

Володимир Голіков¹, Катерина Сінюта²

¹Професор кафедри управління судном, Національний університет «Одеська морська академія», Україна, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна, 65052. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1591-3016>

²Асистент кафедри теорії та будови судна, Національний університет «Одеська морська академія», Україна, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна, 65052. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-6912>

* Автор, відповідальний за листування: icewater17@gmail.com

ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДНА НА КУРСІ

Управління рухом судна на курсі – важлива морська якість, що визначає ефективність керування судном. Умови довкілля, в яких необхідно вирішувати завдання з управління курсом, мають різну природу – обмежена видимість, штормова погода, обледеніння, мілководдя, припливні явища, вузькі умови, наявність інших суден тощо. Усі ці аспекти не можна комплексно розглянути традиційними математичними методами, забезпечуючи необхідну адекватність фактичного процесу.

В даній роботі освітлені існуючі підходи до управління рухом судна на курсі такі як курсовий спосіб управління, управління за збуренням, управління рухом судна на курсі на основі принципу довгострокового прогнозування, пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) закон управління (управління за відхиленням), інтелектуальні підходи до управління судами, зокрема, синергетичний підхід, використання нейронних мереж, нечіткої логіки та еволюційних (генетичних) алгоритм-мов.

Ключові слова: керованість, збурення, відхилення, ПІД-закон.

Вступ. Точність управління судном на курсі є актуальною проблемою. Дослідження в галузі управління курсом судна важливі в області управління рухом судна, в якій точність управління курсом судна завжди була актуальною проблемою. Через невизначені зовнішні впливи при керування судном викликає труднощі.

При посадці або висадці лоцмана режим маневрування судна повинен бути стійким на певному курсі; кут швартування необхідно постійно регулювати під час швартування, і для цього модель контролю стабілізації курсу повинна бути перетворена на модель контролю відстеження курсу, що означає, що контроль витримування курсу повинен бути більш точним і мультимодальним. Крім того, з поступовим просуванням досліджень інтелектуальних безпілотних комерційних суден, стабілізація курсу також має бути розширена до області маневрування в порту.

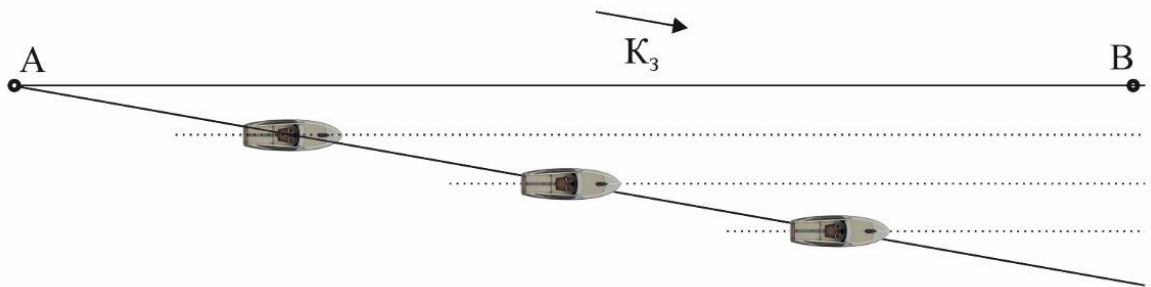
Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Велика кількість авторів присвятили свої роботи проблемі керованості судна, серед яких необхідно виділити фундаментальні роботи Г.В. Соболева, Р.Я. Першина, Ю.Л. Воробйова та Т.І. Фоссена [1-4]. Так само відомі роботи зарубіжних авторів К. Номото, Є.В. Левандовскі і І. Маккалума [5-7]. У цих роботах наведено докладний математичний опис динаміки судна і наводяться рівняння його керованості.

Мета і завдання дослідження. Мета даної статті - огляд сучасних підходів до управління судном на курсі та аналіз їх ефективності з позиції забезпечення безпеки плавання.

