

Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень

Левінський Максим Валерійович¹, Левінський Валерій Михайлович²
НУ «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна¹
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Україна²
E-mail: MaxLevinskyi@gmail.com¹, ValeryLevinskyi@gmail.com²

Choosing parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances

Levinskyi Maksym Valerievich¹, Levinskyi Valeriy Mihailovich²
National University «Odessa Maritime Academy», Odessa, Ukraine¹
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine²
E-mail: MaxLevinskyi@gmail.com¹, ValeryLevinskyi@gmail.com²

Резюме – Наведені результати оптимального параметричного синтезу регулятора та проведена перевірка систем на зрубість до змін параметрів судна.

Приведені приклади функціонування систем при дії неконтрольованих водно-хвильових збурень випадкового характеру та можливість зменшення їх впливів на інтенсивність та частоту зміни керуючої дії регулятора за рахунок включення в структуру системи фільтра низької частоти та ланки з зоною нечутливості.

Abstract – Results of the optimal parametric synthesis of the controller are presented, checking the systems' robustness towards changing vessel's parameters was carried out.

Examples of: system functioning under the influence of non-controllable water-wave disturbances of the stochastic character and the possibility of reducing this influence on the intensity and frequency of the controller control action change by the inclusion low pass filter and link with dead-band zone in the system were presented.

DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40

Сучасні системи автоматичного керування курсом (САКК) судна дозволяють зменшити втрати ходового часу та знизити витрату палива за рейс у порівнянні із ручним керуванням. Більшість відомих систем використовують у своєму складі класичні ПІД-регулятори і засновані на принципі стабілізації «за відхиленням». Розвиток сучасних систем іде в напрямку застосування адаптивних алгоритмів, які дозволяють враховувати зміни динаміки судна в залежності від завантаження та зміни зовнішніх впливів. При цьому надається можливість гнучко перебудовувати структуру, параметри та режими роботи систем [1, 2, 3].

Вдосконалення алгоритмів САКК передбачає оптимізацію параметрів ПІД-регулятора [4], використання систем з компенсацією контрольованого вітрового збурення [5], систем, частково інваріантних до неконтрольованих вітро-хвильових збурень [6], застосування алгоритмів нечіткої логіки [7], нейронних мереж [8].

При моделюванні САКК використовують спрощені математичні моделі судна як об'єкту керування, а саме лінійні моделі Номото першого і другого порядку, які описують динаміку судна при невеликих відхиленнях курсового кута ψ судна від справжнього курсу [1, 9]:

$$T \frac{dr}{dt} + r = Kq; \quad (1)$$

$$T_1 T_2 \frac{d^2 r}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dr}{dt} + r = K \left(q + T_3 \frac{dq}{dt} \right), \quad (2)$$

де $r = d\psi/dt$ – швидкість зміни курсового кута ψ судна, град/с; q – кут перекладки керма, град; T_1, T_2, T_3 – постійні часу, які залежать від конструкційних характеристик судна, с; K – коефіцієнт передачі, град (ψ)/(град (q))·с).

Із (1), (2) можна отримати передатні функції судна як об'єкту керування в САКК по каналу « $q - \psi$ »:

$$W(s) = \frac{\Psi(s)}{q(s)} = \frac{K}{s(Ts + 1)}, \quad (3)$$

$$W(s) = \frac{\Psi(s)}{q(s)} = \frac{K(T_3 s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (4)$$

Очевидно, що кут перекладки керма $q(t)$ пропорційний керуючій дії регулятора $u(t)$.

Перша проблема - використання моделей (3), (4), наприклад, в програмах пошуку оптимальних значень регулятора САКК, може дати результати, які не забезпечують грубість системи до змін параметрів судна як об'єкту керування (ОК), що продемонстровано в п. 5 даної статті.

