

## АНАЛІЗ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО УПРАВЛІННЯ ЗАСПОКОЮВАЧЕМ ХИТАВИЦІ РЕАКТИВНОЇ ДІЇ

*Судно, під час його експлуатації в умовах морського хвилювання, потребує використання додаткових пристроїв та систем для стабілізації свого просторового положення та зменшення негативного впливу різних видів хитавиці на екіпаж та обладнання. Заспокоювачі хитавиці мають чимало варіантів конструкцій, оснований на використанні різних фізичних принципів. Для суден різного цільового призначення використовують як пасивного типу заспокоювачі, які не потребують підведення енергії для свого функціонування, так і активного типу, які, використовують частину потужності судових джерел енергії. Показано, що активні заспокоювачі складають значну частку від всіх їх видів і значно ефективніше зменшують хитавицю, хоча й спричиняють суттєві енергетичні затрати. Відповідно, активні заспокоювачі потребують ефективного управління їх роботою, що має забезпечувати гарні значення параметрів стабілізації просторового положення корпусу судна при допустимих енергетичних затратах.*

*У даній роботі розглядається система управління різновидом водострумного заспокоювача хитавиці, який стабілізує корпус судна за рахунок створення механічних моментів від реактивної дії струменів водно-повітряної суміші, що викидаються із заспокоювача у потрібному напрямку.*

*Доведено, що процес управління роботою заспокоювача комплексної конструкції (яким, зокрема, є водострумний заспокоювач реактивної дії) є достатньо складним: включає чимало різних за своєю природою вхідних та вихідних змінних, а також зв'язки і залежності між ними, які важко підлягають формалізації та складно ідентифікуються при побудові детермінованої системи управління стабілізації, яка також не може враховувати невизначеності вказаних величин. Показано, що доцільно реалізувати систему управління заспокоювачем хитавиці реактивної дії на базі принципів штучного інтелекту, одним з різновидів якого є використання теорії нечітких множин. У даній роботі проведена реалізація нечіткого контролера для управління заспокоювачем хитавиці водострумного типу, а також проведено дослідження ефективності його функціонування за допомогою системи Matlab/Simulink. Отримані результати показали, що запропонована нечітка система управління має задовільні показники роботи і може бути рекомендована до реалізації в рамках розробки заспокоювача хитавиці відповідної конструкції.*

*Ключові слова: заспокоювач хитавиці, водострумний заспокоювач, fuzzy logic, нечітка система, моделювання, ефективність.*

**Вступ та постановка задачі.** Заспокоювачі хитавиці є важливим елементом сукупності судових пристроїв, що забезпечують комфорт для пасажирів та екіпажу, а також – задовільні режими роботи обладнання судна та належне виконання ним його функціонального призначення. Усі конструкції заспокоювачів можна розділити на пасивні, що потребують затрат енергії на свою роботу, та активні, що їх вимагають. Очевидно, активні заспокоювачі потребують організації раціонального управління, яке дозволяло б мінімізувати (або обмежити) затрати енергії при достатніх (або, відповідно, найкращих) значеннях обраних показників якості їхньої роботи [1]. Таким чином, активні заспокоювачі хитавиці потребують використання автоматизованих систем управління їхньою роботою.

У попередніх публікаціях, наприклад, [2], запропоновано конструкцію і спосіб заспокоєння поздовжньої та поперечної хитавиці судна, оснований на використанні реактивних сил, що діють на корпус судна при викиданні із різних місць у потрібному напрямку водно-повітряної суміші (принцип дії водометних заспокоювачів хитавиці). Така

система має чимало керованих елементів, якими є заслінки та двигуни, які здійснюють нагнітання суміші при подачі у необхідному напрямку. Відповідно, функціональність системи управління подібним заспокоювачем хитавиці є досить складною, а побудова детермінованої математичної моделі автоматичної системи управління може бути утрудненою. У такому випадку доцільно застосувати підхід, заснований на теорії нечітких множин, та будувати нечітку систему управління технічним пристроєм – активним заспокоювачем хитавиці реактивної дії.

Таким чином, необхідно провести реалізацію математичної моделі нечіткої системи управління заспокоювачем хитавиці реактивної дії та на її основі провести аналіз якості її функціонування, впевнившись у відсутності явних недоліків, провести оцінку її основних показників ефективності.

**Аналіз останніх досліджень.** В цілому, різні принципи роботи сучасних заспокоювачів хитавиці, що описуються, наприклад, у [3], можуть спричинювати доцільність вибору того, чи іншого способу управління заспокоювачем певної конструкції, як описано в [4]. В той же час, у багатьох джерелах для заспокоювачів одного й того ж типу пропонуються різні способи управління.

