

## *Системи підтримки прийняття рішень на основі нечіткого логічного виводу*

У статті обґрунтована доцільність і необхідність нечіткого підходу для вирішення наступних задач: апаратно-алгоритмічної організації системи керування кораблем, розробки систем прогнозування поведінки корабля в невизначених, змінних умовах і корабельних систем підтримки прийняття рішень для маневрування в умовах вузьких місць, каналах чи при зустрічному русі і т.д. Елементи прийняття рішень розглядаються як частина єдиної контролюючої системи, яка функціонує в реальному часі. Окремі нечіткі блоки реалізовані за допомогою PLD з використанням VHDL програмного забезпечення.

At present paper the expedience and necessity of fuzzy approach is rezoned for the following tasks: hardware-algorithmic organisation of ship control systems, development of systems for forecasting of ship behaviour in uncertain changeable conditions and a ship decision support system for manoeuvring in conditions of narrow places, channel or oncoming traffic etc. Decision-making elements as parts of whole real-time control system are considered. Hardware of the separate fuzzy units is implemented with PLD by using VHDL software.

Підвищення ефективності керування сучасними суднами як багатозв'язними морськими рухомими об'єктами неможливе без застосування в екстремальних ситуаціях інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (СППР). Необхідність розробки такого класу СППР для підтримки процесів прийняття рішень обумовлена тим, що людина-оператор (судноводій) має саме в реальному часі прогнозувати поведінку судна і приймати складні рішення, що забезпечують найбільш безпечне функціонування судна і не допускають глобальних аварій. Процес управління судном ще більше ускладнюється при виникненні випадкових збоїв або пошкоджень в одному чи декількох сепаратних каналах багатозв'язної системи керування. Разом з тим в екстремальних ситуаціях значно зростає ступінь психічного і фізичного навантаження на людину-оператора, що призводить до підвищення імовірності прийняття нею неоптимальних або навіть помилкових рішень.

Застосування класичних методів до організації та синтезу судових систем автоматичного керування при їх проектуванні, насамперед, вимагає наявності повного і точного математичного опису об'єкта керування. Слід відмітити, що

сучасне судно як багатозв'язний з точки зору процесів керування об'єкт складається з великої кількості різномірних систем і устаткування, які реалізують конкретні режими функціонування та експлуатації судна. В зв'язку з цим розширена структура повної математичної моделі судна має включати моделі всіх основних підсистем, як правило, взаємозв'язних між собою, що визначає її суттєву складність. Так, наприклад, для дослідження режимів руху судна за курсом при змінних зовнішніх збуреннях, маневреності в складних умовах, проході в вузькостях, безпечного розходження суден в екстремальних умовах тощо структура математичної моделі судна має включати моделі взаємозв'язних керуючих підсистем, що забезпечують керування курсом та швидкістю судна, його стабілізацію при хитах, автоматизацію процесів керування судовою енергетичною установкою, автоматизацію електроенергетичної системи та ін. Разом з тим побудовані на основі традиційних методів системи керування і контролю зазначених режимів не завжди здатні (незалежно від ступеня складності математичної моделі) забезпечити ефективно розв'язання широкого комплексу задач, що

виникають при керуванні судном в екстремальних умовах. Насамперед, це пов'язано з високим рівнем невизначеності вхідної інформації для різних керуючих рівнів [18] розглянутих систем керування. Застосування сучасних методів та засобів штучного інтелекту до проектування систем управління морськими рухомими об'єктами, що функціонують в умовах невизначеності інформації, є перспективним напрямком підвищення ефективності процесів прийняття рішень та управління [16; 19]. Саме цим, в першу чергу, обумовлюється необхідність використання фаззи-підходу до синтезу тих компонентів, що визначають суть процедур прийняття рішень. При цьому в залежності від керуючого рівня процес прийняття рішень може відбуватися як в інтерактивному, так і в більш складному за алгоритмами функціонування автономному режимі взаємодії людини-оператора з системою управління. Використання ж ієрархічного принципу для структурно-організаційної побудови комплексної системи керування судном дозволить ефективно вирішувати задачі прийняття рішень в автоматичному режимі на кожному з керуючих рівнів: стратегічному, тактичному, виконавчому. Тому, безумовно, актуальною є необхідність більш детального розгляду проблеми застосування фаззи-підходу до проектування судових систем управління на нечіткій логіці з метою підвищення їх функціональних можливостей при прийнятті рішень в умовах невизначеності та при управлінні в екстремальних ситуаціях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання проблем управління та прийняття рішень в умовах невизначеності на основі фаззи-підходу, показує, що широкого застосування в теоретичних дослідженнях [21] та в реально діючих системах [13; 14; 18] теорія нечітких множин знайшла тільки наприкінці ХХ століття, хоча вперше вона була запропонована професором Л. Заде в 1965 році [20]. Стрімке зростання в останні роки обчислювальних потужностей мікропроцесорної техніки дозволило вченим повною мірою оцінити потенційні можливості теорії нечітких множин та