Друга проблема - застосування САКК неефективне при водно-хвильових збуреннях, що діють на судно, бо різко збільшується частота перемикань кермового механізму у порівнянні з ручним керуванням. Це приводить до передчасного зношування кермового механізму. Для подолання цього недоліка застосовують різні методи, в тому числі збільшують зону нечутливості регулятора САКК та включають до її складу фільтр низької частоти (ФНЧ), який придушує інтенсивність високочастотних складових в вимірних значеннях регульованої змінної [2]. Однак поява додаткових інерційностей в замкнутому колі системи викликає зменшення запасу її стійкості, що потребує переналаштування параметрів регулятора та коректного, усвідомленого вибору частоти зрізу ФНЧ.

Мета і завдання дослідження – розглянути приклади аналізу і синтезу систем стабілізації курсу судна, а саме:

провести оптимальний параметричний синтез регулятора з відомою і запропонованою моделями судна та порівняти грубість систем керування з отриманими параметрами регулятора до змін параметрів судна;

продемонструвати вплив неконтрольованих водно-хвильових збурень на інтенсивність та частоту змін керуючої дії регулятора, розглянути технічні рішення, які дозволяють зменшити цей вплив.

В якості методу дослідження обрано моделювання САКК в середовищі Simulink [10]. Додатково до моделей (3), (4) пропонується розглянути моделі на їх базі з додаванням ланки запізнення, що дає змогу врахувати затримку по каналу керування курсом судна $u(t) - \psi(t)$. Можливість та доцільність такої пропозиції обговорюється у пункті 6 цієї статті. Зокрема при імітаційному моделюванні розглядалась наступна передатна функція судна:

$$W_{OK}(s) = \frac{\Psi(s)}{u(s)} = \frac{K(T_3s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau s} = \frac{0,175(18,5s + 1)}{s(118s + 1)(7,5s + 1)} e^{-5s}, \quad (5)$$

в якій параметри K, T_1, T_2, T_3 взяті із [11] і відповідають контейнеровозу довжиною 170 м, водотоннажністю 18500 тон, який рухається із швидкістю 15 вузлів. Запізнення в моделі прийнято $\tau=5$ с.

Оптимальний параметричний синтез (ОПС) налаштувань ПД-регулятора системи проводився за критерієм:

$$J = \int_0^t \left(e(t) + k \frac{d|e(t)|}{dt} \right) dt \rightarrow \min,$$

де $e(t) = \psi_z - \psi(t)$ – відхилення поточного курсового кута $\psi(t)$ від його заданого значення ψ_z ; k – коефіцієнт штрафу зміни швидкості $e(t)$,

який вводиться для зменшення коливальності перехідних процесів в системі керування, а отже і зменшення числа переключень кермового механізму.

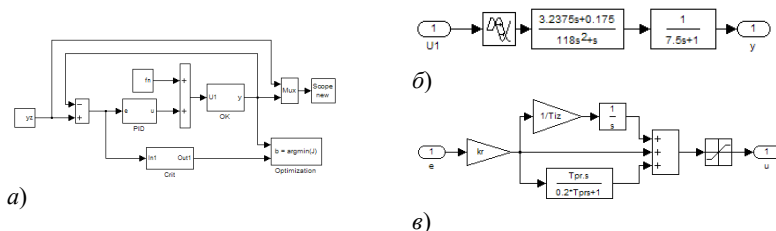


Рис. 1. Схеми моделювання: а) – САКК базової структури; б) – судна; в) – ПІД-регулятора

В якості неконтрольованого збурення був використаний стрибко-подібний сигнал $f_n(t)=0 \rightarrow 10\%$, приведений до входу ОК в сумі з керуючою дією.

Результати ОПС САКК при дії неконтрольованого збурення $f_n(t)=0 \rightarrow 10\%$ наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати синтезу налаштувань ПІД-регулятора за каналом збурень

Найменування параметру	Для моделі (4)	Для моделі (5)
Коефіцієнт передачі k_r , град (ψ)/%	2429,61	4,7
Час іздрому T_{iz} , с	1,51	27,13
Час упередження T_{pr} , с	0,43	8,39
Критерій J , град (ψ)·с	0,23	212

Перевірка САКК на грубість проводилася при зміні параметру K моделі судна на $\pm 20\%$ від його номінального значення $K=0,175$ град (ψ)/(% · с).