Так, для заспокоювачів, що працюють на основі виведення із корпусу судна керованих кілів в літературі пропонується використання нейронних мереж (наприклад, у [5]), що, очевидно, пов'язано із бурхливим розвитком та зростанням популярності даного математичного апарату, апробованими застосуваннями. Також, для управління керованими кілями при заспокоєнні поперечної хитавиці пропонуються [6] і більш традиційні підходи, які реалізовані на основі побудови детермінованих математичних моделей. Також оптимізацію роботи заспокоювача хитавиці на основі підводних кілів описано у [7], однак основна частина цієї роботи присвячена саме оптимізації геометрії кілів, що, очевидно, повністю прив'язує її до даного конкретного типу заспокоювача.

Іншою популярною конструкцією заспокоювачів є гіроскопічні, засновані на фізичній здатності масивного тіла, що обертається, зберігати власний момент імпульсу (і, відповідно, загашати коливання корпусу судна, з який гіроскоп є пов'язаним). Так, в роботі [8] описуються нелінійні ефекти, що мають бути враховані при керуванні заспокоювачем подібної конструкції. Однак, застосувати ці відомості до заспокоювача хитавиці реактивної дії не уявляється можливим через особливості його конструкції.

Загальні принципи управління роботою заспокоювача бортової хитавиці приводяться у [9], однак, основою математичної моделі пропонується брати детерміноване диференціальне рівняння (Рікатті 2 порядку), яке не дозволяє врахувати невизначеності, притаманні змінним, які описують процес заспокоєння бортової хитавиці. Аналогічний недолік має і праця [10], де оптимальне керування роботою активного заспокоювача хитавиці (заснованого на керованих кілях) здійснюється на базі лінійно-квадратичного регулятора. Відповідно, більш доцільним є використання методів галузі штучного інтелекту.

Так, наприклад, у [11], пропонується адаптувати до задачі керування заспокоювачем хитавиці такий популярний на сьогоднішній у наукових дослідженнях інструмент, як нейронна мережа. Однак, як відомо, для експлуатації довільної нейронної мережі її спочатку треба навчити, для чого необхідно мати великий обсяг числових даних (дата-сет), що описує процеси керування цільовим технічним пристроєм (заспокоювачем хитавиці) та відповідні реакції корпусу судна. Очевидно, що при розробці системи управління для заспокоювача хитавиці оригінальної конструкції такий дата-сет є відсутнім. Альтернативним підходом з галузі ШІ, що може бути застосований для синтезу системи управління таким заспокоювачем хитавиці, є використання теорії нечітких множин або fuzzy logic, наприклад, [12-14]). Як відомо, такий підхід вимагає розробки бази правил нечітких продукцій, що є вираженням досвіду та логіки управління пристроєм, що отримані від досвідченого фахівця у відповідній галузі (експерта чи їх групи). Таким чином, для синтезу системи управління заспокоювачем хитавиці реактивної дії підхід на базі методів нечіткої логіки видається найбільш

перспективним і тому застосований у даній роботі.

**Виклад основного матеріалу.** Як відомо, принцип роботи нечіткого контролеру полягає у циклічному повторенні наступної послідовності операцій:

- фазифікація вхідних змінних;
- агрегування підумов для тих правил нечітких продукцій, які мають складні антецеденти;
- активізація підвисновків (тобто застосування усіх активних правил нечітких продукцій);
- акумулювання висновків (для тих змінних, які входять у консеквенти більш ніж одного правила нечітких продукцій);
- дефазифікація вихідних змінних.

Очевидно, що найважливішу роль у роботі нечіткого контролеру має база правил нечітких продукцій, основа якої для випадку, що розглядається у даній роботі була запропонована авторами у [13, 14]. Всього розглядалося 8 нечітких змінних по 3-5 термів у кожній, де всього реалізовано 12 правил, показаних на рис. 1 у вигляді переліку. Значення усіх змінних нормалізовані до одиниці шляхом ділення на максимальне допустиме значення кожної величини. У якості вхідних змінних запропоновано використання швидкості кільової хитавиці ( $\beta_7$ ) та бортової хитавиці ( $\beta_8$ ). У [13] обґрунтовано, що зважаючи на характер коливань корпусу судна під час обох типів хитавиці у першому наближенні доцільно обмежитися саме кутовими швидкостями коливань корпусу, а не величинами диференту та крену відповідно (чи кутовими прискореннями, які можна взяти до уваги при побудові більш детальної моделі у подальшій перспективі).