нечіткої логіки, в результаті чого вона зайняла достойне місце в науковому напрямі, пов'язаному з керуванням процесами та об'єктами різного характеру (технічними, соціологічними, економічними і т.п.). Найбільш ефективним і перспективним виглядає застосування даного підходу в системах, що функціонують у нестационарних умовах (космічних апаратах, підводних маніпуляторах, керованих системах з рухомою основою і т.п.) [7; 13; 18]. Вищесказане підтверджується результатами аналізу діючих систем керування об'єктами такого класу, для яких побудовані на нечіткій логіці та алгоритмах, синтезованих із застосуванням теорії нечітких множин, контролери показали себе як більш «сприйнятливі» до основних корисних сигналів і менш чутливі до шумів ніж контролери, побудовані на основі застосування класичних методів теорії керування [12; 14].

Такі властивості нечітких контролерів є прямим наслідком реалізації основного принципу побудови нечітких алгоритмів прийняття рішень, що характеризується етапами: фазифікації (визначення ступеня належності вхідних сигналів чи координат до відповідних нечітких підмножин), що реалізується за допомогою відповідних функцій належності різноманітної форми (трикутної, дзвоноподібної, гаусової і т.п.); нечітким логічним виводом, де здійснюється обробка нечіткої інформації на основі бази лінгвістичних правил з реалізацією схем Мамдані або Сугено; дефазифікації (відображення результуючої нечіткої множини на область допустимих значень чіткої вихідної координати).

Використанню нечіткої логіки для автоматизації процесів прийняття рішень при управлінні морськими рухомими об'єктами в умовах невизначеності присвячена досить обмежена кількість публікацій [18], що говорить про недостатню увагу вчених до проблеми, що розглядається в даній статті.

Виходячи з усього вищесказаного, можна говорити про доцільність використання нечіткої логіки для синтезу різноманітних функціональних елементів і

блоків судових систем керування, що розв'язують задачі апроксимації, параметричної і структурної ідентифікації та ін. В цьому випадку застосування фаззі-алгоритмів є не тільки виправданим, але і необхідним, оскільки:

- а) побудова з застосуванням класичних підходів адекватних математичних моделей суден є досить складною задачею, оскільки дані об'єкти керування з математичної точки зору складно формалізуються;
- б) між координатами об'єкта керування існують складні нелінійні взаємозалежності;
- в) процеси вимірювання окремих сигналів та ідентифікації параметрів об'єктів і зовнішнього середовища супроводжуються значними труднощами;
- г) необхідно в процесі прийняття рішень враховувати вхідну інформацію як кількісного, так і якісного типу;
- д) існує необхідність у формалізації експертних знань, заданих у вигляді лінгвістичних висловлень і т.п.

Цілі даної статті полягають у публікації отриманих авторами нових результатів, пов'язаних з:

- зі структурною організацією взаємозв'язків системи комплексної автоматизації судна та судової СППР на нечіткій логіці;
- аналізом результатів моделювання нечітких СППР для розв'язання морських навігаційних задач в умовах невизначеності на основі розробленого авторами програмного забезпечення;
- побудовою поведінкових VHDL-моделей верхнього ієрархічного рівня блоку нечіткого логічного виводу СППР в середовищі Active-HDL.

Нижче більш детально розглядаються судові СППР, що синтезовані на основі фаззі-підходу, тобто з застосуванням теорії нечітких множин та нечіткої логіки.