Як свідчать результати перевірки, система, побудована на базі моделі (4), виявилася негрубою до змін параметрів моделі судна, бо отримані за результатами ОПС параметри регулятора не забезпечують її стійкості (рис. 2, а). А система, побудована на базі моделі (5) виявилася грубою, бо така сама зміна параметрів ОК не вплинула на її працездатність, вона залишилась стійкою, хоча дещо погіршились показники якості (рис. 2, б).

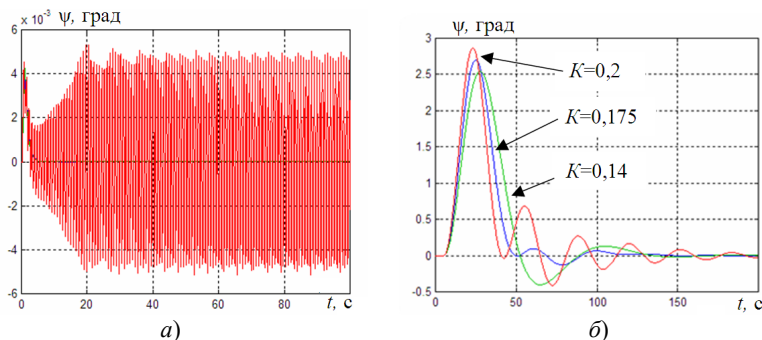


Рис. 2. Результати перевірки САКК на грубість: а) – для моделі (4); б) – для моделі (5)

Для аналізу руху САКК з моделлю (5) за каналом завдання, наприклад, при маневрі обходу перешкоди, проведений ОПС налаштувань ПД-регулятора для випадків, коли $f_n(t)=0$ та $f_n(t=225\text{ с})=0 \rightarrow 10\%$.

Таблиця 2

Результати синтезу налаштувань ПД-регулятора за каналом завдання

Найменування параметру	Для $f_n(t)=0$	Для $f_n(t=225\text{ с})=0 \rightarrow 10\%$
Коефіцієнт передачі k_r , град ψ /%	3,73	4,38
Час ізодрому T_{iz} , с	133,74	48,18
Час упередження T_{pr} , с	8,45	8,51
Критерій J , град ψ ·с	294	569

Як свідчать результати ОПС, при відсутності неконтрольованих збурень внесок І-складової в керуючу дію регулятора зменшується, а для компенсації впливу на регульовану змінну $\psi(t)$ постійної складової неконтрольованого збурення $f_n(t)=10\%$ значення часу ізодрому T_{iz} зменшується, тобто І-складова зростає. Ці експерименти підтверджують доцільність адаптації параметрів регулятора САКК до умов плавання.

Аналіз САКК при дії неконтрольованих збурень випадкового характеру бажано розпочати з розгляду амплітудо-частотної характеристики (АЧХ) замкнутої системи у випадку, коли випадкова складова $f_n(t)$ приведена в моделі системи до виходу ОК. Із рис. 4, а видно, що система здатна частково компенсувати вплив на регульовану змінну

$\psi(t)$ зовнішніх збурень $f_n(t)$ в діапазоні частот $0 \dots 0,09$ рад/с або $0 \dots 0,014$ гц. Власний рух системи сконцентрований в діапазоні $0 \dots 0,4$ рад/с, резонансна частота спостерігається на значенні $0,18$ рад/с.