У якості вихідних вибрано наступні змінні:

- $\beta_1$  – величина отвору лівої повітряної заслінки;
- $\beta_2$  – величина отвору правої повітряної заслінки;
- $\beta_3$  – величина отвору лівої водної заслінки;
- $\beta_4$  – величина отвору правої водної заслінки;
- $\beta_5$  – потужність нагнітаючого пристрою лівого борту;
- $\beta_6$  – потужність нагнітаючого пристрою правого борту.

Зважаючи на те, що в даному випадку обрано дві вхідних змінних, зручно проаналізувати отримані поверхні нечіткого виводу для вказаних вихідних змінних. Для величин  $\beta_1$  і  $\beta_2$  вони показані на рис. 2, для  $\beta_3$  і  $\beta_4$  – на рис. 3, для  $\beta_5$  і  $\beta_6$  – на рис. 4.

Для дослідження всієї системи управління реалізовано модель об'єкту управління, рис. 5, яка також включає зовнішні впливи у вигляді моментів, що діють на судно з боку хвильової поверхні і розроблену в Simulink на основі матеріалів [14].

Модель всієї системи управління, за допомогою якої проводився аналіз ефективності запропонованих рішень, наведена на рис. 6. У якості Fuzzy Logic Controller використано нечіткий контролер, параметри якого наведені на рисунках 1, ..., 4; у якості об'єкта управління використано модель, наведену на рис. 5. Результати моделювання оцінювалися за допомогою виводу на віртуальні осцилографи, показані на рис. 6, а також на рис. 5.

Аналіз отриманих шляхом моделювання результатів показав наступне:

- заспокоювач ефективно протидіє бортовій хитавиці, зменшуючи її амплітуди до несуттєвих значень (коефіцієнт заспокоєння більше 0,9, тобто досягається зменшення амплітуди на 90 %);
- ефективність протидії кільовій хитавиці є значно меншою, що очевидно спричинюється значно більшою енергією поздовжніх коливань у діаметральній площині судна, і складає не більше 0,6;
- у судна з'являється постійний диферент на корму близько 10-15 градусів, що

спричинено особливостями конструкції заспокоювача, який розглядається (водострумні модулі встановлюються, в основному, у передній частині судна); дана величина не впливає суттєво негативно на роботу обладнання та екіпаж, а з точки зору морехідних характеристик може бути навіть корисною, покращуючи поведінку судна на хвилях;

