, а тому розглянутий випадок на практиці зустрічається рідко.

Розглянемо повну систему рівнянь (1) за відсутності керуючої дії ( $u = 0$ ), причому будемо розглядати рух судна, що встановився. Початкові умови руху судна:  $\Psi(0) = \Psi_0, \omega(0) = 0, \delta(0) = 0$ .

Для того, щоб визначити коефіцієнт передачі  $k$ , можна скористатись перетворенням Фур'є, дискретизувавши сигнал і проаналізувавши сталу складову спектра. Стала складова спектра сигналу при відсутності керування дорівнює  $\omega_{10} = \frac{m_d}{\mu}$ , а сигналу при подачі  $u_p$  на вхід стерна –  $\omega_{20} = k u_p + \frac{m_d}{\mu}$ . Тому, знаючи

$u_p$ , можна отримати, що

$$k = \frac{\omega_{20} - \omega_{10}}{u_p} \tag{3}$$

Якщо відома стала часу судна  $T$  або ж величина  $\mu = 1/T$ , для визначення необхідного для розрахунку системи управління квазістаціонарного збурювального моменту можна застосувати формулу

$$m_d = \mu \omega_{10} = \omega_{10} / T \tag{4}$$

Для того, щоб визначити сталу часу судна, можна знов-таки скористатись активним управлінням рухом судна і спектральним аналізом. При цьому, щоб виключити з аналізу вплив динаміки приводу стерна (рульової машини), доцільно вимірювати не задавальну дію  $\delta_c$ , а безпосередньо сигнал датчика кута перекладки стерна  $\delta_c$ .

Якщо змінювати  $\delta_c$  за гармонічним законом, тобто  $\delta_c = \delta_{cmax} \sin(\Omega t + \phi_0)$ , то амплітуда коливань кутової швидкості  $\omega_{max}$  після затухання перехідних процесів буде виражатись формулою

$$\omega_{max} = \frac{k T \delta_{cmax}}{\sqrt{T^2 \Omega^2 + 1}} \tag{5}$$

З (5) легко отримати формулу для визначення сталої часу моделі судна:

$$T = \frac{1}{\Omega} \sqrt{\frac{k^2 \delta_{cmax}^2}{\omega_{max}^2} - 1} \tag{6}$$

Таким чином, застосувавши запропонований підхід з активним управлінням за дії природних збурень, за допомогою спектрального аналізу можна отримати

параметри моделі (1), необхідні для синтезу регулятора автостернового –  $k, T$  і  $m_d$ . На відміну від відомих підходів до ідентифікації (див., наприклад [11]), запропонований підхід не вимагає застосування вхідної дії типу білого шуму та визначення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) судна, що зменшує об'єм необхідних обчислень. Слід також відзначити, що оскільки в формули (3), (4) та (6) не входять параметри збурення, цей підхід можна застосовувати і при нерегулярному хвилюванні моря, тобто в умовах, коли у спектрі збурення немає чіткої домінуючої гармоніки, і хвилювання слід розглядати як випадковий процес з відповідними характеристиками, що неможливо при застосуванні інших підходів.

Певним ускладненням при застосуванні запропонованого підходу є те, що для ідентифікації потрібно забезпечити точне вимірювання кутів та кутових швидкостей. Крім того, процедура ідентифікації може в залежності від сталої часу судна потребувати певного часу (це пов'язано з затуханням перехідного процесу в системі «автостерновий – судно» та тим, що для отримання результату слід проводити вимірювання протягом мінімум одного періоду задавальної дії), а також потребуватиме застосування більш потужного контролера, здатного виконувати швидко перетворення Фур'є.

### 5. Моделювання підходу до ідентифікації моделі судна

Для моделювання підходу в [12] було запропоновано методику випробувань, що реалізує запропонований підхід. Запропонована методика має вид:

1. Виставити стерно в діаметральну площину і після затухання перехідного процесу за кутовою швидкістю виміряти вибірку з  $N$  значень кутової швидкості судна  $\omega$ . Розрахувати амплітудний спектр, запам'ятати кутову частоту  $w$ , на якій амплітуда збурення максимальна, і значення сталої складової  $\omega_{10}$  («нульова лінія» спектру).

2. Перекласти стерно задавальною дією  $u_p$  так, щоб судно поверталось на заданий курс, і після затухання перехідного процесу за кутовою швидкістю виміряти вибірку з  $N$  значень кутової швидкості судна  $\omega$ . Розрахувати амплітудний спектр, запам'ятати значення сталої складової  $\omega_{20}$  («нульова лінія» спектру).

3. Подати на вхід стернової машини гармонічну або іншу періодичну дію з заданим періодом, не рівним  $1/w$ , і, коли в системі встановляться коливання (пройде час, рівний часу затухання перехідного процесу за п. 1), виміряти вибірки з  $N$  значень кута відхилення стерна  $\delta_c$  та кутової швидкості судна  $\omega$  (наприклад, сигнал неузгодження слідкуючої системи транслятора курсу гірокомпаса). Розрахувати їх спектри та визначити на частоті, де амплітуда спектра управління максимальна, значення  $\delta_{cmax}$  та  $\omega_{max}$ .