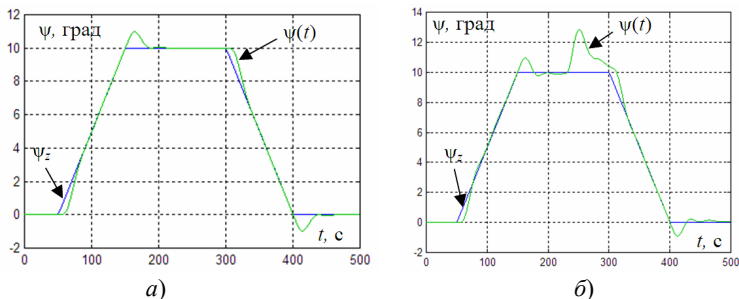


Рис. 3. Рух САКК при зміні заданого курсу: а) – при $f_n(t) = 0$; б) – при $f_n(t = 225 \text{ с}) = 0 \rightarrow 10\%$

За даними [12], середня частота морського хвилювання визначається за залежністю $\omega \approx 2\pi/3,1\sqrt{h}$, де h – імовірна висота хвилі в метрах. Відповідно для хвилювання висотою $0,25 \dots 12$ метрів ($1 \dots 9$ балів) діапазон частот складає $\omega = 4,05 \dots 0,58$ рад/с. Таким чином, морське хвилювання можна віднести до високочастотних збурень $f_n(t)$, вплив яких на регульовану змінну базова система за рис. 1 компенсувати не може в принципі.

Для моделювання випадкової складової цих збурень в середовищі Simulink обрано формуючий фільтр з передатною функцією

$$W_f(s) = \frac{k_f}{T_f^2 s^2 + 2\xi T_f s + 1} = \frac{0,25}{s^2 + 0,5s + 1},$$

на який подається сигнал із генератора псевдобілого шуму. АЧХ фільтра $W_f(s)$ наведена на рис. 4, б.

Щоб зберегти працездатність САКК при дії на неї морського хвилювання, необхідно вдосконалити структуру системи [2]. А саме на виході датчика, що вимірює поточні значення регульованої змінної $\psi(t)$, встановити фільтр низьких частот (ФНЧ), а перед входом ПД-регулятора встановити ланку з зоною нечутливості (див. схему моделювання на рис. 5).

ФНЧ частково видалить із вимірів регульованої змінної $\psi(t)$ високочастотні складові, обумовлені впливом збурення $f_n(t)$. В якості тако-

го фільтра можна обрати, наприклад, ФНЧ Баттерворта другого порядку з передатною функцією

$$W_b(s) = \frac{\omega_b^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_b s + \omega_b^2} = \frac{0,5^2}{s^2 + 1,41 \cdot 0,5s + 0,5^2},$$

де $\omega_b = 0,5$ рад/с – частота зрізу. Саме при такій частоті фільтр пропускає частоти власного руху системи і подавляє вплив на регульовану змінну $\psi(t)$ випадкової складової неконтрольованих збурень $f_n(t)$.

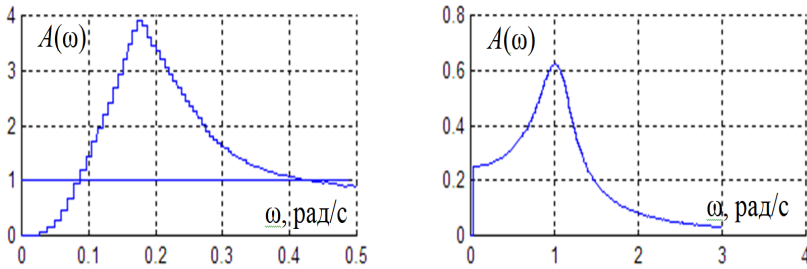


Рис. 4. Амплітудо-частотні характеристики:
а) – САКК; б) – фільтра $W_f(s)$, що формує випадкову складову $f_n(t)$

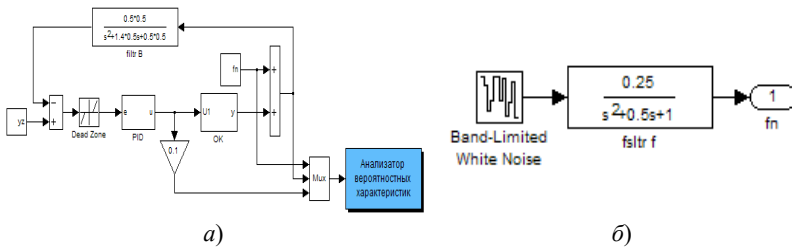


Рис. 5 Схеми моделювання: а) – САКК вдосконаленої структури;
б) – формуючого фільтра $W_f(s)$

Але оскільки фільтр входить у замкнуте коло системи, то це може порушити її стійкість. Щоб система залишилась стійкою, виникла необхідність скоригувати налаштування ПІД-регулятора. Додатковий ОПС дав наступні результати: $k_r=1$; $T_{iz}=200$; $T_{pr}=15$.