### *Структурна організація судової СППР на нечіткій логіці*

Безпека мореплавання і безпека життєдіяльності на морі – два тісно пов'язаних між собою поняття, що є основними для вчених, що працюють в області морських технологій [1; 2; 10]. Значний ріст загального тоннажу морських перевезень і, як наслідок, чисельності світового флоту неминує веде і до збільшення числа аварій. Умовно всі аварії можна розділити на два основних типи: 1 – аварії, пов'язані з технічними несправностями систем, 2 – аварії, що виникають внаслідок помилкових дій людини-оператора. Аналіз статистичних даних показує, що в морській практиці найбільш часто зустрічаються аварії другого типу. Відповідно до інформації [11], наданої Міжнародною морською організацією (ІМО), від 67% до 80% всіх аварій на суднах пов'язані з людським фактором, тобто з помилками судоводіїв, членів екіпажу, лоцманів, операторів судових систем і т.д. При цьому більшість аварійних випадків пов'язана з прийняттям найбільш відповідальних або нестандартних рішень в умовах нечіткої інформації про об'єкт керування і середовище його функціонування. Серед проблемних ситуацій, що найбільш часто зустрічаються в морській практиці, слід назвати: розходження з зустрічними суднами; плавання в зонах підвищеної навігаційної небезпеки – вузькостях, каналах, акваторіях портів; вантажні і бункерувальні операції у відкритому морі і т.п. Оскільки в таких умовах людині-оператору складно однозначно оцінити ситуацію, то виникає небезпека прийняття помилкових рішень. Розробка працюючих в реальному часі СППР забезпечує зниження впливу суб'єктивного фактора при виборі рішень [12; 20].

Узагальнена структурна організація взаємозв'язків комплексної системи автоматизації судна [17] та судової СППР на нечіткій логіці, що дозволяє формувати багатокритеріальні рішення в критичних ситуаціях, представлена на рис. 1.

Інформаційна підсистема 1 формує в реальному часі потік даних про стан та параметри судна для технічної діагностики всіх його систем. Одночасно обробляється

