

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Більшу частину рейсу сучасні морські судна проводять у режимі автоматичного управління рухом за заданим курсом. Помилки на цьому етапі призведуть до підвищеного ризику та відхилень від лінії руху, виникнення ризику виходу судна за межі безпечної зони або фарватеру, збільшення пройденого шляху та пропульсивних втрат, зниження ресурсу рульової машини. Це, у свою чергу, негативно впливає на економічні показники рейсу, зменшуючи його прибуток. Ефективність управління курсом залежить, насамперед, від того, наскільки повно та оперативно здійснюється урахування зовнішніх впливів та змін динаміки самого судна. Стохастичність і непрогнозованість таких впливів, а також велика інерційність самого судна, дуже ускладнюють розв'язання цієї проблеми традиційними методами теорії управління, особливо за складних погодних умов. Тому вдосконалення та розвиток методів управління судном, які здатні забезпечити більш повне урахування умов плавання і динаміки судна, а також вибір найбільш ефективного режиму управління курсом, є актуальним і важливим завданням, успішне розв'язання якого покликане підвищити економічність та безпеку рейсу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи пов'язана з «Державною програмою вдосконалення функціонування державної системи забезпечення безпеки судноплавства на 2002-2006 роки» (постанова КМ України від 28.02.2002 р., № 296), а також «Концепцією сталої національної транспортної політики розвитку усіх видів транспорту на 2007-2014 роки (наказ МТЗ України від 05.05.2007 р., № 360). Дослідження виконувалися згідно тематики держбюджетної НДР «Роботизовані технології дослідження континентального шельфу України з використанням неавтономних підводних технічних засобів» (ДР № 0109U002215), у якій автору належить самостійно виконаний розділ.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності управління курсом судна на переході за рахунок більш повного урахування динаміки судна і зовнішніх впливів, а також забезпечення близького до оптимального режиму управління курсом без втручання судноводія. Для досягнення цієї мети необхідне розв'язання наступних завдань:

- огляд існуючих підходів до управління курсом судна та вибір напряму дисертаційного дослідження;
- методологічне забезпечення дисертаційного дослідження;
- математичний опис процесу управління рухом судна на курсі з урахуванням основних чинників, що впливають на керованість судна;
- вдосконалення управління курсом судна методами теорії інтелектуального управління;
- узагальнення та порівняльний аналіз запропонованих методів управління курсом судна.

**Об'єктом дослідження** є процес руху судна, а **предметом дослідження** – управління курсом судна у цьому процесі.

**Методи дослідження:**

- системний аналіз – під час вибору теми, загальної методології дисертаційного дослідження, аналізу чинників, що впливають на керованість судна;
- дослідження операцій – для декомпозиції головного завдання дисертаційної роботи;
- методи теорії автоматичного управління та математичного аналізу – для математичного опису керуючої курсом системи;
- методи оптимізації, нечіткої логіки, нейронної ідентифікації та управління – під час вдосконалення існуючих методів управління курсом судна;
- чисельні методи – під час складання програм та підготовки до проведення експерименту з використанням ЕОМ.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у розвитку методів автоматичного управління рухом судна на курсі, особливістю якого є застосування в законі управління апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж для оперативної ідентифікації нелінійної динаміки судна та її змін і знаходження на цій підставі найбільш ефективного режиму управління курсом, використовуючи дані про стан судна та умови плавання. При цьому:

- вперше встановлено, що близькі до оптимальних значення параметрів управління рухом судна на курсі забезпечуються під час багатомірної нелінійної ідентифікації, яка здійснюється штучною нейронною мережею, входним вектором для якої є набір даних про стан судна та умови плавання;
- вперше в закон управління курсом судна введено механізм нечіткого логічного висновку на базі нелінійних функцій приналежності, що дозволило більш повно враховувати нелінійну динаміку судна під час здійснення маневру та забезпечити фільтрацію високочастотних зовнішніх збурювань;
- вперше розроблено метод оперативного пошуку оптимальних значень параметрів управління курсом згідно критерію, який забезпечує бажану точність утримання на курсі за мінімуму перекладань руля, використовуючи еволюційний алгоритм;
- вдосконалено метод адаптивного управління курсом судна за рахунок використання в контурі управління більш точних моделей судна та керуючого регулятора, отриманих методами нейронної ідентифікації.

**Практична значимість отриманих результатів** полягає у тому, що досліджені методи можуть бути використані для розв'язання завдань управління рухом інших рухомих об'єктів схожої складності. Методи автоматичного управління рухом судна на курсі, засновані на використанні апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж, є практично цінними під час проектування та розробки сучасних зразків керуючих рухом систем. Також результати дисертаційної роботи можуть бути використані у навчальному процесі та науково-дослідній роботі профільних вищих навчальних закладів.

Результати дисертаційної роботи впроваджені і використовуються в: ЦКБ «Чорноморець» (м. Севастополь, акт від 17.12.2008); судноплавній компанії ВАТ «Південрефтрансфлот» (м. Севастополь, акт від 19.11.2008); навчальному процесі та НДР Севастопольського національного технічного університету (акти від 22.01.2009) і Севастопольського військово-морського інституту ім. П.С. Нахімова (акт від 2.03.2009).

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати і розробки, які виносяться на захист, одержані здобувачем самостійно.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати дисертаційної роботи були представлені і обговорені на міжнародних науково-технічних конференціях «Безпека мореплавства та її забезпечення під час проектування та будування суден» (м. Миколаїв, 25-26 жовтня 2007 р.), «Проблеми економіко-математичного моделювання морських транспортних технологій» (м. Маріуполь, 16-17 травня 2007 р.); Всеукраїнських науково-технічних конференціях з міжнародною участю «Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів» (м. Миколаїв, 21-23 травня 2007 р.) і «Інформаційно-керуючі системи і комплекси» (м. Миколаїв, 16-17 квітня 2007 р.). Окремі результати обговорювалися під час семінарів з інженерно-технічним персоналом у конструкторських бюро і судноплавних компаніях.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць (з них – 5 самостійно), у тому числі 8 статей у виданнях, що входять до переліку ВАК України, у яких можуть публікуватися матеріали дисертаційних досліджень.

**Структура і обсяг дисертації.** Робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, 5 додатків, списку використаної літератури зі 135 найменувань. Повний обсяг – 180 стор., основний обсяг – 146 стор., у т. ч. 40 рис., 12 табл.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, визначені мета та завдання дослідження, показані наукова новизна і практичне значення роботи.

У **першому розділі** дисертації поданий огляд основних напрямків досліджень у галузі підвищення ефективності управління рухом судна на курсі. Ця проблема залишається актуальною, про що свідчить велика кількість опублікованих за останні роки праць за цією темою.

Питання керованості суден та чинники, що впливають на неї, досліджені досить повно. До основних публікацій у цій галузі належать праці Г.В. Соболева, Ю.Л. Воробйова, А.М. Басіна, А.В. Васильєва, А.С. Мальцева, Л.Л. Вагущенко, Л.А. Козиря, К. Nomoto, N. Norrbin, I.R. McCallum, E.M. Lewandowski та ін. Основними чинниками, що впливають на керованість суден на курсі, названі: зміна завантаження і швидкості судна; зміна глибини на мілководді; зміна погодних умов, у т.ч. сили та напрямку хвилювання.

У працях Р.Я. Першиця, Г.В. Соболева, І.І. Кринецького, С.Я. Березіна, Б.О. Тетюєва, Л.Л. Вагущенко, І.Р. Фрейдзона, Thor I. Fossen та ін. вчених досліджені особливості судна як об'єкта управління курсом. Відзначено, що судно і судові системи, задіяні у керуванні його рухом, створюють нелінійну багатомірну систему, дослідження якої традиційними математичними методами ускладнено, а отримані при цьому рівняння мало придатні для практичних розрахунків через свою громіздкість. Ситуація ускладнена також тим, що умови, за яких працює судно, не є постійними, а зовнішні впливи на корпус через хвилювання й вітер можна описати лише приблизно статистичними методами. Тому, для оцінки керованості на курсі вдаються до низки апроксимацій і спрощень, внаслідок яких отримують лінійні математичні моделі малих порядків, зручні для до-

слідження. Таке математичне подання дозволяє використовувати в судових авторульових пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон управління курсом, однак на практиці через нелінійність судна як керованого об'єкта і особливостей самого закону управління це призводить до наступних негативних явищ: погіршення якості утримання на курсі за складних погодних умов; зарискування під час здійснення маневру; занадто частих переключень руля; необхідності втручання штурмана в настроювання авторульового за зміни умов плавання. ПІД-закон, проте, наразі реалізований у переважній більшості авторульових.