Ефективність фільтрації перевірена моделюванням, результати якого представлені на рис. 6. На цьому рисунку червоний колір графіків та цифр відповідає збуренню $f_n(t)$, синій – регульованій змінній

$\psi(t)$, а чорний – керуючий дії з виходу регулятора $u(t)$.

САКК базової структури виявилася практично непрацездатною під дією $f_n(t)$, оскільки інтенсивність і частота зміни $u(t)$ досить високі (рис. 6, а). На графіках оцінка спектральної щільності $u(t)$ значно переважає оцінки інших процесів і має яскраво виражені максимуми на резонансній частоті системи в околиці 0,2 рад/с та на превалюючій частоті формуючого фільтра в околиці 1 рад/с.

В САКК вдосконаленої структури з ФНЧ (без ланки з зоною нечутливості) за рахунок фільтрації $\psi(t)$ вдалося суттєво зменшити інтенсивність коливань $u(t)$ – оцінка середньоквадратичного відхилення зменшилася з 0,57 до 0,053 % (рис. 6, б). Зменшилася і частота $u(t)$ – оцінка середньоквадратичної частоти зменшилася з 1,2 рад/с до 0,7 рад/с. Але цього недостатньо для практичного застосування, бо кермовий механізм буде змушений перемикатися приблизно кожні 9 с.

Тому, крім ФНЧ, в структуру САКК при моделюванні була включена і ланка з зоною нечутливості (на рис. 5 Dead Zone з параметром $\pm 0,25$ град). Після цього оцінка середньоквадратичного відхилення $u(t)$ стала 0,0053 %, а середньоквадратичний період збільшився до 54 с (рис. 6, в), тобто система стала цілком працездатною. Подальше збільшення параметру зони нечутливості небажане через зниження динамічної точності системи.

Слід відзначити, що рух судна описують системами нелінійних диференційних рівнянь. Намагання отримати більш прості моделі, придатні для застосування на практиці, привело до появи спеціалізованих моделей Номото, Фоссена, Норбіна та ін. [1, 6, 9]. Щоб в певній мірі врахувати структурну невизначеність цих моделей, доцільно ввести до їх складу ланку запізнення. Такий підхід давно і продуктивно застосовують для опису технологічних процесів як об'єктів керування [13]. Запізнення, яке додається до моделей першого або другого порядків при переході від моделей, які описані диференційними рівняннями високого порядку, називають ємкісним. Таке запізнення, наприклад, враховували в своїй моделі судна автори роботи [14]. Інший тип – транспортне запізнення може виникнути при передачі керуючої дії від регулятора до керма через конструктивні особливості керуючого механізму. Саме таке запізнення використано в моделях суден авторами робіт [15, 16].

Якщо не накладати додаткових обмежень на діапазон зміни параметрів регулятора, то оптимальний параметричний синтез за моделлю судна (4) з використанням відомих програм пошуку оптимуму із пакету MATLAB [10] може дати фізично необґрунтовані результати, що продемонстровано на рис. 2, а.