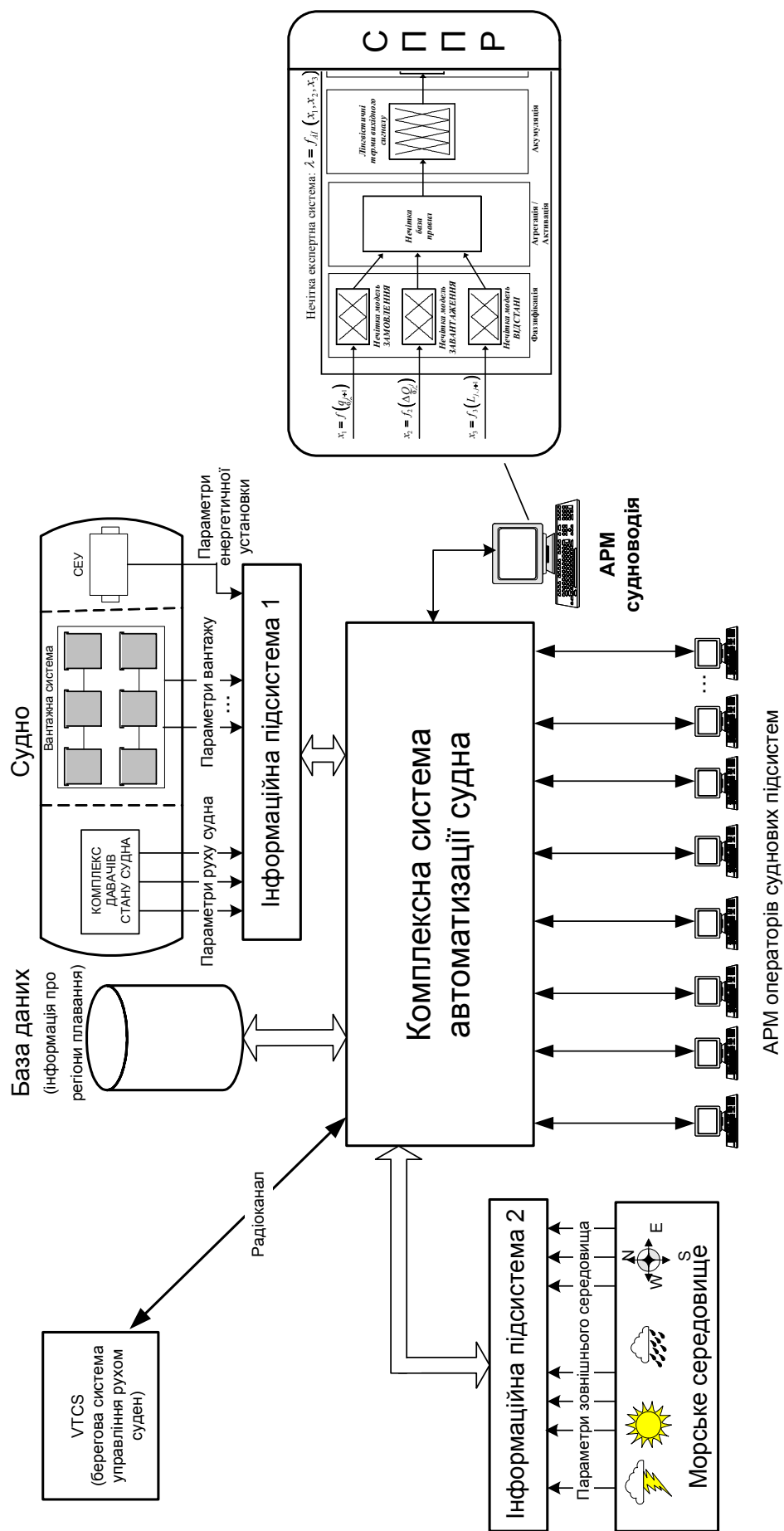


Рис. 1. Узагальнена структурна організація взаємозв'язків комплексної системи автоматизації судна та суднової СППР

інформація (Інформаційна підсистема 2) про зовнішнє середовище з врахуванням особливостей поточного району плавання, місцевих правил судноплавства і т.п. Оскільки вхідні параметри, на базі яких здійснюється вибір рішень, мають не тільки кількісний, але і якісний характер (кваліфікація екіпажа, рівень зношеності устаткування і т.п.), то в якості парадигми для побудови алгоритмів прийняття рішень обрано фаззі-підхід.

Основна перевага вказаного підходу полягає в можливості представлення вектора вхідних координат як за допомогою кількісних, так і якісних змінних, описаних лінгвістичними термами ("Низький", "Середній", "Високий" і т.п.). В основі такої моделі прийняття рішень лежить база знань, що, в свою чергу, складається з продукційної множини правил типу «Якщо  $A$  То  $B$ ». База

правил формується на основі експертних оцінок і статистичних даних з можливістю її подальшого коригування.

Представлена на рис. 1 система дозволяє успішно вирішувати наступні задачі: збір і обробка інформації про стан судна і зовнішнього середовища; технічна діагностика пошкоджень у сепаратних каналах судна; моделювання поведінки судна; прогнозування поведінки судна з урахуванням зовнішніх факторів і апіорно-заданої інформації; інформаційна підтримка людини-оператора на основі бази даних про особливості поточного району плавання (течії, погодних умов, місцевих правил судноплавства і т.п.); визначення впливу параметрів стану судна і зовнішнього середовища на множину альтернативних рішень; прийняття оптимальних рішень; роз'яснення операторові послідовності