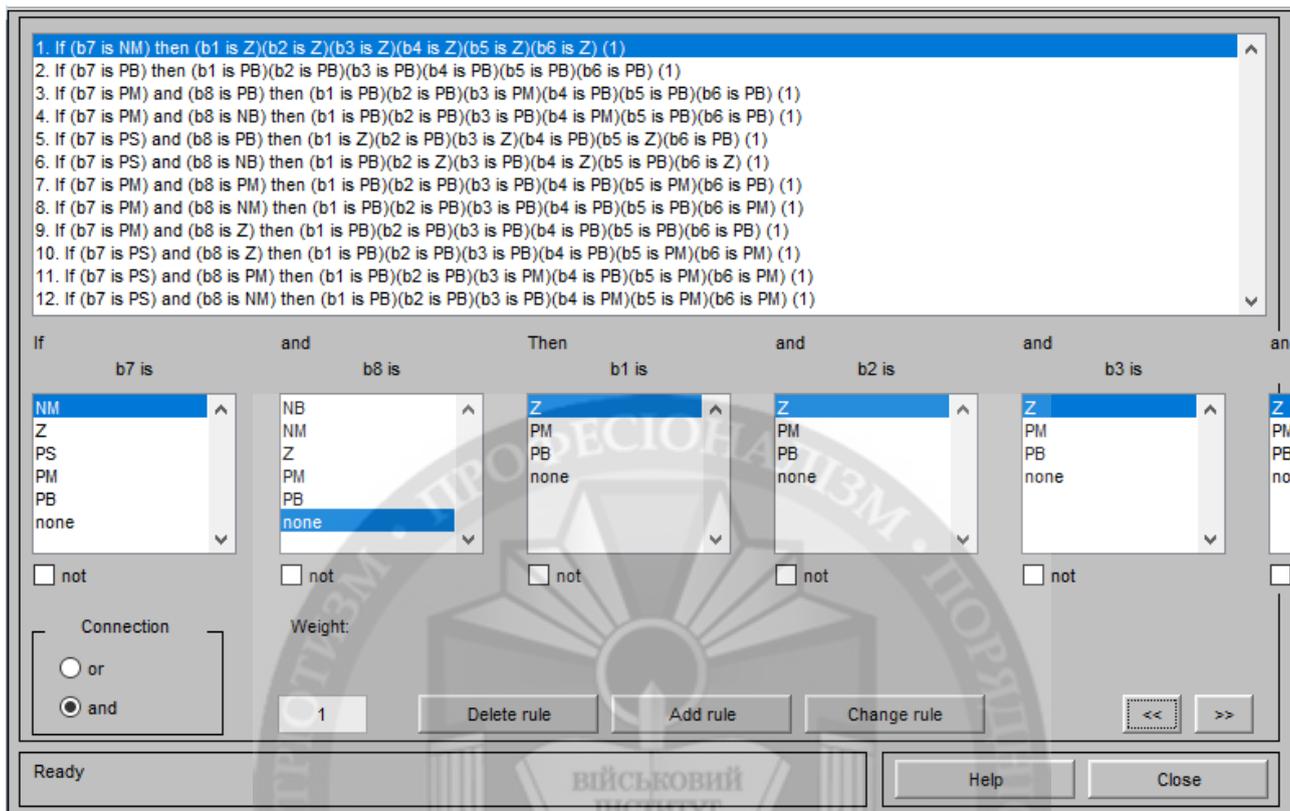


Рисунок 1 – Реалізація бази правил нечітких продукцій

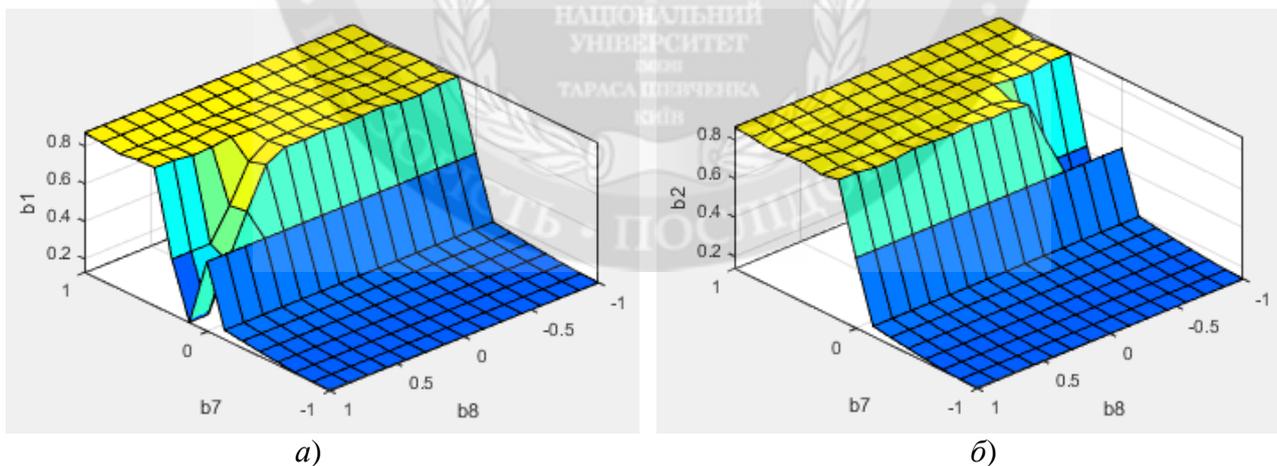
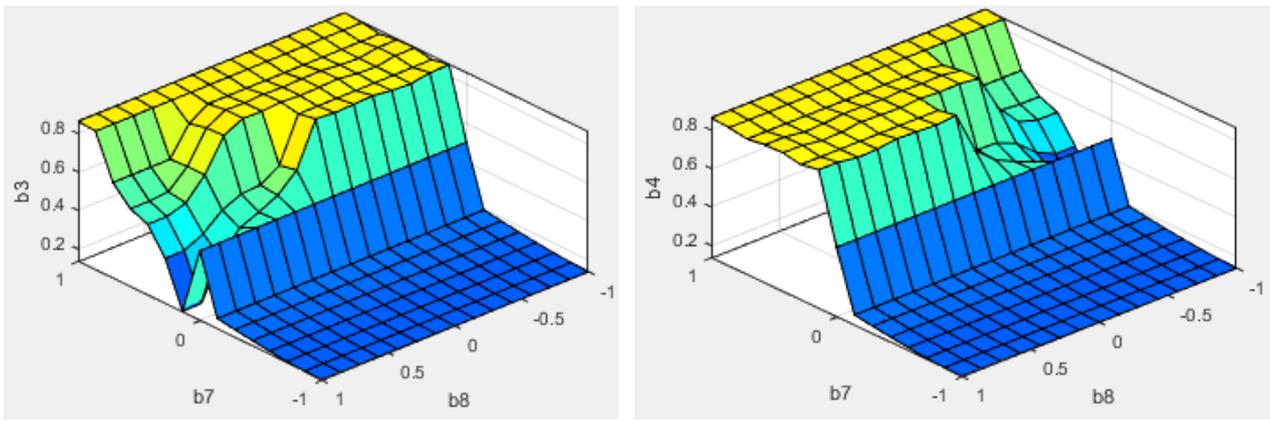