4. Розрахувати за формулами (3), (4) та (6) оцінки  $\hat{k}, \hat{T}$  і  $\hat{m}_d$ .

Для моделювання процесу ідентифікації було створено модель судна з автостерновим. Збурення на вхід системи було подано у виді імпульсу, інтервал дискретизації при вимірюваннях складає  $\Delta t = 0,01$ с (частота дискретизації 100 Гц). Максимальний рівень збурювального моменту відповідає відхиленню стерна на  $2^\circ$ .

На рис. 1, а, б наведено результати ідентифікації сталої часу  $T$  та квазістационарного збурювального моменту  $m_d$  за різних значень амплітуди задавальної дії  $u_p$  у вигляді синусоїди та прямокутних імпульсів періодом 32 с. Ідентифіковане значення коефіцієнта передачі складає в обох випадках  $k = 0,0779 \text{ с}^{-1}$ , відносна похибка  $\epsilon_k = -2,65 \%$ .

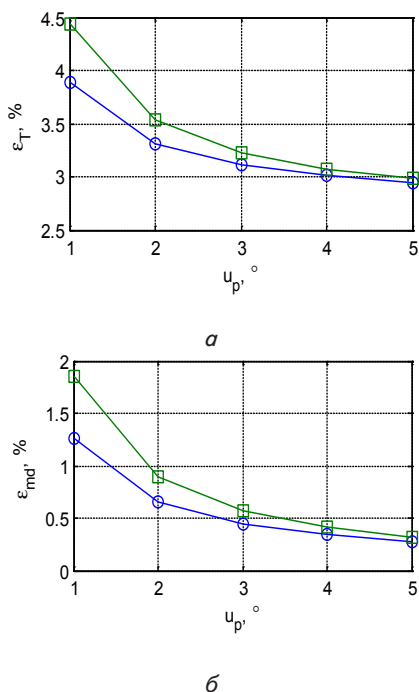


Рис. 1. Похибка ідентифікації (за модулем): а – сталої часу  $\epsilon_T$ ; б – збурюючого моменту  $\epsilon_{md}$ ;  $\ominus$  – задавальна дія – синусоїда,  $\boxplus$  – задавальна дія – прямокутні імпульси

Як видно з рис. 1, а, б, точність ідентифікації при застосуванні прямокутного імпульсу і синусоїди відрізняється незначно. Більш того, достатня для практичного застосування підходу точність ( $< 5 \%$ ) досягається вже при задавальній дії в  $1^\circ$ . Отже, при застосуванні запропонованого підходу, на відміну від ідентифікації за методикою для ходових випробувань з використанням зигзагу, кут відхилення стерна можна брати малим (порядку градуса), і так само малим залишиться відхилення судна від заданого курсу внаслідок керуючої дії. Згідно вимог ІМО таке відхилення судна під управлінням автостернового не повинно перевищувати  $1^\circ$  при бальності моря до 3 балів і не більше  $3^\circ$  – при бальності до 6 балів. Щоб забезпечити відхилення судна від заданого курсу в межах норми, прямокутні імпульси задавальної дії слід задавати симетричними не відносно нуля, а відносно значення  $u_0$ , при якому стерно повністю компенсує дію збурювального моменту  $m_d$ . Значення  $u_0$  можна підібрати експериментально або визначити з сигналу датчика кута перекладки до початку процесу ідентифікації.

При практичному застосуванні запропонованого підходу можна запропонувати визначати досягнення заданої точності ідентифікації за допомогою оцінки різниці значень, ідентифікованих у двох послідовних

циклах, і завершенні ітеративного процесу при досягненні заданого значення різниці.

## 6. Випробування запропонованого підходу

Для перевірки теоретичних положень статті було проведено випробування автостернового, що реалізує запропонований підхід, на суховантажному теплоході змішаного плавання проекту 1565 «Волго-Дон макс».

Випробування проходили в Чорному морі, умови плавання: судно навантажено, швидкість ходу 6–9 вузлів, бальність моря – 3 бали. Як задавальну дію було вибрано імпульс тривалістю  $20 \pm 0,1$  секунд, амплітуда імпульсу задавалась шляхом автоматичної зміни заданого курсу судна автостерновим з кроком  $0,5^\circ$ . Період хитавити при випробуваннях складав близько 10 с.

Результати ідентифікації параметрів математичної моделі судна у різних умовах руху та оцінки математичного сподівання й дисперсії цих параметрів при вимиканні зони нечутливості автостернового наведено в табл. 1.

Оцінку математичного сподівання  $\bar{x}$  параметра моделі  $x$  та її середньоквадратичного відхилення (с.к.в.)  $s_x$  обчислено за формулами [13]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \tag{7}$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \tag{8}$$

де  $n$  – кількість циклів ідентифікації,  $x_i$  – ідентифіковане значення в  $i$ -му циклі.