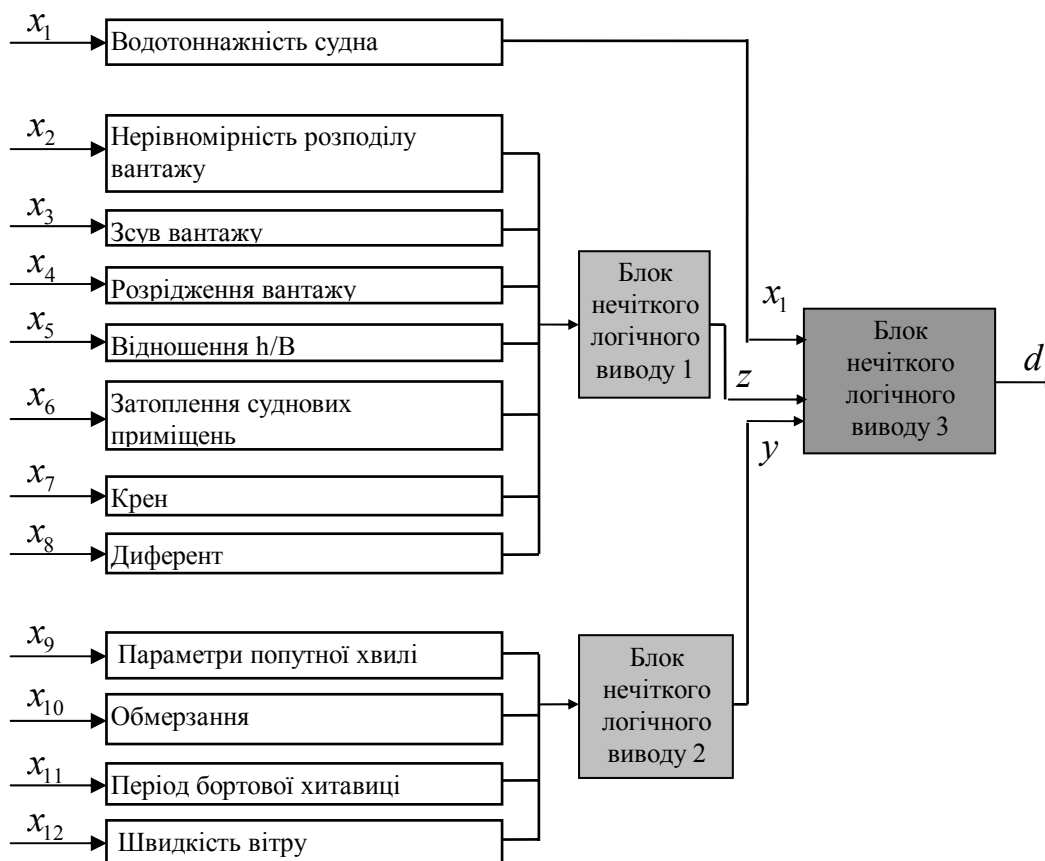


Рис. 2. СППР для оцінки остійності судна

Визначальними факторами при проходженні судном каналів, вузькостей або маневруванні в складних районах навігації є основні розмірності судна, його маневреність, глибина і ширина проходу, професіоналізм людини-оператора тощо. При цьому

необхідно звести до мінімуму імовірність виникнення аварійних ситуацій (зіткнення суден, посадки на мілину), одночасно здійснюючи оптимізацію завантаження каналу з метою мінімізації часу простою суден при очікуванні входу в канал [4; 15].

Пропонується вирішувати цю задачу шляхом попереднього аналізу всіх значущих факторів [12] із застосуванням СППР перед кожним входом судна в канал (вузькість). При цьому вважається, що людина-оператор має попередню інформацію про зовнішні збурення (містить бібліотеку зовнішніх збурень даного району).

Вектор стану судна  $\mathbf{X} = \{x_1; x_2; x_3; x_4; x_5\}$  складається з наступних параметрів:

$x_1$  – кількісний параметр  $x_1 \in [0, 1]$ , що являє собою щільність функції імовірності

$$\Delta Z = |Z_{\text{cur}} - Z_{\text{des}}|,$$

де  $Z_{\text{cur}}$  – поточне значення координат судна;

$Z_{\text{des}}$  – бажане значення координат судна;

$x_2$  – кількісний параметр  $x_2 \in [0, V_{\text{max}}]$ , що являє собою швидкість судна у вузлах, де  $V_{\text{max}}$  – припустиме значення швидкості, що залежить від району плавання і технічних характеристик судна;

$x_3$  – якісний параметр, що характеризує досвід лоцмана,  $x_3 \in \{Н, НС, С, ВС, В\}$ ;

$x_4$  – якісний параметр, що характеризує рівень втоми екіпажу,  $x_4 \in \{Н, НС, С, ВС, В\}$ ;

$В\}$ ;

$x_5$  – якісний параметр, що являє собою якісну оцінку зовнішніх впливів (ряд факторів, вплив яких не може бути оціненим в числовому вигляді, – час доби, пора року, погодні умови, видимість і т.п.),

$x_5 \in \{Н, НС, С, ВС, В\}$ .

Параметри  $x_3; x_4; x_5$  визначаються за допомогою шкали, що складається з п'яти лінгвістичних термів ("В" – високий, "ВС" – вище середнього, "С" – середній, "НС" – нижче середнього, "Н" – низький). Множина альтернативних оцінок (рішень) має вигляд:

$$D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\},$$

де  $d_i$  –  $i$ -й рівень небезпеки, при цьому рівень  $d_5$  відповідає максимальній небезпеці при входженні судна в вузькість, а  $d_1$  – мінімальній небезпеці,  $i = 1 \dots 5$ .

Результати моделювання процесів прийняття рішень представлені на рис. 3 для наступних значень вхідних параметрів:

а)  $x_2 = 5, V_{\text{max}} = 5, x_3 = С, x_4 = С, x_5 = С$ ;

б)  $x_2 = 3, V_{\text{max}} = 5, x_3 = С, x_4 = С, x_5 = С$ ;

в)  $x_2 = 3, V_{\text{max}} = 5, x_3 = Н, x_4 = С, x_5 = С$ ;

г)  $x_2 = 3, V_{\text{max}} = 5, x_3 = В, x_4 = С, x_5 = С$ .