Рисунок 2 – Поверхні нечіткого виводу:  $a$  - для змінної  $\beta_1$ ,  $b$  - для змінної  $\beta_2$



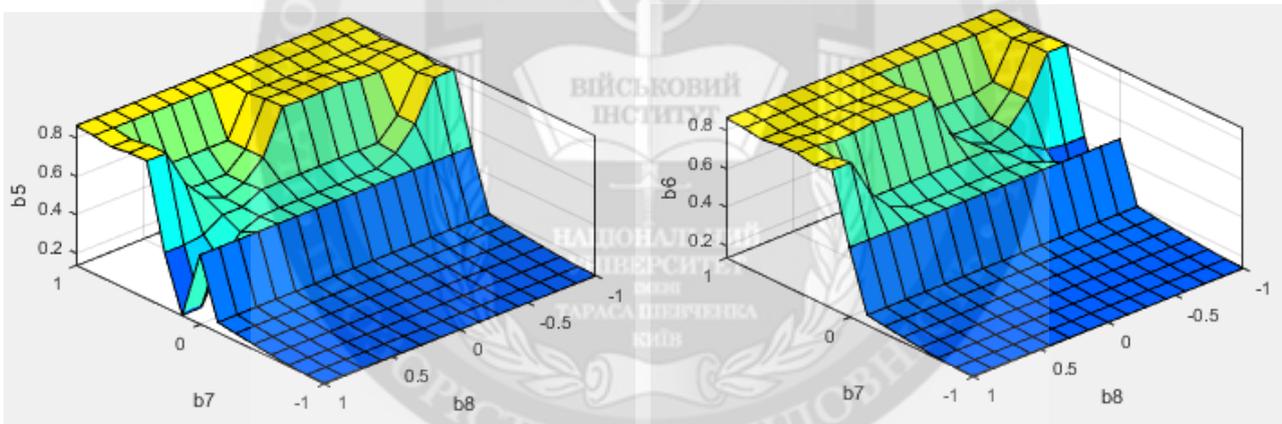
*a)*

*б)*

Рисунок 3 – Поверхні нечіткого виводу: *a* - для змінної  $\beta_3$ , *б* – для змінної  $\beta_4$

- показники якості системи управління знаходяться у допустимих межах, а саме час регулювання (виходу на постійну зменшену амплітуду коливань бортової хитавиці) складає не більше 10 с, а перегулювання (перевищення амплітуди бортової хитавиці над стаціонарним значенням під час перехідного процесу) складає не більше 20 %;

- енергоспоживання заспокоювача хитавиці, необхідне для його ефективної роботи, може бути досить високим, тому окремою задачею, яка планується у подальшій роботі, є оптимізація режимів роботи пристрою для підвищення його енергоефективності.



*a)*

*б)*

Рисунок 4 – Поверхні нечіткого виводу: *a* - для змінної  $\beta_5$ , *б* – для змінної  $\beta_6$