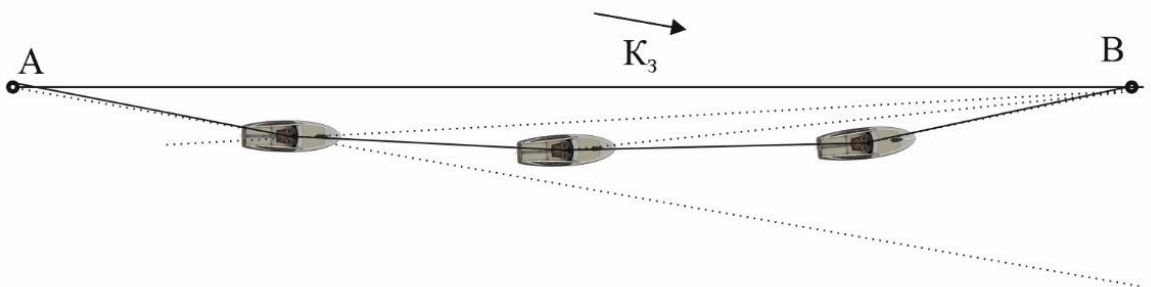
Матеріали та методи дослідження. При курсовому способі (рис 1(а)) судно управляється по компасу, без урахування зовнішніх збурень і обставин плавання, рух без судна між

путьовими точками не коригується. При такому способі відхилення від наміченого шляху відбувається за рахунок дії як зовнішніх, так і внутрішніх факторів максимально, планова траєкторія не враховується. Судно ніколи не прийде в пункт призначення, хоча він використовується на відрізках шляху між обсерваціями [8].

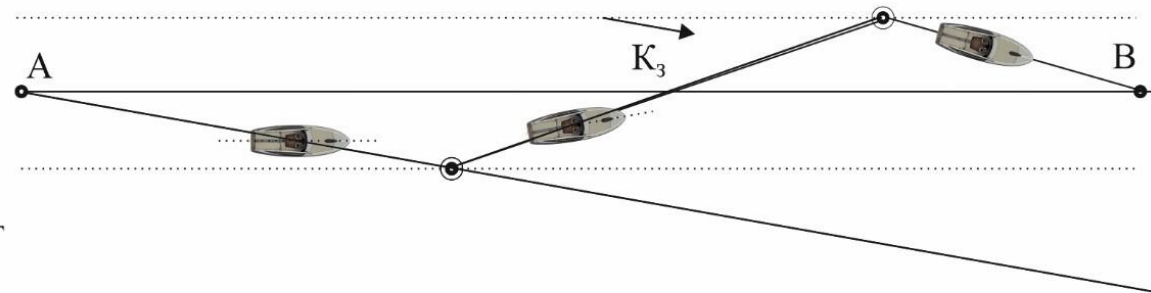
А



Б



В



Г

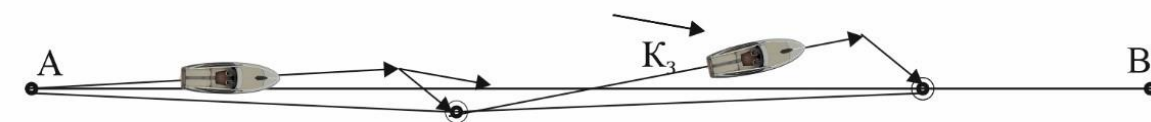


Рис. 1. А) Курсовий спосіб керування. Б) Від «WP до WP». В) За відхилення. Г) За збуренням

Режим автопроводки за маршрутом «від WP до WP» (Way point steering) (рис 1(б)) послідовно застосовується після кожного повороту на новий відрізок маршруту [9]. Тому розглянемо спочатку алгоритм управління до введеної однієї путьової точки В, починаючи від

моменту включення цього режиму в точці. Припустимо, судно слідувало курсом K_0 , було обрано функцію «з заданою кутковою швидкістю» $\Delta_t (0,1 \div 1,0 \text{ с})$ біля повороту на курс до точки В. З моменту включення режиму «Way point steering» система керування через малий інтервал часу $\Delta t (0,1 \div 1,0 \text{ с})$ починає розраховувати пеленг P_J на точку В, а також значення функції, що задає зміну курсу, згідно алгоритму:

$$\text{якщо } |P_J - K_J| > \delta \text{ то } K_{3J} = K_{3J-1} + \omega_3 \Delta_t, \quad (1)$$

$$\text{ще } K_{3J} = P_J - \gamma.$$

де δ - мала величина; K_J - значення поточного курсу.