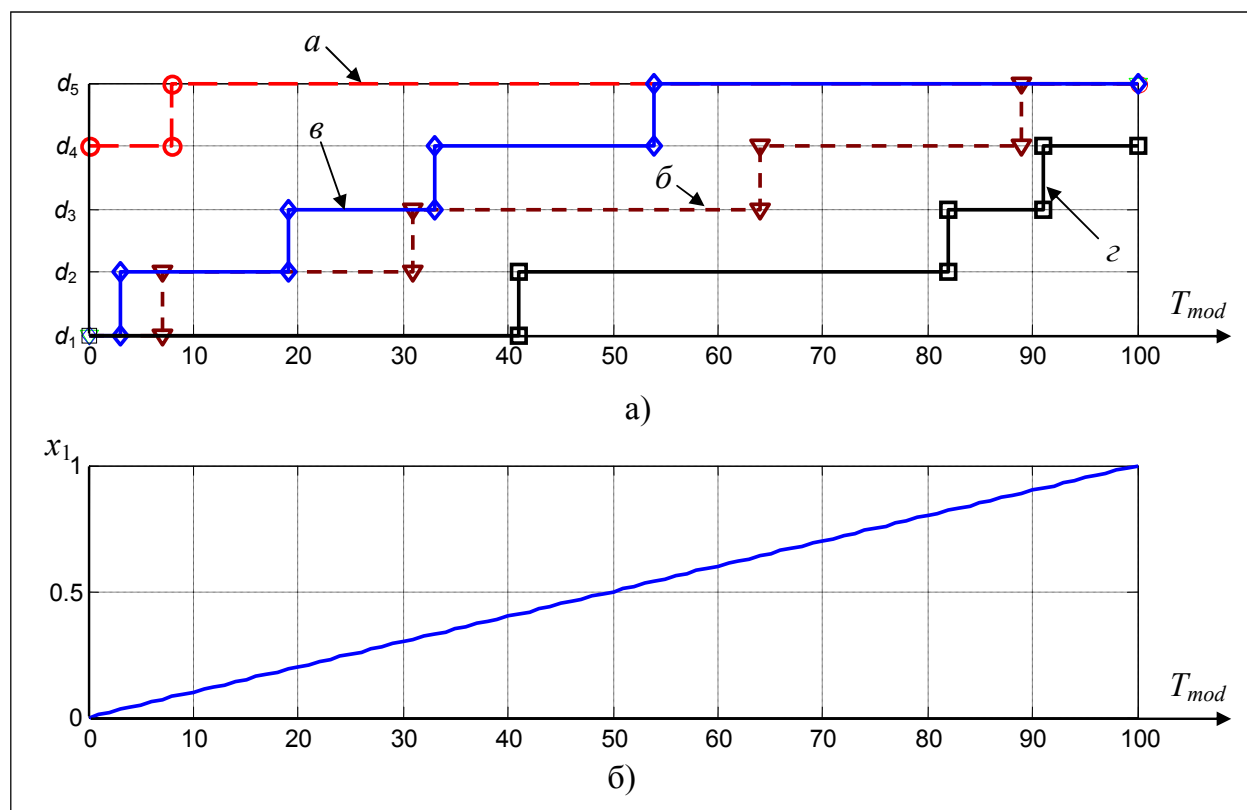


Рис. 3. Результати моделювання процесів прийняття рішень

Розроблене на основі фаззи-підходу програмне забезпечення СППР дозволяє, як показують результати моделювання, оцінити ступінь впливу різних якісних параметрів на поведінку судна.

Основним компонентом розроблених СППР є блок нечіткого логічного виводу (БНЛВ), структуру VHDL-моделі верхнього ієрархічного рівня якого наведено на рис. 4. Розроблений БНЛВ містить три 10-бітних вхідних порти  $X1$ ,  $X2$ ,  $X3$ , що призначені для введення

значень вхідних сигналів. При необхідності можна змінювати розрядність входів у межах від 4-х до 32-х біт. Вхідні сигнали  $X1$ ,  $X2$ ,  $X3$  повинні бути представлені у вигляді беззнакових цілих чисел. Крім того, БНЛВ містить вхідний порт CLK зовнішнього сигналу тактової частоти, що служить для синхронізації всіх структурних складових блоку нечіткого логічного виводу. Вихід БНЛВ являє собою 10-розрядний порт для передачі дефазифікованого значення