Разом з тим, для підвищення ефективності керуючих курсом систем необхідні більш коректні математичні моделі, що описують судно в усьому діапазоні роботи, і, як наслідок, більш досконалі закони управління, які здатні адаптуватися до умов плавання та обробляти інформацію щодо зовнішніх збурювань. У цьому напрямку відомі роботи І.І. Кринецького, Ю.І. Бурименко, П.П. Овчинникова, С.Я. Березіна, Б.О. Тетюєва, Л.Л. Вагущенко, В.Є. Львова, Thor I. Fossen та ін. Останнім часом низка вчених (А. Cirilli, R. Burns, D.J. Murray-Smith, J. Velagic, Ю.І. Нечаєв, А.С. Мальцев та ін.) висловлюють ідеї застосування штучних нейронних мереж для ідентифікації динаміки руху судна. Деякі автори пропонують інші підходи для опису і прогнозування поведінки судна, зокрема, методи довгострокового прогнозування, статистичних моделей. Даних про їх реалізацію в системах управління рухом судна поки немає.

Перспективним напрямком досліджень є реалізація експертних систем підтримки рішень штурмана, заснованих на досягненнях у галузі штучного інтелекту. Так, у контексті управління рухом судна висловлені ідеї створення систем-помічників для вибору часу і кутів утримання руля під час маневру, вибору оптимального маршруту, оцінки ризиків тощо. У цьому напрямку відомі роботи Ю.І. Нечаєва, А.С. Мальцева, Ю.П. Кондратенка та ін. Деякі закордонні фірми згадують термін «інтелектуальний автопілот», маючи на увазі використання в ньому досягнень штучного інтелекту, однак описи таких систем не наведені.

Таким чином, недоліки і обмеження існуючого способу управління курсом судна обумовлюють необхідність пошуку альтернативних підходів до розв'язання цього завдання. Методи інтелектуального управління за цих умов представляються досить перспективними, однак, у контексті управління рухом судна досліджені мало. Наявні нечисленні публікації за цією темою – в основному, закордонних авторів – не розкривають системно сутність проблеми, запропоновані варіанти рішень даються оглядово, відсутні конкретні методики та алгоритми їх реалізації.

Основні результати розділу відбито у працях [6, 7, 12].

**Другий розділ** дисертації присвячений методологічному забезпеченню дисертаційного дослідження, наведене обґрунтування вибору напрямків дослідження, визначена їхня мета, сформульоване головне завдання роботи і розглянуті методи її розв'язання. Методологія дослідження представлена у вигляді технологічної карти, в якій відбито основні етапи і результати роботи.

Аналіз літературних джерел виявив проблему недостатньої ефективності існуючого способу управління курсом судна та обумовив необхідність його вдос-

коналення з метою більш повного урахування динаміки судна і зовнішніх впливів, а також знаходження близького до оптимального режиму управління курсом без втручання судноводія. Це стало головним завданням дисертаційного дослідження, для успішного розв'язання якого була проведена його декомпозиція на п'ять допоміжних завдань, що представлені нижче.

1. Огляд існуючих підходів до управління курсом судна. Розв'язання цього завдання покликане дати комплексну оцінку недоліків і обмежень існуючих способів управління курсом і визначити шляхи їх подолання. Методологічна база на цьому етапі включає методи дедукції і теорії дослідження операцій.

2. Розробка загальної методології дисертаційного дослідження. Для цього доцільним є використання методів системного аналізу.

3. Математичний опис процесу управління рухом судна на курсі з урахуванням основних чинників, що впливають на керованість судна. Важливість цього етапу обумовлена необхідністю мати математичні моделі як самого судна, так і системи управління курсом у цілому з метою подальшого проведення імітаційного моделювання для оцінки працездатності і параметрів якості досліджених методів інтелектуального управління курсом судна. Розв'язання цього завдання доцільно проводити, використовуючи методи математичного аналізу, теорії автоматичного управління, а також чисельні методи.

4. Вдосконалення управління курсом судна методами теорії інтелектуального управління. Розв'язання цього завдання покликане підвищити ефективність існуючих методів управління, розширивши їх можливості за рахунок застосування в законі управління апарату нечіткої логіки, штучних нейронних мереж і еволюційного алгоритму. На цьому етапі планується використати методи нечіткої логіки, багатомірної оптимізації, нейронної ідентифікації та управління.

5. Узагальнення та порівняльний аналіз запропонованих методів управління курсом судна. На цьому етапі планується експеримент імітаційного моделювання руху реального судна, на підставі якого зробити висновки щодо працездатності та якості методів інтелектуального управління курсом судна.

Отримані наукові результати та результати експерименту дозволять у подальшому оцінити практичну значимість і цінність роботи і сформулювати її наукове положення.

Основні положення розділу відбито в роботах [11, 12].

**У третьому розділі** дисертації вирішено допоміжне завдання, присвячене математичному опису процесу управління курсом судна. Складено математичну модель системи управління курсом, проаналізовані типові зовнішні збурювання, що діють на судно під час переходу. В окремому підрозділі наведений вплив різних чинників на керованість і параметри математичної моделі судна.

Під час опису судна як керованого об'єкта за основу була прийнята нелінійна математична модель Соболева-Номото

$$(T_2 p^2 + T_1 p \pm 1 + c \varpi^2 + d_c |\varpi|) \varpi = k_c (1 + \tau p) \delta, \quad (1)$$

де  $k_c$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\tau$  – гідродинамічні параметри судна;  $c$ ,  $d$  – постійні коефіцієнти;  $\varpi$  – кутова швидкість судна за курсовим кутом;  $\delta$  – кут перекладки руля;  $p$  – оператор похідної. Знак «+» відповідає стійкому на курсі судну, «—» – нестійкому.

У режимі стабілізації на курсі (за малих значень  $\varpi$ ) вираз (1) було приведено до лінійного вигляду

$$(T_2 p^2 + T_1 p \pm 1)\varpi = k_c (1 + \tau p)\delta, \quad (2)$$

Приймаючи за вихідну функцію у виразі (2) кут відхилення судна від курсу  $\varepsilon$ , як інтеграл від  $\varpi$ , отримали

$$p(T_2 p^2 + T_1 p \pm 1)\varepsilon = k_c (1 + \tau p)\delta. \quad (3)$$

Для попередньої оцінки керованості судна вираз (3) було спрощено і подано у вигляді передатної функції

$$W(p) = \frac{k_c}{p(Tp + 1)}, \quad (4)$$

де  $T$  – загальна постійна часу.

Для дослідження було взято одногвинтове рефрижераторне судно серії «Пролів» (судновласник ВАТ «Південрефтрансфлот»): довжина найбільша – 172,1 м; ширина – 23,4 м; осадка по літню вантажну марку – 8,1 м; розрахункова швидкість – 16,1 вуз; валова місткість – 13053 GT. Значення параметрів  $k_c$  і  $T$  передатної функції (4) визначалися експериментально для різних режимів за результатами проведення стандартного маневру «зигзаг». Їхні залежності від завантаження ( $Ld$ ) і швидкості руху ( $V$ ) наведені на рис. 1а і 1б відповідно.

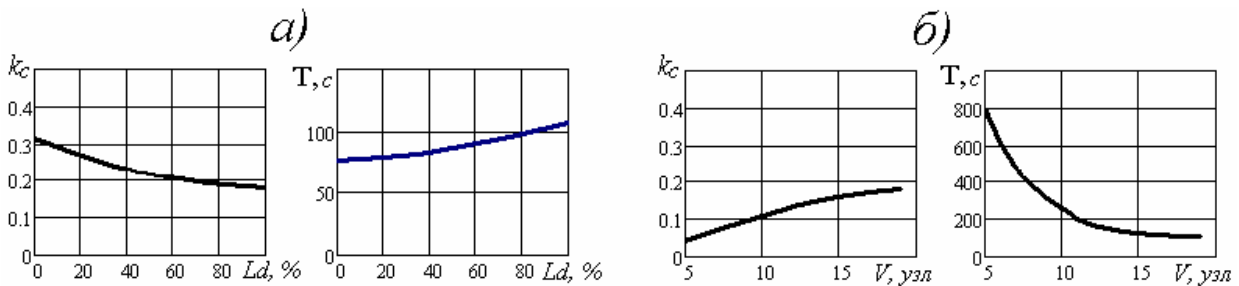


Рис. 1. Залежності гідродинамічних параметрів судна від завантаження (а) і швидкості руху (б)

Аналіз системи управління курсом судна вимагає складання математичних моделей рульової машини та керуючого курсом регулятора. Рульова машина гідравлічного типу моделювалася з урахуванням основних нелінійностей: обмежень за кутом та швидкістю перекадки пера руля (рис. 2).