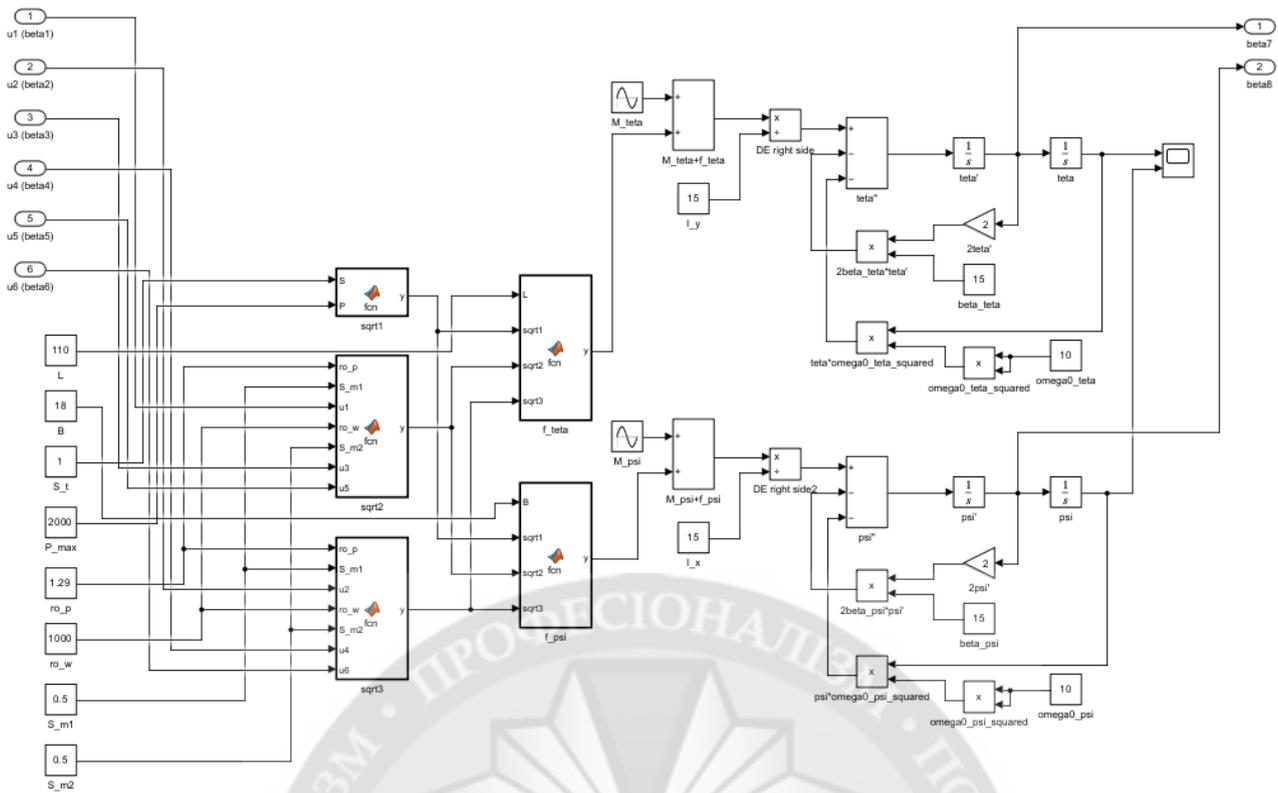


Рисунок 5 – Модель об'єкту управління (корпусу судна, на який діють реактивні сили, спричинені роботою заспокоювача хитавиці), включаючи зовнішні впливи на корпус судна від хвильової поверхні