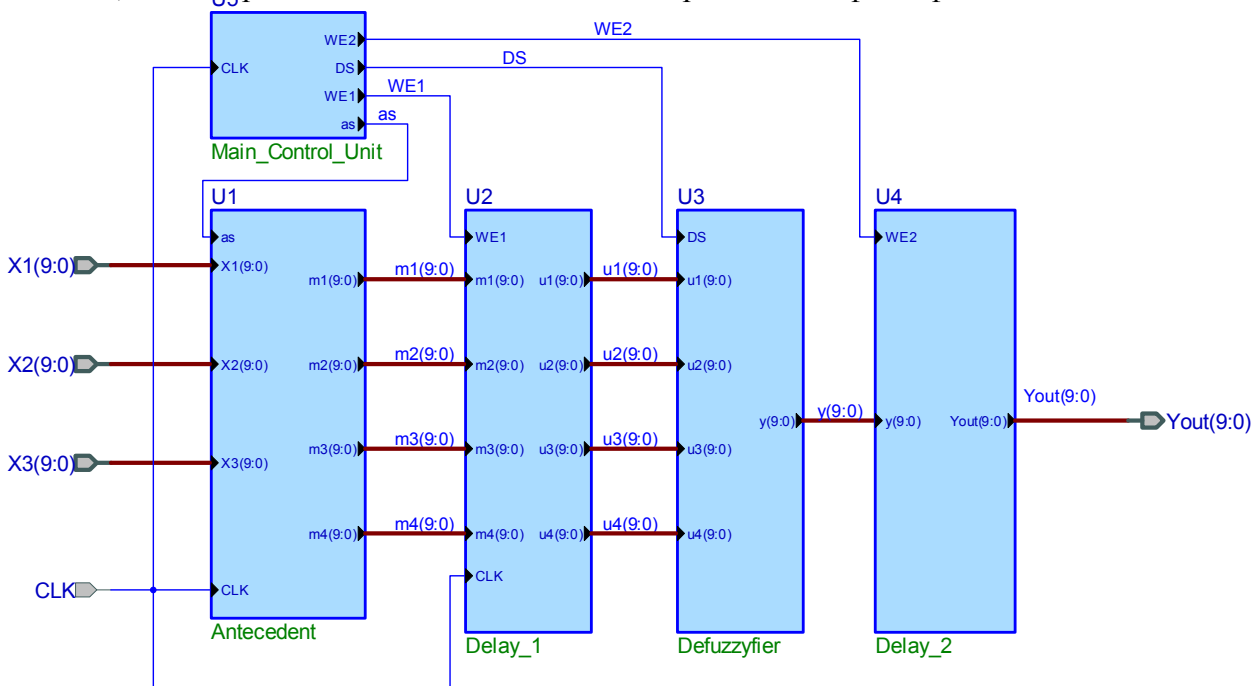


Рис. 3. Результати моделювання процесів прийняття рішень

Процес нечіткого логічного висновку розділено на два основних етапи: етап розрахунку значень істиностей лівих частин правил (антецедентів) та етап формування вихідного значення БНЛВ [3; 9]. Перший етап включає фазифікацію вхідних сигналів та агрегацію нечітких правил [21]. Другий етап об'єднує акумуляцію функцій належності та дефазифікацію вихідних сигналів БНЛВ.

Таким чином, верхній ієрархічний рівень БНЛВ містить модулі *Antecedent* та *Defazzyfier*, що реалізують перший та другий етапи процесу, відповідно. Для підвищення інтерфейсної частоти пристрою застосовано конвейерний підхід, що ґрунтується на паралельній обробці структурними

складовими різних наборів даних. Для реалізації такого конвейерного механізму до складу пристрою введено елементи затримки *Delay\_1* та *Delay\_2*, а також блок *Main\_Control\_Unit*, що узгоджує роботу всіх структурних складових верхнього ієрархічного рівня.

Циклограма роботи БНЛВ, що наведена в таблиці, містить наступні кроки:

*Крок 0:* На входи БНЛВ надходить *Набір Даних\_1* – набір вхідних даних  $X1$ ,  $X2$ ,  $X3$ ; блок *Main\_Control\_Unit* за допомогою команди *C1* активізує обробку даних  $X1$ ,  $X2$ ,  $X3$ ; блоки *Antecedent* та *Defazzyfier* перебувають в режимі очікування ("W"); блоки *Delay\_1* та *Delay\_2* зберігають





## Висновки

Аналіз основних режимів функціонування суден, екстремальних ситуацій та зовнішніх збурень дозволяє зробити висновок, що для підвищення ефективності прийняття рішень людиною-оператором в умовах невизначеності доцільно забезпечити процеси управління суднами інтерактивним супроводженням при взаємодії людини-оператора з судновою СППР на нечіткій логіці. Результати моделювання розроблених СППР підтверджують ефективність та

працездатність алгоритмів прийняття рішень на основі використання нечіткого логічного виводу з урахуванням кількісного та якісного характеру факторів впливу. Запропоновані підходи до формування VHDL-моделей блоків нечіткого логічного виводу в середовищі Active-HDL можуть бути поширені на широкий клас СППР для забезпечення їх ефективного функціонування в реальному часі. В подальшому наукові дослідження доцільно продовжити в напрямку формалізації процесів прийняття рішень з урахуванням взаємопов'язаності