Регулятор виробляє переключення керма для забезпечення рівності K_J та K_{3J} . Кінцем повороту вважається момент, коли в перший раз умова $|P_J - K_J| > \delta$ не виконується. Після цього за алгоритмом знаходяться значення K_{3J} для руху у напрямку до точки В. Значення пеленга на точку В у цьому випадку виправляються поправкою на кут зносу γ . Якщо судно зноситься вітром і течією, то при утриманні курсу на півдню точку траєкторія судна відхиляється від направлення на цю точку, яке було в момент закінчення повороту судна на курс до неї. Для зменшення такого відхилення слід врахувати кут зносу. Його значення може бути знайдено інтегруванням $\gamma = a_H \int (P - K) dt$, або отримано за даними прийомоіндикатора GPS. З урахуванням кута знесення на задану півдню точку направляється не ДП судна, а вектор швидкості його руху.

При курсовому по відхиленню способі (рис 1(в)) $KK_{\text{зад}} = IK_1 + \Delta K$ курс судна змінюється щоразу, коли проводиться визначення місця і встановлюється, що відбулося неприпустиме зміщення відносно планованої траєкторії. Перерахунок курсу IK_1 проводиться за поточним значенням координат і подальшої подорожньої точки, і чим частіше визначається місце, тим точніше судно вийде в намічену точку.

Для регулювання об'єктами керування, як правило, використовують типові регулятори, назви яких відповідають назвам типових ланок:

П-регулятор, пропорційний регулятор. Принцип дії полягає в тому, що регулятор виробляє керуючий вплив на об'єкт пропорційно величині помилки (чим більша помилка E , тим більший керуючий вплив Y).

І-регулятор, інтегруючий регулятор. Керування пропорційно до інтегралу від помилки.

Д-регулятор, диференціюючий регулятор. Створює керуючий вплив тільки при зміні регульованої величини. На практиці прості П, І, Д регулятори комбінуються в регулятори виду ПІ, ПД, ПІД.

Залежно від обраного вигляду регулятор може мати пропорційну характеристику (П), пропорційно-інтегральну характеристику (ПІ), пропорційно-диференціальну характеристику (ПД) або пропорційно-інтегральну (ізодромну) характеристику з впливом за похідною (ПІД-регулятор).

При пропорційному законі управління (П-регулятор) рівняння системи «АР-судно»:

$$\tau_1 \ddot{\Psi} \pm \dot{\Psi} = -k_s k_1 \Psi + M'_B, \quad (2)$$

де M'_B – наведений збурюючий момент.

Система стабілізації курсу з П-регулятором і нестійким на курсі судном непрацездатна. Для стійких на курсі суден П-регулятор є неефективним. Через невиконання ним здобуття судно

здійснює коливання щодо заданого курсу. Крім того, при дії на судно односторонніх факторів система має статичну похибку, яка пропорційна постійній складовій моменту зовнішніх сил. З названих причин П-регулятор вважається незадовільним для стабілізації курсу морських суден.

При пропорційно-диференційному законі управління (ПД-регулятор) рівняння вільного руху САУ_к має вигляд [10]

$$\ddot{\Psi} \pm 2\gamma\omega_0\dot{\Psi} + \omega_0^2\Psi = 0, \quad (3)$$

$$\text{де } \omega_0 = \sqrt{\frac{k_s k_1}{\tau_1}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k_s k_1}{\tau_1}},$$

Порівнюючи П-регулятор і ПД-регулятор для стійких на курсі суден, можна помітити, що в останньому є більше можливостей задовольнити вимоги до якості управління. Тут коефіцієнт більше в $(k_s k_1 + 1)$ раз, ніж у П-регуляторі. Це призводить до більш швидкого загасання коливань при приході до заданого курсу. При зовнішньому впливі статична похибка при ПД-законі управління, визначається тим же виразом, що і в П-регуляторі. Авторульові з ПД-законом управління знайшли практичне застосування і випускаються промисловістю.

Керуючим органом у системі автоматичного управління курсом судна (САУКС) є авторульовий. В основі його роботи лежить пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) закон управління. Сучасні АР зазвичай включають блок програм маневрів (БПМ) і регулятор, що виробляє сигнал перекладки керма залежно від помилки управління (принцип управління за відхиленням). ПІД-регулятор у сучасному розумінні був запропонований у статті Миколи Мінорського в 1922 році. Він запропонував, що можна використовувати такий керуючий вплив

$$u(t) = ke(t), \quad k > 0, \quad (4)$$

де k – деяка постійна.