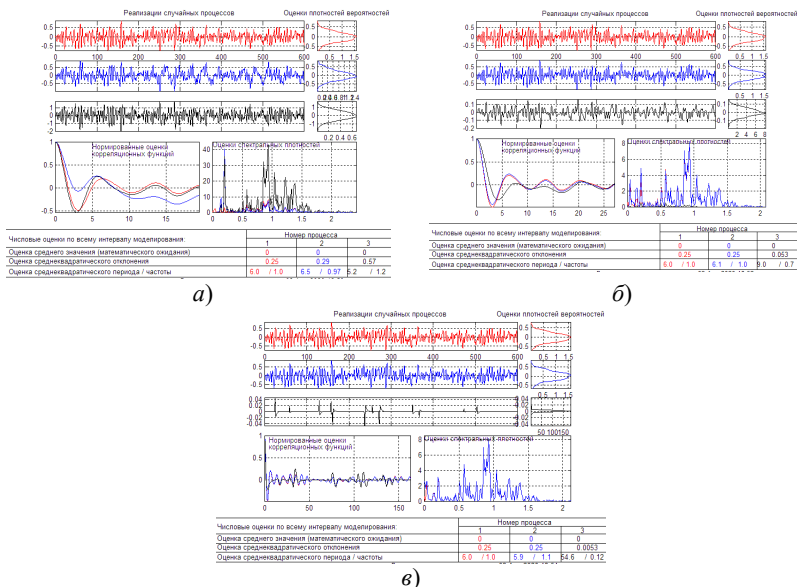


Рис. 6. Імовірнісні характеристики випадкових процесів за результатами моделювання: а) – САКК базової структури; б) – САКК вдосконаленої структури з фільтром ФНЧ; в) – САКК вдосконаленої структури з фільтром ФНЧ та з зоною нечутливості

Якщо ж за результатами ідентифікації динаміки судна краще використати модель (5), то програми оптимізації можна використовувати без необхідності накладання додаткових обмежень. Отримані налаштування параметрів регулятора при цьому забезпечують грубість системи до змін параметрів моделі судна (рис. 2, б). Імітаційне моделювання систем з моделями (4) і (5) проводилося за однакових умов.

Додатково слід підкреслити, що модель (5) описує наскрізний канал $u(t) - \psi(t)$, а це дозволяє проводити параметричну ідентифікацію цієї моделі експериментальним шляхом. Якщо ж користуватися моделями (3), (4) та додатково моделлю кермового механізму, то визначення параметрів цих моделей у такий спосіб ускладнюється.

Використання ФНЧ та збільшення зони нечутливості регулятора для зменшення впливу неконтрольованого збурення на вимірює значення регульованої змінної відоме, наприклад, з [2]. В даній статті лише вказана практична рекомендація з вибору частоти зрізу ФНЧ, а саме вона повинна бути більша, ніж максимальна частота власного

руху системи і менша, ніж мінімальна частота випадкової складової регульованої змінної, яка викликана дією неконтрольованих водно-хвильових збурень.

Матеріал статті може бути корисним для побудови адаптивних систем, які здатні переналаштовувати параметри ПІД-регулятора, ФНЧ, ланки з зоною нечутливості до зміни параметрів морського хвилювання.

Висновки

Пошук оптимальних параметрів регулятора системи стабілізації курсу слід проводити з наступною перевіркою на грубість системи.

Зменшити частоту перемикань кермового механізму до прийнятного на практиці рівня можливо за рахунок збільшення зони нечутливості регулятора та включення до складу системи фільтра низької частоти. Його частоту зрізу слід обирати більшою, ніж максимальна частота власного руху системи і меншою, ніж мінімальна частота випадкової складової регульованої змінної, яка викликана дією неконтрольованих водно-хвильових збурень.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судов. Одесса: Транслит, 2007. – 376 с.
2. Острецов Г.Є., Клячко Л.М. Методы автоматизации управления движением корабля. М.: ООО "Физматлит", 2009. – 120 с.
3. State-of-the-Art Research on Motion Control of Maritime Autonomous Surface Ships / Le Wang and other. Marine Science and Engineering. – 2019. – Vol. 7. P. 1 – 31.
4. Богданов В.И, Попорин С.А. Оптимизация параметров судового ПИД-регулятора с помощью генетического алгоритма. URL: <http://lib.sevsu.ru:8080/jspui/bitstream/123456789/1597/1/optimiz.7.2004.184-189.pdf> (дата звернення 03.09.2020).
5. Тимченко В.Л. Куклина Е.А. Система стабилизации движения судна на заданном курсе с компенсацией ветрового возмущения // Вісник НУК ім. Макарова. – 2012. – №4. – С. 266 – 271.
6. Система стабілізації курсу морського судна, частково-інваріантна до вітро-хвильових навантажень / Волянська Я.Б. та ін. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2018. – V. 10. – Issue 2. – С. 57 – 63.
7. URL: https://www.researchgate.net/publication/233497068_A_uzzy_rack-keeping_autopilot_for_ship_steering (дата звернення 03.09.2020).