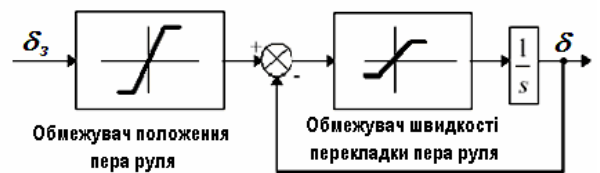


Рис. 2. Нелінійності рульової машини

У якості регулятора розглядався ПІД-регулятор стандартного типу

$$u(t) = K_C \left[ K_p \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + K_i \int \varepsilon(t) dt \right], \quad (5)$$

де  $u(t)$  – сигнал управління;  $\varepsilon(t)$  – сигнал помилки;  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  – коефіцієнти пропорційного, диференціального та інтегрального каналів відповідно;  $K_C$  – загальний коефіцієнт підсилення системи.

У відповідності зі структурною схемою (рис. 3), була отримана дискретна передатна функція  $P(z)$  об'єкта управління (судна і рульової машини).

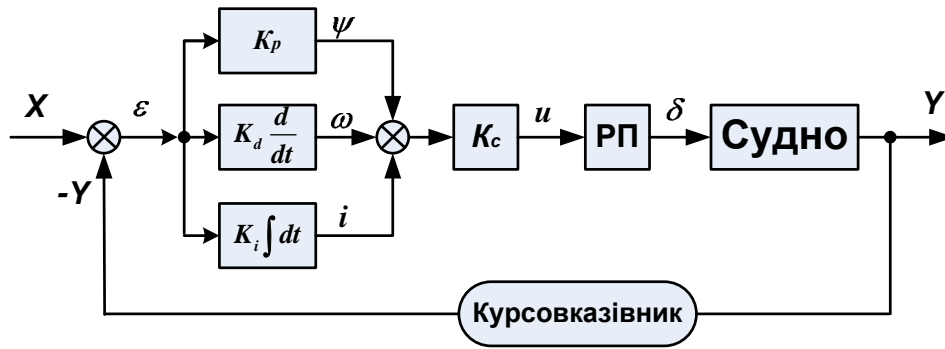


Рис. 3. Структурна схема системи автоматичного управління курсом судна:  $X$  – курс, що задається;  $Y$  – фактичний курс;  $\psi$ ,  $\omega$ ,  $i$  – пропорційна, диференціальна та інтегральна складові сигналу управління;  $РП$  – рульовий привод

З урахуванням даних з розглянутого судна:

$$P(z) = 0,547 \cdot \frac{(z+1)^3}{(z-1)(3z+2)(539z-534)}. \quad (6)$$

Закон управління був приведений до дискретної форми і поданий у вигляді швидкісного алгоритму з дискретним часом виду

$$\Delta u(t) = k_I X(t) - [k_P + k_I + k_D] Y(t) + [k_P + 2k_D] Y(t-1) - k_D Y(t-2), \quad (7)$$

де  $k$ ,  $k$ ,  $k$  – коефіцієнти передачі відповідно за пропорційним, інтегральним і диференціальним каналом (однозначно визначаються за відомим значенням  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$ );  $e(t)$  – помилка:  $e(t) = X(t) - Y(t)$ ;  $X(t)$  – курс, що задається;  $Y(t)$  – фактичний курс судна.

Основним зовнішнім збурюванням, що діє на судно під час переходу, є морське хвилювання. Його вплив на відхилення від курсу, як показують дослідження, не може бути точно виражений математично. Рискання судна (функція  $\psi_g(t)$ ), викликане нерегулярним морським хвилюванням, моделювалося випадковим процесом з кореляційною функцією

$$K_g(\tau) = \sigma_g^2 e^{-\alpha\tau} \left( \cos \beta\tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta|\tau| \right), \quad (8)$$

де  $\tau$  – різниця моментів рискання;  $\sigma_g^2$  – дисперсія рискання;  $\alpha$  – коефіцієнт згасання;  $\beta$  – частота переважної гармоніки хвильового рискання.

Таким чином, розв'язання цього допоміжного завдання створило математичну базу для подальшого розвитку та дослідження методів інтелектуального управління курсом судна. Основні положення розділу відбито в роботі [9].

**У четвертому розділі** вирішене четверте допоміжне завдання, безпосередньо присвячене розвитку методів інтелектуального управління курсом судна.

У першому підрозділі розроблено метод оперативного пошуку оптимальних значень параметрів управління курсом за допомогою еволюційного (генетичного) алгоритму. Його блок-схема наведена на рис. 4. Оптимізованими генетичним методом параметрами управління можуть бути: складові ПД- (або ПД-) закону управління; складові ПД-закону управління і постійна часу фільтра; інші комбінації. У цій роботі розглядалася тріада складових ПД-закону відповідно до виразу (5). Критерієм оптимальності є значення цільової функції

$$F(K, T_d, T_i) = \frac{1}{J(K_p, K_d, K_i)}, \quad (9)$$

де  $J(K_p, K_d, K_i)$  – функціонал, що забезпечує мінімум дисперсії рискання і перекладань руля

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (\varepsilon^2 + A\delta^2) dt = \min, \quad (10)$$

де  $T$  – період осереднення (час, протягом якого здійснюється адаптація);  $A$  – ваговий коефіцієнт, що визначає точність утримання на курсі.

Реалізований у середовищі Matlab 7 із залученням можливостей блоку розширень Genetic Algorithms and Direct Search Toolbox, еволюційний алгоритм дозволив оперативно здійснювати пошук оптимальних значень параметрів управління для різних режимів роботи судна.

Другий підрозділ присвячений вдосконаленню ПД-закону управління курсом судна шляхом доповнення його апаратом нечіткої логіки. Такий підхід є виправданим, оскільки морське судно часто працює в умовах невизначених (нечітких) зовнішніх впливів (хвильових і вітрових), що істотно ускладнює використання традиційних методів теорії автоматичного управління.

Переведенню в нечітку область (рис. 5) підлягали два параметри управління: відхилення від курсу (сигнал  $\psi$ ) і кутова швидкість рискання (сигнал  $\omega$ ). Для отриманих нечітких логічних змінних використовувалися трапецеїдальні функції приналежності із зоною нечутливості навколо нульового значення, ширина якої визначалася за допомогою масштабного коефіцієнта  $S$ . На рис. 6 наведені функції приналежності для змінної  $\psi$  з масштабним коефіцієнтом  $S=1$  (відповідає режиму плавання в умовах незначного хвилювання (3-4 бали)).