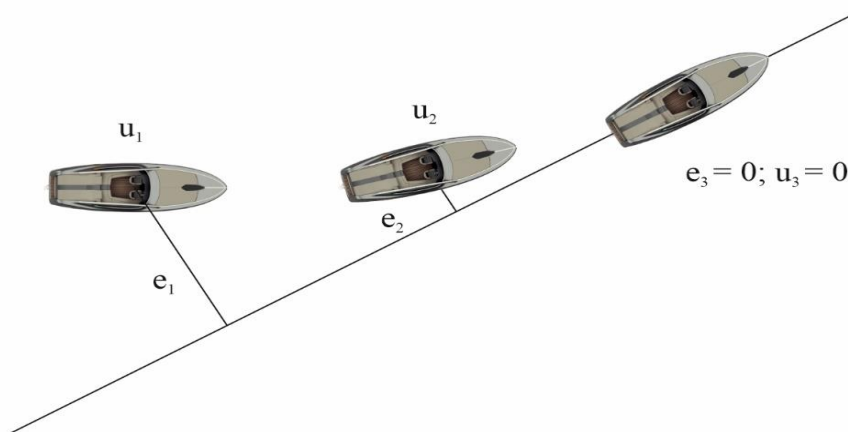


Рис. 2. Вихід судна на курс при керуванні $u(t) = ke(t)$

При ПІД-алгоритмі рівняння системи стабілізації курсу приймає вигляд:

$$\tau_1 \ddot{\Psi} \pm \dot{\Psi} = -k_s \left(k_1 \Psi + k_2 \dot{\Psi} + k_3 \int \Psi dt \right) + M'_B. \quad (5)$$

Диференціюючи це рівняння, отримуємо

$$\tau_1 \ddot{\Psi} + (k_s k_2 \pm 1) \dot{\Psi} + k_s k_1 \Psi + k_s k_3 \Psi = \frac{dM'_B}{dt}. \quad (6)$$

У режимі, що встановився $\Psi_{уст} = 0$. Система з ПД-регулятором стійка, коли всі її коефіцієнти позитивні $(k_s k_2 \pm 1) k_s k_1 > \tau_1 k_s k_3$. Статична похибка при ПД-законі дорівнює нулю $\Psi_{уст} = 0$, тобто система стабілізації курсу є астатичною.

Одним із способів підвищити якість утримання судна на курсі є управління з додатковим каналом за збуренням. Найбільш очевидним способом підвищити якість утримання на курсі представляється управління з додатковим каналом за збуренням. Такий спосіб управління потребує наявності на судні додаткових датчиків, що вимірює параметри вітру та хвилювання та передають інформацію до них до авторульової через відповідні компенсаційні ланки. Авторульовий далі на цій основі здійснює перекладку керма на кут, необхідний для усунення можливого знесення з заданого курсу, викликаного цим збуренням. Основну збурюючому дія при стабілізації на курсі надає морське хвилювання.

У відкритому морі, як показують дослідження, воно нерегулярне. Крім того, в штормову погоду на власні коливання судна на курсі накладаються вимушені коливання - нищпорення. Прямий зв'язок між виміряними значенням зовнішнього обурення і величиною кута розшукування, ним викликаного, складно розрахувати. Такий зв'язок можна визначити тільки статистичними методами за допомогою кореляційних функцій. Виникає необхідність у створенні математичної моделі для компенсації збурення кутом перекладки керма. У роботах деяких сучасних авторів, зокрема [11], досліджується можливість створення таких компенсаторів. У роботі [12] розроблений ефективний алгоритм стабілізації судна на курсі при послідовному зчисленні та обсервації руху судна. Запропоновано алгоритм обліку векторів течії та вітрохвильового збурення в початковій точці шляху судна, вважаючи модуль відносної швидкості судна постійним. У роботі наведено модель визначення елементів руху судна у вигляді алгоритму, що представляє послідовність операторів присвоювання, та операторів вводу, друку та виходу, складають блок-схему його програмної реалізації. У статті наведено так само алгоритм розрахунку модулів і внутрішніх кутів векторного трикутника, утвореного в результаті обсервації. Останнім кроком було розглянуто повернення на лінію шляху судна за наступний відрізок часу, рівний одній годині. При цьому зберігається модуль швидкості судна, модуль і напрямок вектору сумарного збурення, а шляхова швидкість судна є змінною (рис. 1(г)).

