УДК 621.31, 681.52 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.16

О. М. ЛЕБЕДЬ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри природничо-наукової підготовки
Херсонська державна морська академія
ORCID: 0000-0001-5603-9244

ОЦІНКА ЯКОСТІ РОБОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ СУДНОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

На сьогоднішній день, до функціювання пристроїв генерації електричної енергії суднового електротехнічного комплексу, пред'являються дуже високі вимоги, перш за все пов'язані з їх економічною ефективністю. Особливу роль при цьому відіграють методи і способи проведення аналізу їх роботи для діагностування їх функціонального стану. З метою удосконалення методів діагностики функціювання пристроїв суднового електротехнічного комплексу створюються різноманітні математичні моделі. Головні вимоги до моделей – допомога оператору проаналізувати параметри роботи обладнання та його вчасне технічне обслуговування. Для технічного обслуговування створюються системи віддаленої діагностики і моніторингу технічного стану обладнання.

В даній роботі, приведена оцінка якості роботи напівпровідникового перетворювача частоти суднового електротехнічного комплексу. Проаналізовано методи діагностики його роботи та виокремлені основні проблеми зменшення економічності виробничого процесу. Вказано, що велика кількість обладнання та обслуговуючого персоналу, призводить до збільшення часу діагностики функціювання пристроїв.

На основі математичного моделювання, з використанням апарату нечіткої логіки Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox, отримані поверхні відклику оцінки якості роботи перетворювача частоти, що дають змогу оператору своєчасно діагностувати стан роботи перетворювача частоти в залежності від вихідних значень сили струму, напруги та температури напівпровідникових ключів. Продемонстровано функції належності лінгвістичних змінних вихідних параметрів напівпровідникового перетворювача частоти електротехнічного комплексу.

Зазначено, що збільшення бази правил лінгвістичних змінних, засновані на експертних оцінках, дадуть більш суттєву інформацію оператору для діагностики функціювання перетворювача частоти. Аналіз сформованих поверхонь відклику забезпечить диференційований підхід до його технічного обслуговування.

Ключові слова: *електротехнічний комплекс, напівпровідниковий перетворювач частоти, нечітка логіка, Matlab Simulink, Fuzzy Logic Toolbox.*

O. M. LEBED
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Natural Sciences
Kherson State Maritime Academy
ORCID: 0000-0001-5603-9244

EVALUATION OF THE QUALITY OF THE WORK OF A SEMICONDUCTOR FREQUENCY CONVERTER OF A SHIP ELECTRICAL COMPLEX BASED ON FUZZY LOGIC

Today, very high requirements are imposed on the operation of electrical energy generation devices of the ship's electrical complex, primarily related to their economic efficiency. A special role is played by methods and means of analyzing their operation to diagnose their functional state. In order to improve the methods of diagnosing the operation of devices of the ship's electrical complex, various mathematical models are created. The main requirements for the models are to help the operator analyze the parameters of the equipment's operation and its timely maintenance. Systems of remote diagnostics and monitoring of the technical condition of the equipment are created for maintenance.

This paper provides an assessment of the quality of operation of a semiconductor frequency converter of the ship's electrical complex. Methods for diagnosing its operation are analyzed and the main problems of reducing the cost-effectiveness of the production process are identified. It is indicated that a large number of equipment and service personnel leads to an increase in the time for diagnosing the operation of devices.

Based on mathematical modeling, using the fuzzy logic apparatus Matlab Simulink with the Fuzzy Logic Toolbox extension, response surfaces for assessing the quality of the frequency converter's operation were obtained, which allow the operator to timely diagnose the state of the frequency converter's operation depending on the output values of current, voltage and temperature of semiconductor switches. The membership functions of linguistic variables of the output parameters of the semiconductor frequency converter of the electrical complex are demonstrated.

It is noted that the increase in the rule base of linguistic variables, based on expert assessments, will provide more significant information to the operator for diagnosing the operation of the frequency converter. Analysis of the formed response surfaces will provide a differentiated approach to its maintenance.

Key words: *electrical complex, semiconductor frequency converter, fuzzy logic, Matlab Simulink, Fuzzy Logic Toolbox.*

Постановка проблеми

Основним показником роботи і економічності будь-якого електротехнічного комплексу являється якість електричної енергії, яку споживають користувачі. Особливу роль при цьому відіграють перетворювачі частоти (ПЧ), які здатні сформувати необхідну частоту вихідного сигналу для певних типів споживачів. Перетворювачі частоти дають можливість підтримувати параметри електричної енергії при змінних характеристиках явищ, що приводять до генерації електричної енергії.

При досягненні певного часу роботи ПЧ, його експлуатаційні характеристики погіршуються. Виявлення відхилення номінальних значень параметрів роботи елементів ПЧ потребує значної кількості обладнання та обслуговуючого персоналу. Тому для технічного обслуговування створюються системи віддаленої діагностики і моніторингу технічного стану обладнання.

Діагностика і своєчасне технічне обслуговування електротехнічного комплексу та його складових здатні збільшити їх загальний час експлуатації та енергоефективність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із основних складових технічного обслуговування ПЧ електротехнічного комплексу являється моніторинг параметрів його роботи. Дослідження зміни його вихідних параметрів дає можливість зрозуміти його стан і завчасно провести технічне обслуговування, не доводячи до серйозних поломок та суттєво зменшити час простою [1, 2]. Час простою часто наносить більше матеріальних збитків порівняно з заміною комплектуючих блоків та деталей. Періодичність проведення моніторингу залежить від часу експлуатації та потужності споживачів електричної енергії змінного струму.