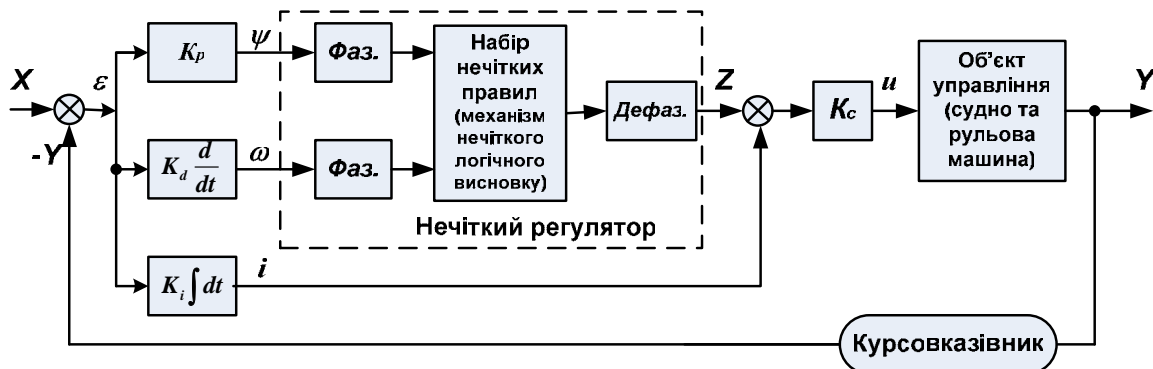


Рис. 5. Схема нечіткого управління курсом:

«Фаз» – фазифікатор (оператор переведення в нечітку область); «Дефаз» – дефазифікатор (оператор усунення нечіткості вихідного значення);  $Z$  – вихідна величина

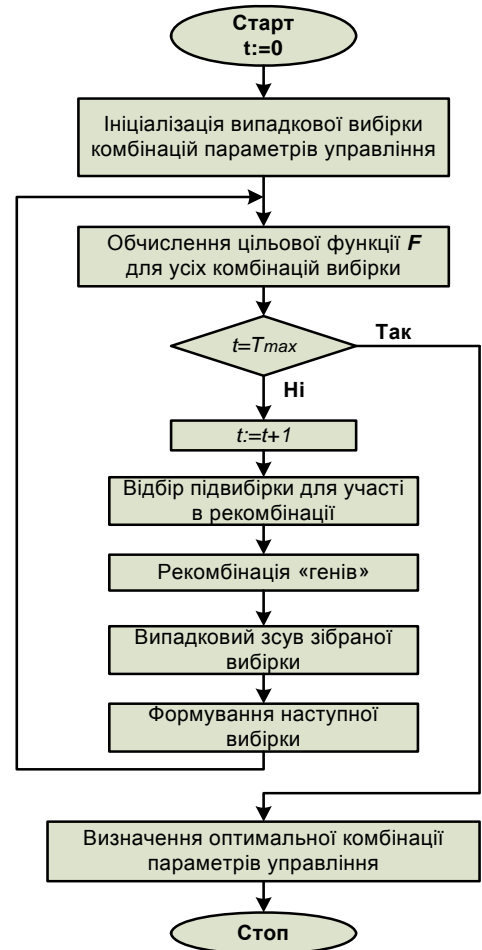


Рис. 4. Блок-схема еволюційного алгоритму

Наявність зони нечутливості за курсовим кутом і кутовою швидкістю рискання дозволило забезпечити в системі управління фільтрацію високочастотного хвильового рискання, зменшивши тим самим кількість і амплітуду вмикань рульової машини, зберігаючи ресурс останньої.

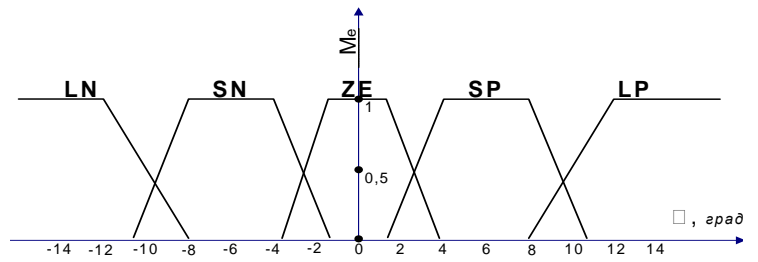


Рис. 6. Функції приналежності для параметру  $\psi$  («відхилення від курсу»)

Для кожної нечіткої логічної змінної визначалися п'ять нечітких значень (множин): «відсутнє» (ZE), «незначне» (на правий борт – SP; на лівий борт – SN), «значне» (на правий борт – LP; на лівий борт – LN).

Нечіткий логічний висновок здійснювався за правилами виду: «Якщо відхилення ( $\psi$ ) від заданого курсу позитивне і велике (LP), а швидкість його зміни ( $\omega$ ) близька до нуля (ZE), то сигнал управління Z, пропорційний куту перекладки руля, повинен бути негативним і максимальним (LN)». База нечітких логічних правил, складена на підставі досвіду морської практики, була подана у вигляді матриці нечітких асоціацій (таблиця 1).

Таблиця 1

#### Матриця нечітких асоціацій

$\omega \backslash \psi$	LP	SP	ZE	SN	LN
LP	LN 16	LN 6	SN 1	ZE 11	SP 21
SP	LN 17	SN 7	ZE 2	SP 12	LP 22
ZE	LN 18	SN 8	ZE 3	SP 13	LP 23
SN	LN 19	SN 9	ZE 4	SP 14	LP 24
LN	SN 20	ZE 10	SP 5	LP 15	LP 25

Для отримання «чіткого» сигналу управління (дефазифікації) був застосований центроїдний метод. Параметри нечіткого закону управління (коефіцієнти  $K_C$  і  $K_d$ ) наструювалися за допомогою еволюційного алгоритму. Моделювання проведено в середовищі Matlab 7 з використанням Fuzzy Logic toolbox v.2.2.2.

У третьому підрозділі запропонований і досліджений спосіб управління курсом судна, заснований на використанні штучної нейронної мережі (ШНМ) для визначення близьких до оптимальних параметрів закону управління. Останній може бути реалізований на основі традиційного (ПД) управління, нечіткого управління або іншого. У цій роботі розглядався ПД-закон. Структурна схема запропонованої системи управління наведена на рис. 7. Принцип роботи: на вхід блоку аналізу (БА), реалізованого на основі ШНМ, подається вектор початкових даних, що характеризує умови плавання судна (хвилювання, завантаження, швидкість, що знімаються з відповідних датчиків) і помилку  $\varepsilon$  у системі, а вихідний вектор покликаний забезпечити авторульовий оптимальною тріадою параметрів, які підлягають наструюванню.

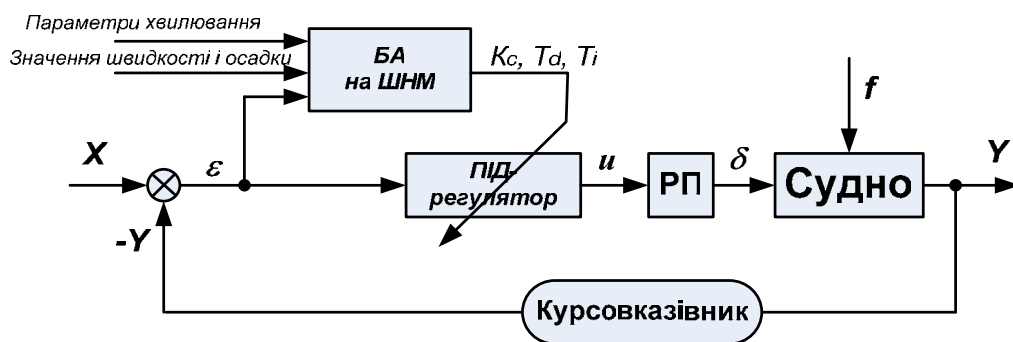


Рис. 7. Система управління курсом судна з підстроюванням параметрів управління від штучної нейронної мережі

Для попереднього навчання ШНМ вектор початкових даних був представлений наступними змінними:

- характеристика хвилювання (параметр  $r_1$ ) – задавалася за 5-бальною шкалою:  $r_1=1$  (штиль: 0-1 бал);  $r_1=2$  (незначне хвилювання 2-3 бали);  $r_1=3$  (хвилювання 4 бали);  $r_1=4$  (5 балів);  $r_1=5$  (хвилювання 6 і більше балів)
- завантаження судна (параметр  $r_2$ ) – задавалася в трьох варіантах: «2» – повне завантаження, «1» – завантаження наполовину, «0» – у баласті;
- швидкість судна (параметр  $r_3$ ) – розглядалася значеннями: «2» – повна (крейсерська) швидкість, «1» – 2/3 від повної швидкості;
- миттєве значення відхилення від курсу (параметр  $r_4$ ): «0» – помилка мінімальна ( $0-2^\circ$ ), «1» – незначна помилка ( $2-5^\circ$ ), «2» – значна помилка (понад  $5^\circ$ ).

У підсумку було отримано 108 комбінацій вхідного вектору. Так, судну, що рухається у повному вантажі на повному ході за умов чотирибального хвилювання з миттєвою помилкою  $2,5^\circ$ , відповідав вхідний вектор  $\bar{R} = (3, 2, 2, 1)^T$ .

Оптимальні за критерієм (9) параметри управління для різних комбінацій вхідного вектора були отримані з використанням еволюційного алгоритму.