8. Ming-Chung Fang, Zi-Yi Lee. Application of neuro-fuzzy algorithm to portable dynamic positioning control system for ships. // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2016. – № 8. – P. 38 – 52.

9. K. Nomoto, K. Taugchi, K. Honda, and S. Hirano, “On the steering qualities of ships,” Int. Shipbuilding Progr. 1957. Vol. 4, P. 354–370, URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjasnaoe1952/1957/101/1957_101_57/_pdf/-char/en (дата звернения 03.09.2020).

10. Дьяконов В. Simulink 5/6/7: самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.

11. Виткалов Я.В. Исследование проблем синтеза нейросетевого контроллера в задаче управления курсом судна. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19/ Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 2006. – 25 с.

12. Поляков К.Ю. Теория автоматического управления. Часть II. Управление при случайных возмущениях. Оптимальные линейные системы. – Санкт-Петербург, 2009. – 59 с. URL: <http://kpolyakov.spb.ru/uni/teapot.htm> (дата звернения 03.09.2020).

13. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения. – Одесса: ТЭС, 2008. – 306 с.

14. XIE Wenbo, FU Mingyu, DING Fuguang, ZHANG Jian. Robust sliding mode control of dynamic positioning vessel with control input time-delay. //Journal of Harbin Engineering University. – 2013. – V. 34. – №10. – P. 1 – 6.

15. Evgeny I. Veremey, Sergei V. Pogozhev and Margarita V. Sotnikova. Marine Autopilots' Multipurpose Control Laws Synthesis for Actuators Time Delay. ///Journal of Marine Science and engineering. – 2020. – №8. – P. 1 – 15.

16. Adaptive Fuzzy Control for Dynamic Positioning Ships with Time-delay of Actuator/ Guoqing Xia and other. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7761043> (дата звернения 03.09.2020).

Аннотация – Актуальность. Современные системы автоматического управления курсом судна позволяют уменьшить потери ходового времени и снизить расход топлива за рейс по сравнению с ручным управлением. Эффективность их применения зависит от своевременной настройки параметров регулятора вслед за изменениями динами-

ки судна, что требует использования адекватных моделей и определенной квалификации обслуживающего персонала.

Цель. Привести примеры анализа и синтеза систем стабилизации курса судна, а именно:

- провести оптимальный параметрический синтез регулятора с известной и предложенной моделями судна и сравнить грубость систем управления с полученными параметрами регулятора к изменению параметров судна;

- продемонстрировать влияние неконтролируемых водно-волновых возмущений на интенсивность и частоту изменений управляющего воздействия регулятора, рассмотреть технические решения, которые позволяют уменьшить это влияние.

Метод. В качестве метода исследования выбрано моделирование системы автоматического управления курсом судна в среде Simulink.

Результаты. Приведены результаты оптимального параметрического синтеза регулятора и проведена проверка систем на грубость к изменениям параметров судна.

Приведенные примеры функционирования систем при воздействии неконтролируемых водно-волновых возмущений случайного характера и возможность уменьшения их влияния на интенсивность и частоту смены управляющего действия регулятора за счет включения в структуру системы фильтра низкой частоты и звена с зоной нечувствительности.

Выводы. Поиск оптимальных параметров регулятора системы стабилизации курса следует проводить с последующей проверкой на грубость системы к изменениям параметров модели судна.