Таблиця 1

Результати ідентифікації

Параметр		Швидкість руху, вузлів		
		6	8	9
$T, \text{ с}$	Мат. сподівання	24,647	19,731	17,778
	с.к.в.	1,000	0,791	0,680
$k, \text{ с}^{-1}$	Мат. сподівання	0,0130	0,0135	0,0140
	с.к.в. $\times 10^{-4}$	2,470	1,619	2,573
$m_d \times 10^{-6} \text{ с}^{-2}$	Мат. сподівання	10,107	10,124	10,114
	с.к.в.	0,312	0,291	0,267

За результатами випробувань алгоритм ідентифікації досягав заданої точності в  $5 \%$  при  $\Delta\Psi = 1,5^\circ - 4,0^\circ$ , що є допустимим при русі в рамках обмежень, накладених міжнародним коридором. С.к.в. визначеної сталої часу складає не більше 1 с, що є достатнім для синтезу регулятора автостернового за підходом, запропонованим в [14, 15]. Таким чином, описаний в роботі підхід до ідентифікації є придатним для застосування в реальних умовах.

---

## 7. Висновки

---

В роботі запропоновано підхід до ідентифікації параметрів моделі судна і збурень, заснований на застосуванні спектрального аналізу. На відміну від існуючих, запропонований підхід дозволяє отримати параметри математичної моделі не проводячи обчислення повної оцінки передатної функції, причому за результатами випробувань за малих значень кута відхилення стерна. Математичне моделювання підходу

показало, що достатню для практичного застосування точність (<5 %) можна отримати навіть при малих кутах відхилення стерна (порядку 1–3°) і відхиленні від заданого курсу. Випробування запропонованого підходу на судні довели його працездатність; точність в досягнуто в 5 % при відхиленні від заданого курсу 1,5°–4,0°.

Подальші дослідження будуть присвячені вивченню особливостей практичного застосування запропонованого підходу до ідентифікації.

---

## Література

1. Roberts, G. N. Trends in marine control systems [Text] / G. N. Roberts // Annual Reviews in Control. – 2008. – Vol. 32, Issue 2. – P. 263–269. doi: 10.1016/j.arcontrol.2008.08.002
2. Юдин, Ю. И. Метод расчёта параметров математической модели судна [Текст] / Ю. И. Юдин, А. Н. Гололобов, А. Г. Степахно // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 5–9.
3. Пелевин, А. Е. Идентификация параметров модели морского подвижного объекта при периодическом движении с активным управлением [Текст] / А. Е. Пелевин // Гироскопия и навигация. – 2008. – № 4 (63). – С. 29–44.
4. Aisjah, A. S. An Analysis Nomoto Gain and Norbin Parameter on Ship Turning Maneuver [Text] / A. S. Aisjah // IPTEK: The Journal for Technology and Science. – 2010. – Vol. 21, Issue 2. – P. 60–66. doi: 10.12962/j20882033.v21i2.31
5. Casado, M. H. Identification of the nonlinear ship model parameters based on the turning test trial and the backstepping procedure [Text] / M. H. Casado, R. Ferreiro // Ocean Engineering. – 2005. – Vol. 32, Issue 11–12. – P. 1350–1369. doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.11.003
6. Banazadeh, A. Frequency domain identification of the Nomoto model to facilitate Kalman filter estimation and PID heading control of a patrol vessel [Text] / A. Banazadeh, M. T. Ghorbani // Ocean Engineering. – 2013. – Vol. 72. – P. 344–355. doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.07.003
7. Олійник, П. Б. Побудова математичної моделі системи керування судном на основі ідентифікації параметрів судна з метою визначення законів керування [Текст] / П. Б. Олійник, В. М. Теут // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – № 1 (13). – С. 28–36.
8. Шейхот, А. К. Совершенствование систем управления морскими подвижными объектами на основе идентификации и адаптации [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. К. Шейхот. – ФГОУ ВО «Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского». – Владивосток, 2008. – 24 с.
9. Elkaim, G. H. System identification-based control of an unmanned autonomous wind-propelled catamaran [Text] / G. H. Elkaim, // Control Engineering Practice. – 2009. – Vol. 17, Issue 1. – P. 158–169. doi: 10.1016/j.conengprac.2008.05.014
10. Справочник по теории корабля: в 3-х т. Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания [Текст] / под ред. Я. И. Войкутинского. – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.
11. Гроп, Д. Методы идентификации систем [Текст] / Д. Гроп. – М., «Мир», 1979. – 302 с.
12. Ivanov, S. V. Identification of ship model and disturbance parameters using spectral analysis [Text] / S. V. Ivanov, V. M. Teut, P. B. Oliynyk // Journal of Chinese Inertial Technology. – 2013. – Vol. 3. – P. 341–346.
13. Дорош, А. К. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посіб. [Текст] / А. К. Дорош, О. П. Коханівський. – К.: НТУУ «КПІ», 2006. – 268 с.
14. Иванов, С. В. Модифікація методики синтезу адаптивного автостернового з заданою динамічною похибкою [Текст] / С. В. Иванов, П. Б. Олійник, В. М. Теут // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – Т. 6, № 4 (60). – С. 22–26. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/5678/5108>
15. Иванов, С. В. Дослідження робастності та стійкості спроектованого автостернового [Текст] / С. В. Иванов, П. Б. Олійник, В. М. Теут // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2012. – № 4. – С. 18–25.