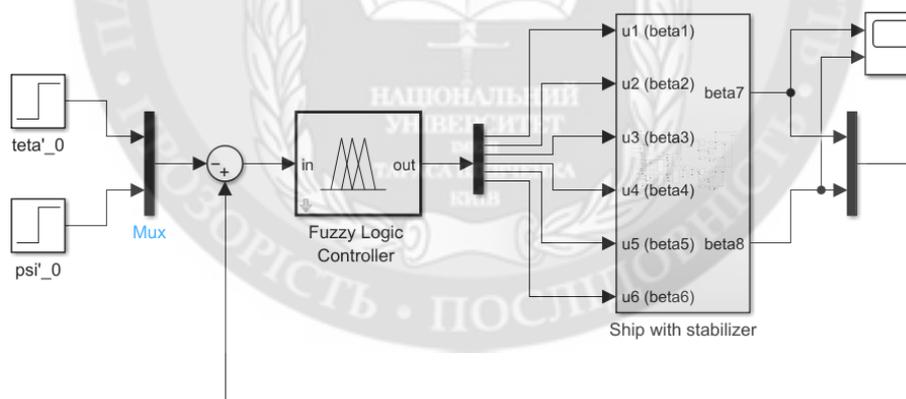


Рисунок 6 – Модель системи управління заспокоювачем хитавиці

**Висновки.** Таким чином, у даній роботі описано процедуру моделювання системи управління для водострумного заспокоювача хитавиці реактивної дії. Основою системи управління вибрано контролер, що працює за принципами нечіткої логіки. Проведене дослідження показало, що пристрій задовільно виконує свою задачу, зменшуючи як бортову, так і кільову хитавицю судна (дещо у меншій мірі, через особливості розміщення модулів заспокоювача – в передній частині судна). Показники якості системи управління, визначені на основі дослідження моделі, знаходяться у допустимих межах, тому сама система управління може бути рекомендована до практичної реалізації у прототипі запропонованого водострумного заспокоювача хитавиці реактивної дії.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Kula, K. S. An Overview of Roll Stabilizers and Systems for Their Control. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2015, Vol. 9, No. 3, pp. 405–414. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.09.03.14>.
2. Гайша О. О. Математичне моделювання ефективності управління реактивним заспокоювачем хитавиці судна. *Збірник наукових праць ВІ КНУ*. 2013. № 44. С. 27–33.
3. Sinha, T. Different Types Of Roll Stabilization Systems Used For Ships. *Marine Insight*. 2019. URL: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/roll-stabilization-systems/>.
4. Perez, T., Blanke, M. Control of Ship Roll Motion. В: Baillieul, J., Samad, T. (ред.) *Encyclopedia of Systems and Control*. Cham: Springer, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44184-5\\_123](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44184-5_123).
5. Li, R., Li, T., Bai, W., Du, X. An adaptive neural network approach for ship roll stabilization via fin control. *Neurocomputing*, 2016, Vol. 173, pp. 953–957. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2015.08.050>.
6. Liang, L., Zhao, P., Zhang, S., Yuan, J., Wen, Y. Simulation and analysis of fin stabilizer on ship rolls. 2018.
7. Aboemiera, H., Shehata, A. S., Elsherbiny, K., Mehanna, A. Performance enhancement of the roll stabilization systems used for ships. *AIP Conference Proceedings*, 2023, Vol. 3018, No. 1, p. 020034. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0172425>.
8. Sathit, P., Chatchapol, C., Phansak, I. Non-linearity Analysis of Ship Roll Gyro-stabilizer Control System. *Sustainable Marine Structures*, 2021, Vol. 3, No. 1, pp. 8–21. DOI: <https://doi.org/10.36956/sms.v3i1.316>.
9. Andrikov, D., Dereviankina, A. Control design of ship robust active rolling stabilizer. *Procedia Computer Science*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.027>.
10. Liang, L., Zhao, P., Zhang, S. Research and simulation of ship roll control in turning motion. *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference, CCC 2018*, pp. 3841–3846. DOI: <http://dx.doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483223>.
11. Sun, Z., Chen, C., Zhu, G. Adaptive Neural Network Control of Zero-Speed Vessel Fin Stabilizer Based on Command Filter. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, No. 754. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12020754>.
12. Cao, Y., Lee, T. Maneuvering of surface vessels using a fuzzy logic controller. *Journal of Ship Research*, 2003, Vol. 47, pp. 101–130. DOI: <http://dx.doi.org/10.5957/jsr.2003.47.2.101>.
13. Гайша О. О., Гайша О. О. Створення бази правил нечітких продукцій для системи управління реактивного заспокоювача хитавиці. *Збірник наукових праць «Актуальні наукові дослідження в сучасному світі»*, 2017, № 9(29), Ч.1. Переяслав-Хмельницький, 2017, С. 19–23.
14. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Shumylo O., Volyansky S., Bondar A., Cheredarchuk N. (2023) "Application of fuzzy controllers in automatic ship motion control systems", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, № 13(4), pp. 3948 - 3957. Available at: <http://dx.doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp3948-3957> (Accessed: 6 August 2024).

## REFERENCES:

1. Kula, K.S. (2015) "An overview of roll stabilizers and systems for their control", *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 9, No. 3, pp. 405-414. Available at: <https://doi.org/10.12716/1001.09.03.14> (Accessed: 6 August 2024).
2. Haisha, O.O. (2013) "Matematychnе modeliuвання efektyvnosti upravlinnia reaktivnym zaspokoiuvachem khytavytsi sudna", *Zbirnyk naukovykh prats VI KNU*, № 44, S. 27-33.
3. Sinha, T. (2019) "Different types of roll stabilization systems used for ships", *Marine Insight*. Available at: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/roll-stabilization-systems/> (Accessed: 6 August 2024).
4. Perez, T. and Blanke, M. (2021) "Control of ship roll motion", in Baillieul, J. and Samad, T. (eds.) *Encyclopedia of Systems and Control*. Cham: Springer. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44184-5\\_123](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44184-5_123) (Accessed: 6 August 2024).
5. Li, R., Li, T., Bai, W. and Du, X. (2016) "An adaptive neural network approach for ship roll stabilization via fin control", *Neurocomputing*, Vol. 173, pp. 953-957. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2015.08.050> (Accessed: 6 August 2024).