Уменьшить частоту переключений рулевого механизма до приемлемого на практике уровня возможно за счет увеличения зоны нечувствительности регулятора и включения в состав системы фильтра низкой частоты. Его частоту среза следует выбирать больше, чем максимальная частота собственного движения системы и меньше, чем минимальная частота случайной составляющей регулируемой переменной, которая вызвана действием неконтролируемых водно-волновых возмущений.

Анотація – Актуальність. Сучасні системи автоматичного керування курсом судна дозволяють зменшити витрати ходового часу та знизити витрату палива за рейс у порівнянні із ручним керуванням. Ефективність їх застосування залежить від своєчасного налаштування параметрів регулятора слідом за змінами динаміки судна, що потребує використання адекватних моделей та певної кваліфікації

обслуговуючого персоналу.

Мета. Навести приклади аналізу і синтезу систем стабілізації курсу судна, а саме: провести оптимальний параметричний синтез регулятора з відомою і запропонованою моделями судна та порівняти грубість систем керування з отриманими параметрами регулятора до змін параметрів судна; продемонструвати вплив неконтрольованих водно-хвильових збурень на інтенсивність та частоту змін керуючої дії регулятора, розглянути технічні рішення, які дозволяють зменшити цей вплив.

В якості методу дослідження обрано моделювання системи автоматичного керування курсом судна в середовищі Simulink.

Результати. Наведені результати оптимального параметричного синтезу регулятора та проведена перевірка систем на грубість до змін параметрів судна.

Приведені приклади функціонування систем при дії неконтрольованих водно-хвильових збурень випадкового характеру та можливість зменшення їх впливів на інтенсивність та частоту зміни керуючої дії регулятора за рахунок включення в структуру системи фільтра низької частоти та ланки з зоною нечутливості.

Висновки. Пошук оптимальних параметрів регулятора системи стабілізації курсу слід проводити з наступною перевіркою на грубість системи.

Зменшити частоту перемикань кермового механізму до прийнятного на практиці рівня можливо за рахунок включення до складу системи ланки з зоною нечутливості та фільтра низької частоти. Його частоту зрізу слід обирати більшою, ніж максимальна частота власного руху системи і меншою, ніж мінімальна частота випадкової складової регульованої змінної, яка викликана дією неконтрольованих водно-хвильових збурень.

Annotation – Topicality. Modern vessel's course automatic control systems allow to reduce ship's running time and fuel consumption during voyage compared to manual operation. Effectiveness of their implementation depends on the timely adjustment of the controller parameters following the changes in the vessel's dynamics, which requires usage of adequate models and qualification of the maintenance stuff.

Goal. To present examples of synthesis and analysis of vessel's course automatic control system, namely:

– to carry out optimal parametric synthesis of the controller with known and proposed models of the vessel and compare robustness of the control systems with obtained controller parameters towards to changing

vessel's parameters;

– to demonstrate the influence of non-controllable water-wave disturbances on the intensity and frequency of the controller control action changes, to examine technical approaches, which allow to reduce this influence.

Method. Vessel's course automatic control system modelling in Simulink was chosen as a research method.

Results. Results of the optimal parametric synthesis of the controller are presented, checking the systems' robustness towards changing vessel's parameters was carried out.

Examples of: system functioning under the influence of non-controllable water-wave disturbances of the stochastic character and the possibility of reducing this influence on the intensity and frequency of the controller control action change by the inclusion low pass filter and link with dead-band zone in the system were presented.

Conclusions. Searching for optimal parameters of the vessel's course stabilization control system controller parameters must be done with the following checking of the system for robustness to changing parameters of the vessel model.

Reducing the frequency of steering gear switching to acceptable in practice level is possible by increasing the value of the dead band zone and inclusion the low-pass filter in the system structure. Its cut-off frequency should be chosen higher than the maximum frequency of the system own motion and lower than the minimum frequency of the stochastic part of the controlled variable which is caused by the action of the non-controllable water-wave disturbances.