Ще одним методом управління рухом є управління на основі довгострокового прогнозування [13]. Відповідно до ідеї довгострокового прогнозування, поведінка судна, через його інерційності, на деякому невеликому проміжку часу може досить точно бути спрогнозована, що за своєю суттю є більш досконалим аналогом дії диференційного каналу ПД-регулятора. Даний підхід, однак, вимагає значно більших обчислювальних витрат. У кожен конкретний момент часу робиться прогноз значень курсу судна на тривалий термін. Цей прогноз ґрунтується на математичній моделі динаміки судна як об'єкта управління (явно або в алгоритмі управління). Автори методу вважають, що з його допомогою можна буде краще врахувати мінливу динаміку судна (особливо в умовах хвилювання), забезпечивши тим самим краще його управління.

Прогноз залежить від сценарію управління в майбутньому, яке передбачається постійним на весь час прогнозування. З декількох сценаріїв управління вибирається стратегія, що забезпечує

найкращу схожість вихідної координати (справжній курс) до значенням, що задається. Стратегія, вибрана як найкраща, застосовується потім як керуючий вплив, проте тільки на заданий час. У наступний момент дискретного часу вся процедура повторюється, в результаті чого забезпечується уточнена керуюча дія. Така стратегія відома під назвою стратегії управління по горизонту, що віддаляється.

Останнім часом для цілей управління складними нелінійними об'єктами, що працюють в умовах невизначеностей, в якості альтернативи традиційним підходам, все ширше починають застосовуватися методи інтелектуального управління і, зокрема, синергетичний підхід, використання нейронних мереж, нечіткої логіки та еволюційних (генетичних) алгоритм-мов. Подібні підходи до управління рухом судна поки освітлені мало, проте кількість робіт, присвячених цій темі, з кожним роком збільшується [14-15]. В основному, ідеї штучного інтелекту пропонується реалізувати при створенні систем підтримки прийняття рішень судноводія в складних ситуаціях управління судном. До таких ситуацій відносять: вибір оптимального маршруту; оцінка ризиків; управління рухом судна на траєкторії.

Висновки. За результатами аналізу, описані в літературі методи вдосконалення існуючих способів управління рухом судна можна розділити на дві групи: традиційний підхід та застосування концепції «м'яких обчислень», а саме: використання нейронних мереж, нечіткої логіки та еволюційних (генетичних) алгоритмів.

Найпоширенішим є управління судном за відхиленням, що є необхідним, але недостатнім для забезпечення безпеки судноплавства, оскільки воно враховує тільки нормальний вплив зовнішнього збурення без урахування його напрямку. Регулювання руху судна за збуренням підвищує якість утримання судна на лінії маршруту. Однак питання використання даного методу при вирішенні задач управління рухом судна в літературі поки що висвітлені мало, що дозволяє вважати цей напрям досліджень перспективним та актуальним.

ЛІТЕРАТУРА

1. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. Л.: Судостроение, 1976. 477 с.
2. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. Л.: Судостроение, 1983. 272 с.
3. Воробьев Ю.Л. Гидродинамика судов в стесненном фарватере. Л.: Судостроение, 1992. 224 с.
4. Fossen T.I. Marine Control Systems (2002). Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics. Trondheim, Norway, 2002. 570 p.
5. Nomoto K., T. Taguchi, R. Honda On the steering qualities of ships (1957). Singapore, International ship Building Congress, p. 354-370.
6. Lewandowski E.M. The Dynamics of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping. N.Y.: World Scientific Publishing Company, 2003. 300 p.
7. McCallum I.R. A ship steering mathematical model for all maneuvering regimes. N.Y.: AMIVAR, 1985. 21 p.
8. Мальцев А.С., Голиков В.В., Сафин И.В. Методологические основы маневрирования судов при сближении. Одесса: ОНМА, 2013. 218 с.
9. Pettersen K.Y. and Leferber E. Way-point tracking control of ships. In proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 2001.
10. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. 3-е изд., перераб. и доп. Одесса: Фенікс, 2007. 328 с.
11. Андреев А.И., В.Е. Львов Анализ точности принципов курсового управления движением судна. Автоматизация судовых технических средств: Сб. научн. Трудов/ ОНМА, Вып. 14. Одесса: ИздатИнформ, 2008. с. 3 – 7.
12. Сінюта К.О. Ітераційний метод стабілізації судна на курсі та маршруті [текст]. Судноводіння: Зб. наук. праць. НУ «ОМА» Вип. 31. Одеса: «ВидавИнформ», 2021. С.117-124.
13. Clarke D.W., C. Mohtadi, P. Tuffs Generalized predictive control. Part I: The basic algorithm. Automatica. Vol. 23. N.Y., 1987. p. 137 – 148.
14. Подпорин С.А. Intelligent control techniques applied to ship steering. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Безпека мореплавання та її забезпечення при проектуванні та будівництві суден (БМС) 2007» 25-26 ЖОВТНЯ 2007. Миколаїв: НУК, 2007. С. 21-23.
15. Chen W. Q., Chen J., Zhang W. (2016): Adaptive Neural Network Robust Tracking Control for Ship Course. Ship Engineering, 9, 15–20.