6. Liang, L., Zhao, P., Zhang, S., Yuan, J. and Wen, Y. (2018) "Simulation and analysis of fin stabilizer on ship rolls".
7. Aboemiera, H., Shehata, A.S., Elsherbiny, K. and Mehanna, A. (2023) "Performance enhancement of the roll stabilization systems used for ships", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 3018, No. 1, p. 020034. Available at: <https://doi.org/10.1063/5.0172425> (Accessed: 6 August 2024).
8. Sathit, P., Chatchapol, C. and Phansak, I. (2021) "Non-linearity analysis of ship roll gyro-stabilizer control system", *Sustainable Marine Structures*, Vol. 3, No. 1, pp. 8-21. Available at: <https://doi.org/10.36956/sms.v3i1.316> (Accessed: 6 August 2024).
9. Andrikov, D. and Dereviankina, A. (2016) "Control design of ship robust active rolling stabilizer", *Procedia Computer Science*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.027> (Accessed: 6 August 2024).
10. Liang, L., Zhao, P. and Zhang, S. (2018) "Research and simulation of ship roll control in turning motion", in *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference, CCC 2018*, pp. 3841-3846. Available at: <http://dx.doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483223> (Accessed: 6 August 2024).
11. Sun, Z., Chen, C. and Zhu, G. (2022) "Adaptive neural network control of zero-speed vessel fin stabilizer based on command filter", *Applied Sciences*, Vol. 12, p. 754. Available at: <https://doi.org/10.3390/app12020754> (Accessed: 6 August 2024).
12. Cao, Y. and Lee, T. (2003) "Maneuvering of surface vessels using a fuzzy logic controller", *Journal of Ship Research*, Vol. 47, pp. 101-130. Available at: <http://dx.doi.org/10.5957/jsr.2003.47.2.101> (Accessed: 6 August 2024).
13. Haisha, O.O. and Haisha, O.O. (2017) "Stvorennia bazy pravyl nechitkykh produktsii dlia systemy upravlinnia reaktivnoho zaspokoiuvacha khytavytsi", Zbirnyk naukovykh prats «Aktualni naukovi doslidzhennia v suchasnomu sviti», № 9(29), Ch.1, S. 19-23.
14. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Shumylo O., Volyanskyy S., Bondar A., Cheredarchuk N. (2023) "Application of fuzzy controllers in automatic ship motion control systems", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, № 13(4), pp. 3948 - 3957. Available at: <http://dx.doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp3948-3957> (Accessed: 6 August 2024).

**Haisha O.O., Doc. of Tech. S. Onishchenko O.A., PhD Haisha O.O.**  
**FUNCTIONING QUALITY ANALYSIS OF THE FUZZY CONTROL SYSTEM OF A REACTIVE SHIP STABILIZER**

*A ship during its operation in conditions of sea storm requires the use of additional devices and systems to stabilize its position and reduce the negative impact of various types of rocking on the crew and equipment. The corresponding devices, ship stabilizers, have many design options based on the use of different physical principles. Thus, this work considers a type of water-jet ship stabilizer, which stabilizes the ship's hull by creating mechanical moments from the reactive action of jets of a water-air mixture, which are ejected from the stabilizer in the appropriate direction.*

*All ship stabilizers can be divided into passive ones, which do not require the supply of energy for their operation, and active ones, which usually use part of the power of the ship's power plant. It should be noted that active stabilizers make up a significant share of all their types and significantly reduce ship oscillations, although they cause significant energy costs. Accordingly, active ship stabilizers require effective control of their work, which should ensure good values of the stabilization parameters of the ship's hull at acceptable energy costs.*

*It should be noted that the process of control the operation of a complex design stabilizer (which, in particular, is the mentioned reactive water-jet ship stabilizer) is quite complex: it includes many input and output variables of different nature, as well as dependencies between them, which are difficult to formalize during construction deterministic control system, which also cannot take into account the uncertainty of the specified values. Taking this into account, it is advisable to implement a control system for a water-jet ship stabilizer based on the principles of artificial intelligence, one of which is the theory of fuzzy sets. In this work, the implementation of a fuzzy controller for controlling a water-jet-type ship stabilizer was carried out, and its effectiveness was also studied using the Matlab Simulink model. The obtained results showed that the proposed fuzzy control system has satisfactory performance and can be recommended for implementation within the framework of the development of a ship stabilizer of the corresponding design.*

**Keywords:** ship stabilizer, water jet stabilizer, fuzzy logic, fuzzy control, efficiency modeling.