## Література

1. Александров М.Н. Безопасность человека на море. – Л.: Судостроение, 1983. – 208 с.
2. Жидков Э.М., Верещагин С.А., Павликов С.Н. Требования к точности судовождения в прибрежной зоне // Судостроение, 1999. – № 12. – С. 29-30.
3. Кондратенко Ю.П., Сидоренко С.А. Методи проектування нечітких пристроїв прийняття рішень на основі прогамованих логічних ІМС // Наукові записки НАУКМА. – Київ, 2000. – Т. 18. Ч.2. – С. 401-412.
4. Кондратенко Г.В. Формування цільових функцій при оптимізації процесів управління в умовах невизначеності // Матеріали міжнародної конференції з управління "Автоматика – 2002", Донецьк, ДонНТУ, 2002. – С. 125-127.
5. Кондратенко Ю.П., Сидоренко С.А. Структурно-алгоритмічна організація суднової ІМС для автоматизованого прийняття рішень в екстремальних ситуаціях // Праці Одеського політехнічного університету, 1999. – Вип. 2. – С. 174-178.
6. Нечаев Ю.Н., Серова Е.Г. Интерпретация экстремальных ситуаций в интеллектуальных системах параллельного действия // Штучний Інтелект. – 2000. – № 3. – С. 281-289.
7. Сабадаш А.И. Формирование вывода при управлении судовыми ядерными энергетическими установками // Штучний Інтелект. – 2000. – № 3. – С. 97-99.
8. Сидорченко В.Ф. Кораблекрушения на море. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. – 296 с.
9. Аль Зобби И.Я.М. VHDL-модели цифровых устройств для обработки нечеткой цифровой информации в системах автоматического управления // Матеріали 7-го Міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка та молодь ХХІ століття". – Харків, 22-24 квітня, 2003. – С. 121.
10. Юдович А.Б. Предотвращение навигационных аварий морских судов. – 2-е изд., доп. – М.: Транспорт, 1988. – 244 с.
11. Integrated technical co-operation programme for 2000-2001 approved. Proc. of Technical co-operation Committee – 46<sup>th</sup> Session: November 1998 // IMO News, The Magazine of the International Marine Organization, 1998. – № 10, No. 4. – P. 23-24.
12. Kondratenko Y.P., Kondratenko G.V., Pidoprigora D.M., Sydorenko S.A., Timchenko V.L. Fuzzy approach for design of ship's decision-making systems // Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. "Management and Control of Production and Logistic" MCPL'2000, Grenoble, France, 5-8 July, 2000, CD-ROM-paper 313.
13. Kondratenko Y.P., Romanovsky G.F., Sydorenko S.A., Pidopryhora D.M. Man-machine system for control of ship behaviour in emergency conditions // Proc. of International Conference "Human Factors in Ship Design & Operation", Royal Institute of Naval Architects (RINA), London, UK, 27-29 September, 2000. – 14 p.
14. Kondratenko Y.P., Klymenko L.P. Fuzzy-logic technique for synthesis of decision making and control // GAMM'2001 Annual Scientific Conference, Book of Abstracts. – February 12-15, 2001. – Zurich, Switzerland. – P. 71.
15. Kondratenko Y.P., Sydorenko S.A. Fuzzy inference devices of expert system for estimation of critical maneuvering distance and navigator's modelling // Proc. of Int. Conf. on Modelling and Simulation MS'2001, 23-26 May, 2001. – Lviv, Ukraine. – P. 110-111.
16. Köse E., Gosine R.G., Dunwoody A.B., Calisal S.M. Expert system for monitoring dynamic stability of small craft // IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 20, No. 1, January, 1995. – P. 13-22.
17. Nishimura T., Inaba H., Nanjo H. Total ship's automation system // proc. of International marine electrotech-

- nology conference IMECE'91. – Shanghai, China. – 21-24 May, 1991. – P. 82-89.
18. Sawaragi T., Katai O., Iwai S. Interfacing between Fuzzy Linguistic Controller and Expert's Behavioral Skills via Qualitative Mental Models // Proc. of 5th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symp. on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems. – Hague, Netherlands, 1992. – P. 2.1.3.1-2.1.3.6.
19. Schultze R. Multiple-observer scheme for safe navigation // Int. Jo. Control Engineering Practice, 1999. – № 7. – P. 1279-1289.
20. Zadeh L. Fuzzy sets // Information and control, 1965. – No. 8. – P. 338-353.
21. Zimmerman H.J. Fuzzy set theory. – 2nd edition. – Kluwer, Boston, 1991. – 315 p.
-