REFERENCES

1. Sobolev H.V. Upravliaemost korablia y avtomatyzatsiya sudovozhdeniya. (1976). L.: Sudostroenye, [in Russian].
2. Pershyts R.Ya. Upravliaemost y upravlenye sudnom (1983). L.: Sudostroenye, [in Russian].
3. Vorobev Yu.L. Hydrodynamyka sudov v stesennom farvatere (1992). L.: Sudostroenye, [in Russian].
4. Fossen T.I. Marine Control Systems (2002). Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics. Trondheim, Norway, 2002. 570 p.
5. Nomoto K., T. Taguchi, R. Honda On the steering qualities of ships (1957). Singapore, International ship Building Congress, p. 354-370.
6. Lewandowski E.M. The Dynamics of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping (2003). N.Y.: World Scientific Publishing Company, 300 p.
7. McCallum I.R. A ship steering mathematical model for all maneuvering regimes (1985). N.Y.: AMIVAR, 21 p.
8. Maltsev A.S., Golikov V.V., Safyn Y.V. Metodolohycheskye osnovy manevryrovanyia sudov pry sblyzheny (2013). Odessa: ONMA.
9. Pettersen K.Y. and Leferber E. Way-point tracking control of ships. (2001). In proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control.
10. Vahushchenko L.L., Tsybmal N.N. Systemy avtomatycheskoho upravleniya dvyzhenyem sudna. (2007). 3-e yzd., pererab. y dop. Odessa: Feniks. [in Russian].
11. Andreev A.Y., V.E. Lvov Analiz tochnosti pryntsyrov kursovoho upravleniya dvyzhenyem sudna (2008). Avtomatyzatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv: Sb. nauchn. trudov/ ONMA, Vyp. 14. Odessa: YzdatYnform, s. 3 – 7. [in Russian].
12. Siniuta K.O. Iteratsiyni metod stabilizatsii sudna na kursi ta marshruti (2021). Sudnovodinnia: Zb. nauk. prats. NU «OMA». Vyp. 31. Odesa: «VydavInform», S.117-124. [in Ukrainian].
13. Clarke D.W., C. Mohtadi, P. Tuffs Generalized predictive control. Part I: The basic algorithm Automatica. (1987). Vol. 23. N.Y., p. 137 – 148.
14. Podporyn S.A. Intelligent control techniques applied to ship steering (2007). Materily Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii «Bezpeka moreplavannia ta yii zabezpechennia pry proektuvanni ta buduvanni suden (BMS) 2007». Mykolaiv: P. 21-23.
15. Chen W. Q., Chen J., Zhang W. (2016): Adaptive Neural Network Robust Tracking Control for Ship Course. Ship Engineering, 9, 15–20.

Volodymyr Golikov¹, Kateryna Siniuta²

¹Professor of the Department of Ship Handling, Odesa Maritime Academy National University, Ukraine, st. Didrichson, 8, Odesa, Ukraine, 65052

² Assistant of the Department of Ship Theory and Structure, Odesa Maritime Academy National University, Ukraine, vul. Didrichson, 8, Odesa, Ukraine, 65052

MAIN APPROACHES TO SHIP TRAFFIC CONTROL ON COURSE

The management of the vessel's course on the course is an important maritime quality that determines the effectiveness of the vessel's management. The environmental conditions in which course management tasks need to be addressed are of a different nature - limited visibility, stormy weather, icing, shallow water, tidal phenomena, narrow conditions, the presence of other vessels, and so on. All these aspects cannot be comprehensively considered by traditional mathematical methods, ensuring the necessary adequacy of the actual process.

This paper highlights the existing approaches to the management of ship traffic on the course such as course management, disturbance management, ship traffic management on the basis of long-term forecasting, proportional-integral-differential (PID) law of control (deviation control), intellectual approaches to court management, in particular, synergetic approach, use of neural networks, fuzzy logic and evolutionary (genetic) algorithms-languages.

Keywords: *controllability, perturbation, deviation, PID law.*