Для розв'язання поставленого завдання була обрана архітектура ШНМ прямого розповсюдження перцептронного типу, як найбільш вивчена і така, що успішно зарекомендувала себе під час розв'язання схожих завдань. Структура використаної нейронної мережі включає два прихованих шари з сигмоподібними функціями активації нейронів виду

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}; \text{ при цьому } f(x) = a \cdot f(x) \cdot [1 - f(x)], \quad (11)$$

де  $a$  – постійний коефіцієнт.

Навчання ШНМ було проведено методом зворотного розповсюдження помилки в середовищі Matlab 7 з використанням Neural Network Toolbox v.406. Для цього була використана вибірка з 40 варіацій вхідного вектора і відповідних їм значень вихідного вектора.

У четвертому підрозділі вдосконалено метод адаптивного управління курсом судна за рахунок використання в контурі управління моделей судна та керуючого регулятора, отриманих методами нейронної ідентифікації. Подібний підхід покликаний позбавити систему управління курсом обмежень і недоліків, властивих традиційному ПД-закону.

У системах з нейроуправлінням ідентифікація яких завгодно складних керуванних об'єктів і систем можлива завдяки сформульованій Хехт-Нильсеном теоремі про «повноту», відповідно до якої будь-яка безперервна функція на замкненій обмеженій множині може бути рівномірно наближена функціями, що обчислюються нейронними мережами, якщо функція активації нейрона двічі безперервно диференційована і безперервна. Подібним вимогам задовольняють, зокрема, сигмоподібні функції виду (11).

Метод адаптивного нейронного управління курсом судна заснований на використанні інверсної нейронної моделі у якості керуючого регулятора. Також для підвищення якості управління і введення в контур самонастроювання використовувалася і пряма модель, яка була представлена дискретним рівнянням

$$y(t) + \alpha_1 y(t-1) + \dots + \alpha_q y(t-q) = Z^d [b_0 u(t) + b_1 u(t-1) + \dots + b_p u(t-p)],$$

де  $y$  – курс судна;  $u$  – сигнал управління від регулятора авторульового (вхідний сигнал);  $\alpha_i$  ( $i=1, 2, \dots, q$ ) – коефіцієнти чисельника передатної функції;  $b_j$  ( $j=1, 2, \dots, p$ ) – коефіцієнти знаменника;  $d$  – час запізнювання;  $t$  – номер відліку.

Інверсна нейронна модель судна являє собою нелінійну функцію  $q$ , до якої входять затримані сигнали управління і значення курсу відповідно до оцінки порядку і часу запізнювання (визначається інерційністю рульового привода):

$$I(t) = q\{u(t-d)\} = \{y(t), y(t-t_1), \dots, y(t-d_1), \dots, y(t-d_p)\},$$

де  $I(t)$  – вихід ШНМ (вхідний сигнал управління на рульову машину).

Під час оперативної реалізації системи нейронного управління дійсний вихідний сигнал (фактичний курс судна)  $y(t)$  замінювався бажаним (значенням курсу, що задається)  $r(t)$  у якості одного з елементів вхідного вектора нейронної мережі. Такий підхід дозволив уникнути непотрібних операцій, властивих методу проб і помилок, що досить важливо для управління судном.

З різноманіття наявних схем адаптивного управління для розв'язання поставленого завдання була використана схема з інверсним контролером і прямою еталонною моделлю (емулятором) об'єкта управління (рис. 8). Об'єктом управління є судно разом з рульовою машиною.

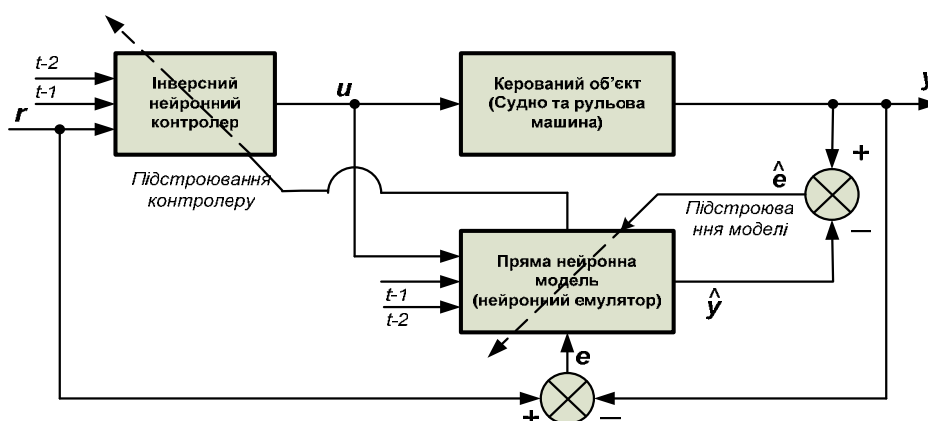


Рис. 8. Схема нейронного управління курсом судна:  $v$  – фактичний курс судна;  $\hat{y}$  – вихід емулятора;  $u$  – сигнал управління;  $r$  – курс, що задається;  $\hat{e}$  – помилка емуляції;  $e$  – помилка системи;  $(t-1)$ ,  $(t-2)$  – затримані сигнали.

Керуючий контролер був реалізований на основі інверсної моделі судна, входом якої є заданий курс, а виходом – сигнал управління. Для ідентифікації

інверсної динаміки судна на вхід контролера подавалися два затриманих сигнали, що представляють значення курсу на двох попередніх кроках.

Перевагою такого способу управління є можливість реалізації безпосереднього оперативного навчання контролера за сигналами нейронного емулятора. Останній використовувався як засіб для зворотного розповсюдження помилки з метою отримання еквівалентної помилки на виході контролера, необхідної для безпосереднього навчання нейроконтролера на кожному кроці.

Алгоритм роботи системи нейронного управління був реалізований програмно мовою програмування C++ під управлінням системи Matlab. Тривалість такту квантування і розрахункового циклу алгоритму визначалися залежно від типу судна і режиму його роботи. У розглянутому випадку був використаний крок квантування  $\tau=3$  с, що дозволило отримати прийнятну реакцію на більшість задаваних і збурюючих впливів. Для реалізації прямої і інверсної нейронних моделей були використані ШНМ прямого розповсюдження з вісьмома прихованими нейронами. Початкова ініціалізація ШНМ проведена з використанням навчальної вибірки з 5 зразків виду «значення курсу [град] – сигнал управління [В]». У якості об'єкта управління була використана дискретна модель (6) судна з урахуванням зазначених у розділі 3 нелінійностей.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [1–5, 8].

У **п'ятому розділі** дисертації здійснений порівняльний аналіз розглянутих методів управління рухом судна на курсі. Проведене імітаційне моделювання дозволило отримати і дослідити реакцію судна на типові для морської практики впливи. Якість управління на курсі оцінювалася шляхом моделювання наступних ситуацій:

- зміна курсу із заданою кутовою швидкістю повороту;
- поведінка судна в умовах стохастичних зовнішніх збурювань;
- поведінка судна в умовах складних гармонійних збурювань;
- реакція судна на короткочасне різке збурювання.

Під час проведення експерименту також ставилося завдання відстежити кути перекладки руля, що характеризують режим роботи рульової машини.

Моделювання проводилося з урахуванням основних нелінійностей, властивих рульовому приводу: кут перекладки руля був обмежений межами  $\pm 20^\circ$  (припустимо  $\pm 35^\circ$ ); швидкість повороту –  $\pm 4^\circ/\text{с}$  (припустимо  $\pm 7^\circ/\text{с}$ ).

Поворот із заданою кутовою швидкістю моделювався шляхом подачі заданого сигналу виду

$$K_3(t) = K_0 + \omega_3 \cdot t, \quad (12)$$

де  $K_0$  – курс перед поворотом,  $\omega_3$  – задана кутова швидкість повороту.

Якість управління оцінювалася за наступними параметрами: величиною перерегулювання  $\sigma$ , часом перехідного процесу  $T_n$ ; дисперсією перекладок руля  $D_r$ ; максимальним значенням зворотної перекладки руля –  $\delta_{max}$  під час утримання повороту. Для кожного закону управління отримано два графіки (рис. 9). Верхній графік показує зміну курсу  $K$ , що задається, у відповідності з виразом (12) і фактичного курсу. На нижньому графіку показана поведінка пера руля

$\delta(t)$ . Курс судна змінюється на  $40^\circ$ . При цьому вважалось, що попередній курс дорівнював  $0^\circ$ .

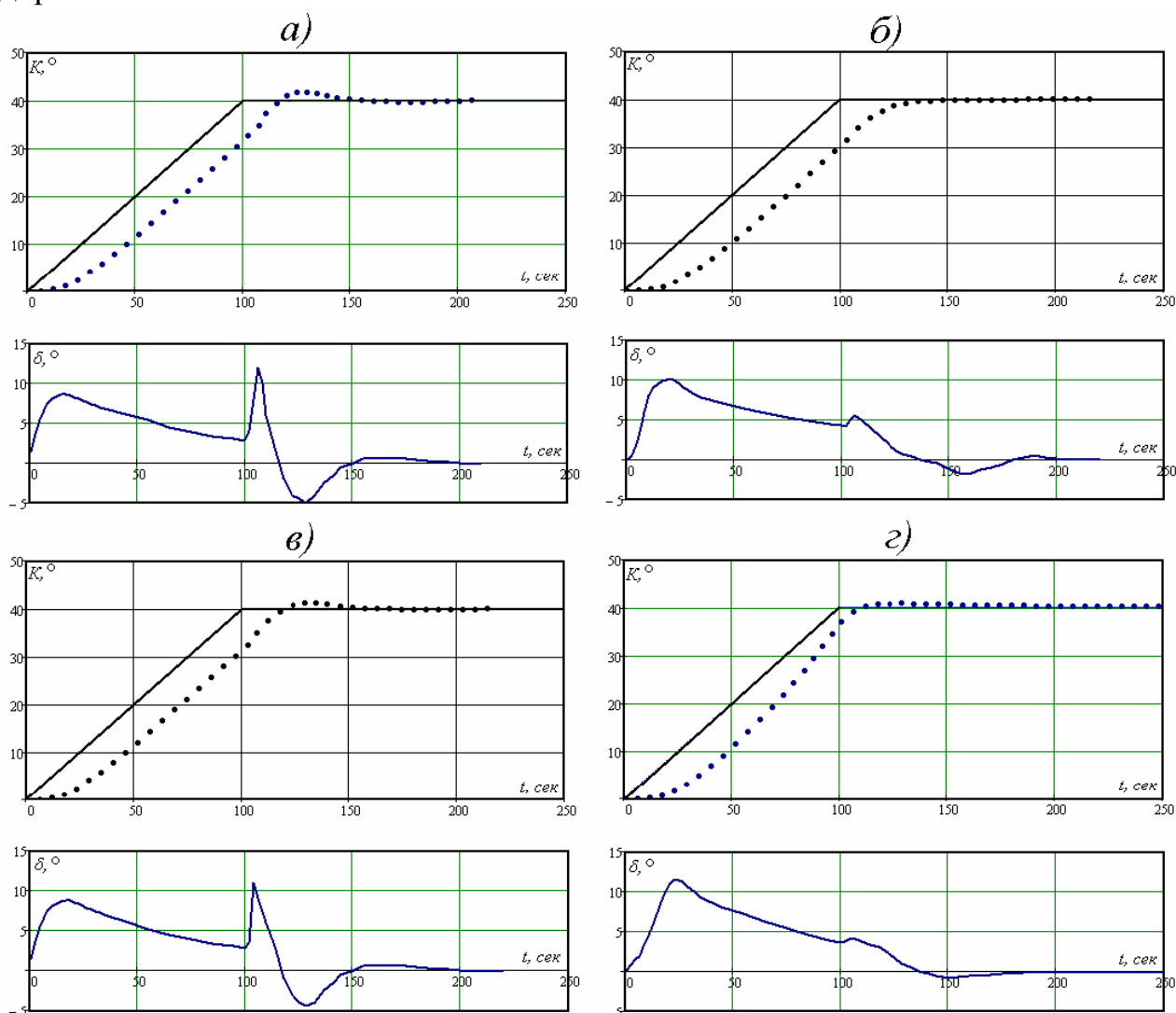


Рис. 9. Маневр із заданою кутовою швидкістю: а) система з ПІД-управлінням; б) система з нечітким управлінням; в) система з ПІД-управлінням з настроюванням параметрів від нейронної мережі; г) система з нейронним адаптивним управлінням

Моделювання реакції судна на стохастичні зовнішні впливи мало на меті оцінити його поведінку в умовах нерегулярного морського хвилювання. Як відзначалося в розділі 3, хвильове рискання практично неможливо зменшити дією руля, тому основна увага була приділена розгляду навантаження на рульову машину. Рискання судна (рис. 10) моделювалося випадковим процесом з кореляційною функцією (8).

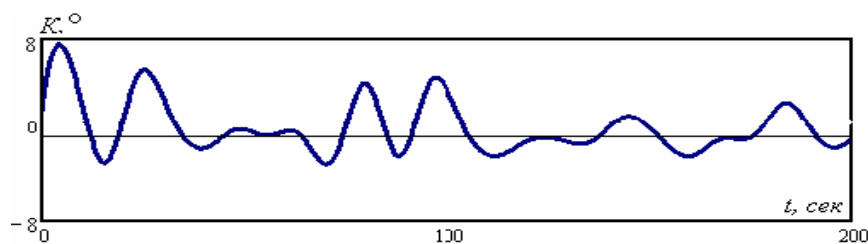


Рис. 10. Хвильове рискання судна

Ступінь навантаження на рульову машину оцінювалася дисперсією і кількістю перекладань руля, що перевищують за абсолютною величиною граничне значення  $b_r = 1,5^\circ$  за час 200 с. На рис. 11 наведені графіки вмикань рульової машини для розглянутих методів управління.

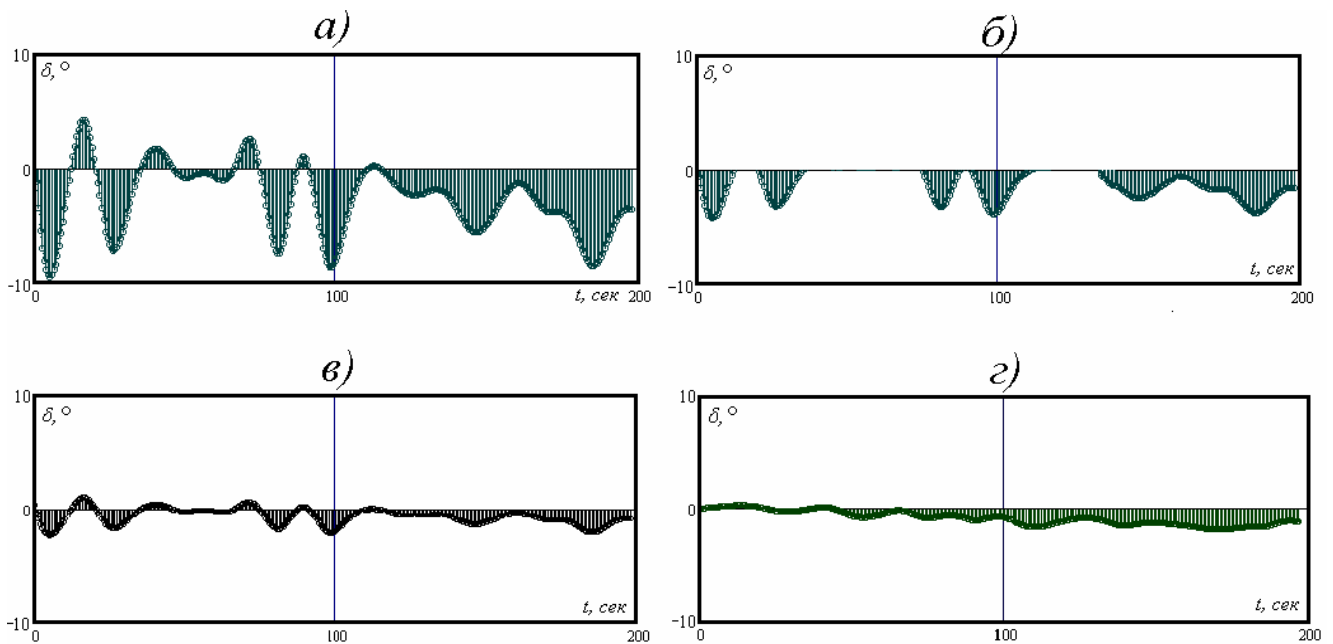


Рис. 11. Графік вмикань рульової машини: а) система з ПД-управлінням; б) система з нечітким управлінням; в) система з ПД-управлінням з настроюванням параметрів від нейронної мережі; г) система з нейронним адаптивним управлінням

Кількісні та якісні показники розглянутих методів управління курсом судна зведені в таблиці 2 і 3 відповідно.

Таблиця 2

**Кількісні показники розглянутих методів управління курсом судна**

Параметри якості	Нейронне адаптивне управління	Управління з нечіткою логікою	ПД закон з підстроюванням від нейронної мережі	ПД закон
Перерегулювання під час маневру курсом, %	2,1	0,2	3,3	4,1
Час регулювання (під час маневру курсом), с	104	122	116	114
Дисперсія перекладань руля (під час маневру курсом), град <sup>2</sup>	49,3	39	44,2	46,8
Дисперсія перекладань руля (під час стабілізації на хвилюванні), град <sup>2</sup>	2,6	4,0	3,1	15,7
Максимальний кут зворотної перекладки руля (під час маневру курсом), град	0,9	1,9	4,5	5,0
Кількість перекладань руля, що перевищують $1,5^\circ$ за час 200 с (під час стабілізації на хвилюванні)	0	13	12	23

**Якісні показники розглянутих методів управління курсом судна**

Критерії	Нейронне адаптивне управління	Управління з нечіткою логікою	ПД закон з підстроюванням від нейронної мережі	ПД закон
Наявність вбудованої математичної моделі судна	Не потрібно	Не обов'язково	Необхідно в процесі навчання ШНМ	Не обов'язково
Настроювання параметрів закону управління курсом	Самонастроювання. Настроювання параметрів не потрібно, однак потрібно попередньо обрати структуру і провести ініціалізацію нейронної мережі.	Коефіцієнти масштабування нечіткого закону управління потрібно вибирати попередньо. Доцільне ручне настроювання за різних змін режиму роботи. Можливе самонастроювання.	Самонастроювання. Настроювання основних параметрів закону управління здійснюється нейронною мережею.	Потрібне ручне настроювання параметрів закону управління
Обчислювальна складність	Висока	Середня	Висока	Низька
Характеристики слідуючого режиму (вихід на заданий курс)	Високі	Високі	Середні або високі	Середні або високі
Якість роботи в умовах зовнішніх збурювань (хвилювання, вітер)	Висока	Висока	Середня або висока	Погана (без перенастроювання параметрів управління)
Якість роботи в умовах різких короткочасних збурювань	Висока	Середня або висока	Середня	Середня
Навантаження на рульову машину	Низьке	Низьке або середнє	Середнє	Максимальне
Можливості згладжування керуючого сигналу	Високі	Середні	Погані	Погані
Можливості апаратної реалізації	Засоби паралельної обробки інформації (нейроплат) або звичайна мікропроцесорна техніка	Звичайна мікропроцесорна техніка	Мікропроцесорна техніка окремо або у сполученні з нейроплатами	Звичайна мікропроцесорна техніка

Результати проведеного імітаційного моделювання дозволили зробити висновки щодо ефективності методів інтелектуального управління під час розв'язання поставленого завдання, що підтверджує можливість і перспективність їхнього застосування в системах управління курсом судна.

Вдосконалення адаптивного управління методами нейронної ідентифікації дозволило забезпечити необхідну фільтрацію зовнішніх збурювань, швидкий і точний вихід на заданий курс у режимі маневру з мінімальними вмиканнями рульової машини, можливість самонастроювання на близький до оптимального режим управління.

Реалізація нечіткого управління як способу вдосконалення традиційного закону управління також дозволила забезпечити фільтрацію зовнішніх збурю-

вань, точний вихід на заданий курс у режимі маневру (з трохи більшим часом), менше навантаження на рульову машину.

Вдосконалення традиційного ПІД-закону шляхом доповнення його нейронною мережею, що визначає близькі до оптимальних значення параметрів управління, дозволило забезпечити роботу керуючої курсом системи у близькому до оптимального режимі без втручання судноводія.

Результати розділу відбито в роботах [3, 4, 8].

## **ВИСНОВКИ**

У дисертації отримане теоретичне узагальнення і нове рішення науково-практичного завдання підвищення ефективності управління рухом судна на курсі, яке полягає у розвитку методів, особливістю яких є застосування в законі управління апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж для оперативної ідентифікації нелінійної динаміки судна та її змін і знаходження на цій основі найбільш ефективного режиму управління курсом, використовуючи дані про стан судна та умови плавання.

Внаслідок проведеного дисертаційного дослідження:

- здійснено огляд існуючих підходів до управління курсом судна, обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи та методологічного забезпечення дисертаційного дослідження;
- отримано математичні моделі системи управління рухом судна на курсі, на базі яких проведено імітаційне моделювання поведінки реального судна та здійснено порівняльний аналіз досліджених методів управління курсом, що дозволило сформулювати основні наукові результати роботи;
- вперше встановлено, що близькі до оптимальних значення параметрів управління рухом судна на курсі забезпечуються під час багатомірної нелінійної ідентифікації, яка здійснюється штучною нейронною мережею, входним вектором для якої є набір даних про стан судна та умови плавання;
- вперше в закон управління курсом судна введено механізм нечіткого логічного висновку на базі нелінійних функцій приналежності, що дозволило більш повно враховувати нелінійну динаміку судна під час здійснення маневру та забезпечити фільтрацію високочастотних зовнішніх збурювань;
- вперше розроблено метод оперативного пошуку оптимальних значень параметрів управління курсом згідно критерію, який забезпечує бажану точність утримання на курсі за мінімуму перекладань руля. Основою методу став еволюційний алгоритм;
- вдосконалено метод адаптивного управління курсом судна за рахунок використання в контурі управління більш точних моделей судна та керуючого регулятора, отриманих методами нейронної ідентифікації.

Наукова значущість дисертаційного дослідження полягає у тому, що досліджені методи можуть бути використані для розв'язання завдань управління рухом інших рухомих об'єктів схожої складності, у т.ч. підводних апаратів та надводних суден з динамічним принципом підтримки.

Практична цінність роботи полягає у тому, що методи автоматичного управління рухом судна на курсі, засновані на використанні апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж, можуть бути використані під час проектування та розробки сучасних зразків керуючих рухом систем. Також результати дисертаційної роботи можуть бути використані у навчальному процесі та науково-дослідній роботі профільних вищих навчальних закладів.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Коновалов В.П. Повышение эффективности управления курсом судна/ В.П. Коновалов, С.А. Подпорин// Сб. научн. трудов/ СВМИ им. П.С.Нахимова. – Вып. 2(7). – Севастополь, 2004. – С. 101 – 105. (особисто автором проведений аналіз недоліків і обмежень існуючого підходу до управління курсом судна).

2. Богданов В.И. Оптимизация параметров судового ПИД-регулятора с помощью генетического алгоритма/ В.И. Богданов, С.А. Подпорин// Оптимизация производственных процессов: Сб. научн. трудов/ Севастопольский национальный технический университет. – Вып. 7. – Севастополь, 2004. – С.184 – 189. (особисто автору належить ідея і програмна реалізація генетичного алгоритму настроювання параметрів авторульового).

3. Богданов В.И. Нечеткий регулятор в задаче управления курсом судна /В.И. Богданов, С.А. Подпорин// Судовождение: Сб. научн. трудов/ ОНМА. – Вып. 10. – Одесса, 2005. – С. 15 – 20. (особисто автору належить ідея і програмна реалізація нечіткого регулятора в системі управління курсом судна).

4. Богданов В.И. Использование нечеткой логики для повышения качества управления судном на курсе/ В.И. Богданов, С.А. Подпорин// Сб. научн. трудов/ СВМИ им. П.С. Нахимова. – Вып. 2(8). – Севастополь, 2005. – С. 89 – 97. (особисто автору належить запропонований механізм нечіткого логічного висновку і програмна реалізація нечіткої системи управління курсом судна).

5. Подпорин С.А. Адаптивный авторулевой с подстройкой параметров от нейронной сети/ С.А. Подпорин, В.И. Богданов// Судовождение: Сб. научн. трудов/ ОНМА. – Вып. 13. – Одесса, 2007. – С.13 – 21. (особисто автору належить ідея і програмна реалізація системи управління курсом судна з підстроюванням параметрів від нейронної мережі).

6. Подпорин С.А. Методы интеллектуального управления в задаче автоматического управления движением судна/ С.А. Подпорин// Сб. научн. трудов/ СВМИ им. П.С. Нахимова.–Вып. 2(12).–Севастополь: СВМИ, 2007.–С.191–196.

7. Подпорин С.А. Перспективы использования нейро-нечетких и гибридных технологий в системах управления движением морских судов/ С.А. Подпорин, А.М. Олейников// Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Сб. научн. трудов/ Днепродзержинский гос. тех. ун-т. – Тематический выпуск. – Днепродзержинск, 2007. – С. 305–307. (особисто автором проведено аналітичне узагальнення можливостей інтелектуальних гібридних систем управління рухом суден).

8. Подпорин С.А. Повышение эффективности автоматического управления движением судна на курсе в условиях волнения/ С.А. Подпорин// Сб. научн.

трудоу/ СВМИ им. П.С. Нахимова. – Вып. 1(14). – Севастополь: СВМИ, 2008.– С. 192-198.

9. Подпорін С.А. Моделирование системы автоматического управления курсом судна с нейроконтроллером/ С.А. Подпорін// Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми економіко-математичного моделювання морських транспортних технологій».–Маріуполь: АМІ ОНМА, 2007.–С.195–207.

10. Подпорін С.А. Нечеткий регулятор в задаче управления курсом судна/ С.А. Подпорін// Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з міжнародною участю «Інформаційно-керуючі системи та комплекси» 2007. – Миколаїв: ІАЕ НУК, 2007. – С. 16-20.

11. Подпорін С.А. Анализ методов интеллектуального управления курсом судна/ С.А. Подпорін, О.М. Олейников// Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів» ПАЕТЗ-2007. – Миколаїв: ІАЕ НУК, 2007. – с. 80–92. (особисто автором проведено аналітичне узагальнення можливостей інтелектуальних систем управління рухом судна на курсі).

12. Подпорін С.А. Intelligent control techniques applied to ship steering/ С.А. Подпорін// 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.

## АННОТАЦИЯ

Подпорин С.А. Развитие методов интеллектуального управления движением судна на курсе. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.22.13 – Навигация и управление движением. Одесская национальная морская академия, Одесса, 2009 г.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи повышения эффективности управления движением судна на курсе методами интеллектуального управления.

Отмечены основные недостатки и ограничения существующего подхода к управлению курсом судна. Среди них: возникающее при маневре курсом перерегулирование, вызванное нелинейной динамикой судна как объекта управления; ухудшение работы в условиях внешних возмущений, ведущее к выработке частых, неэффективных перекладок руля; необходимость перенастройки параметров управления при изменении режима или условий плавания судна. Отмечено, что существующими методами теории автоматического управления указанные недостатки не могут быть надежно преодолены, что определило необходимость поиска иных, более эффективных подходов к управлению движением судна.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на управляемость судна на курсе, среди которых: изменение загрузки и скорости судна; влияние мелководья; изменение погодных условий, в т.ч. силы и направления волнения.

Для решения главной задачи предложено две стратегии: 1) дальнейшее совершенствование существующего ПИД-закона управления движением на курсе

методами теории интеллектуального управления; 2) разработка альтернативного метода, основанного на адаптивном управлении с эталонной моделью и регулятором, полученными в результате нейронной идентификации.

Для проведения эксперимента имитационного моделирования разработана математическая модель судна и рулевой машины, учитывающая основные нелинейности: ограничения по углу и скорости перекладки руля. Получены дискретные модели управляемого объекта и регулятора.

Для оптимальной настройки параметров закона управления предложено использование эволюционного алгоритма. Проведена его разработка и программная реализация, позволившая получить близкие к оптимальным значения параметров закона управления. В качестве критерия оптимальности использован критерий, учитывающий минимум дисперсии рыскания и перекладок руля.

В диссертационной работе впервые рассмотрен перспективный способ управления курсом судна, основанный на использовании механизма нечеткого логического вывода с нелинейными функциями принадлежности. Введение нечетких логических правил сделало закон управления нелинейным, что позволило в более полной мере учесть нелинейную динамику судна, обеспечить фильтрацию внешних возмущений, снизить нагрузку на рулевую машину.

В работе впервые установлена возможность и реализован способ определения близких к оптимальным параметров управления курсом с помощью нейронной сети на основе данных о состоянии судна и условиях плавания. Это позволило реализовать самонастройку в системе управления и обеспечить работу в близком к оптимальному режиме без вмешательства судоводителя.

Усовершенствован метод адаптивного управления курсом судна за счет использования в нем более точных моделей управляемого объекта и регулятора, полученных с помощью нейронной идентификации. Это позволило избавиться от недостатков и ограничений, связанных с ПИД-управлением.

Для оценки и сравнительного анализа рассмотренных методов управления проведен эксперимент имитационного моделирования. Рассмотрена реакция одновинтового судна типа транспортный рефрижератор на типичные для морской практики, задающие и возмущающие воздействия. Особое внимание уделено поведению пера руля, характеризующему нагрузку на рулевую машину.

Результаты моделирования показали, что использование интеллектуальных методов управления позволяет в более полной мере учесть нелинейную динамику судна, обеспечить более точный выход и удержание на курсе, фильтрацию внешних возмущений, возможность реализовать близкий к оптимальному режим управления для различных условий плавания, не требуя при этом вмешательства судоводителя. Практически значимыми являются возможности предложенных методов управления обеспечивать большую эффективность и безопасность перехода по сравнению с традиционными подходами. На основе предложенных методов могут быть реализованы новые конкурентноспособные образцы авторулевых.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, авторулевой, курс судна, эволюционный алгоритм, нечеткая логика, искусственные нейронные сети, ПИД-регулятор

## АНОТАЦІЯ

Подпорін С.А. Розвиток методів інтелектуального управління рухом судна на курсі. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Спеціальність 05.22.13 – Навігація та управління рухом. Одеська національна морська академія, Одеса, 2009 р.

Дисертаційна робота присвячена актуальній проблемі підвищення ефективності управління рухом судна на курсі. Розв'язання поставленої проблеми здійснюється методами інтелектуального управління, заснованими на застосуванні апарату нечіткої логіки, штучних нейронних мереж і генетичного алгоритму. У роботі розроблено метод пошуку близьких до оптимальних параметрів закону управління курсом шляхом використання еволюційного алгоритму; запропонований і досліджений перспективний спосіб управління курсом, заснований на апараті нечіткої логіки; встановлено можливість та розроблено метод визначення близьких до оптимальних параметрів управління шляхом застосування штучної нейронної мережі; вдосконалено метод адаптивного управління курсом судна за рахунок використання в контурі управління більш точних моделей судна та керуючого регулятора, отриманих методами нейронної ідентифікації. Для оцінки і порівняльного аналізу досліджених методів управління проведено імітаційне моделювання поведінки судна типу транспортний рефрижератор. У результаті зроблено висновок про їхню ефективність під час розв'язання завдань управління курсом судна.

Ключові слова: інтелектуальне управління, авторульовий, курс судна, еволюційний алгоритм, нечітка логіка, штучні нейронні мережі, ПІД-регулятор

## SUMMARY

Podporin S.A. Development of methods of intellectual ship course steering. – Typescript. The candidate's thesis on special field of study 05.22.13 – Navigation and traffic control. Odessa National Maritime Academy, Odessa, 2009.

The thesis addresses the issue of raising the efficiency of ship course steering. Intelligent control techniques such as genetic algorithms, fuzzy logic, and artificial neural networks are used to deal with the problem. Genetic methods are proposed for optimization of tuning procedure for the ship's autopilot control algorithm. A new control algorithm for course steering based on fuzzy inference machine with nonlinear membership functions is proposed and studied. A new technique of finding near optimal parameters of ship steering algorithm with help of artificial neural network is proposed and studied. An alternative adaptive method of ship course steering based on neural control techniques is proposed and studied. The latter was shown to be able to compensate for changing ship's dynamics and function as a self-tuning adaptive algorithm. Imitative modeling of real refrigerating ship's behavior was undertaken in order to assess and compare performance of proposed intelligent control techniques. The results obtained allowed to make conclusion that such techniques are fully applicable for the task and generally may perform better than traditional PID-algorithm.

Keywords: Intelligent control, course steering, autopilot, ship, genetic algorithm, fuzzy logic, artificial neural networks, PID-controller