Некоректна робота ПЧ також впливає на термін та умови роботи споживачів, особливо електронних суднових двигунів [3, 4]. Як зазначено в [5], кожний рік виходить зі складу 30 % електричних двигунів промисловості, а на транспорті ці цифри добігають значення 70 %. При цьому термін роботи відремонтованих двигунів зменшується від 0,5 до 1,5 року, а 22 % взагалі замінюються резервними, так як їх подальша експлуатація недоцільна.

При цьому слід зауважити, що традиційна стратегія технічного обслуговування і ремонту складних технічних систем, заснована на планово-попереджувальному ремонті, втратила свою актуальність на теперішній час. На перший план виходить стратегія управління експлуатаційною надійністю пристроїв за їх технічним станом, тобто до моніторингу параметрів їх роботи на протязі певного часу з метою прогнозування їх зміни [6].

Одним із найпоширеніших методів управління, автоматизації та моніторингу електротехнічних систем являється застосування апарату нечіткої логіки. Алгоритм роботи систем на базі нечіткої логіки відмінний від методів дискретної математики і схожий на спосіб людського мислення. При цьому змінні параметри набувають значень в діапазоні від 0 до 1 і носять імовірнісний характер. База правил нечіткої логіки основується на людському досвіді [7].

Застосування апарату нечіткої логіки широко застосовується при розробленні методів управління, моніторингу та діагностики на морському транспорті. Регулювання енергоефективності роботи суднових котельних установок [8], підвищення елементів безпеки плавання судна за недостатньої навігаційної інформації [9], моніторингу і управління роботою генератора змінного струму [10] та інших.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи являється створення математичної моделі оцінки якості роботи ПЧ на базі нечіткої логіки в середовищі Matlab Simulink для діагностики стану і необхідності проведення технічного обслуговування.

Викладення основного матеріалу дослідження

В судновому електротехнічному комплексі застосовують ПЧ із ланкою постійного струму. Основні вузли ПЧ із ланкою постійного струму – це випрямляч та інвертор, який безпосередньо перетворює постійний струм в змінний потрібної частоти. В якості основного елементу інвертора, що формує вихідну напругу являються напівпровідникові тиристори або транзистори, що працюють в якості силового ключа. Для отримання якісного вихідного сигналу використовуються багаторівневі ПЧ [11]. В результаті на якість роботи ПЧ суттєво впливає коректна робота силових напівпровідникових ключів.

Для визначення технічного стану обладнання пристроїв електротехнічного комплексу, застосування апарату нечіткої логіки дає можливість діагностувати їх стан в умовах невизначеності. Нечіткі системи повинні мати певний масив даних, які містять функції належності та її опис, множину нечітких правил, спосіб виводу.

В якості моделі експертної системи технічного стану ПЧ вхідними змінними являються вихідний струм, вихідна напруга, температура напівпровідникових ключів. Вихідна змінна – стан роботи ПЧ, формується по алгоритму нечіткого виводу Мамдані-Заде. При цьому параметри вхідних характеристик визначені в відносних одиницях, номінальні параметри яких рівні 1.

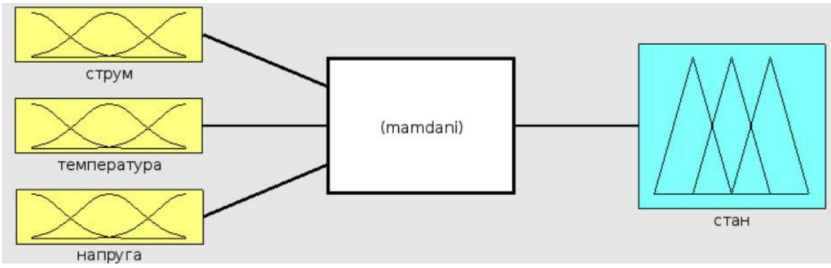

Рис. 1. Структурна схема системи Мамдані-Заде

На рисунку 1 приведена схема розробленої системи в середовищі Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox.

На рисунках 2–4 показані терми вхідних лінгвістичних змінних. На рисунку 1 показано лінгвістичну змінну «вихідний струм ПЧ» з термами: «нормальний», «високий». Лінгвістична змінна «вихідна напруга ПЧ» має терми: «низька», «нормальна», «висока» (рис. 3). Лінгвістична змінна «температура силових ключів ПЧ» (рис. 4) має терми: «низька», «нормальна», «висока».

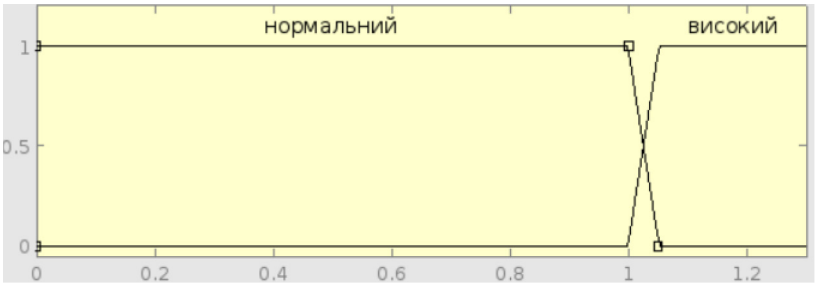

Рис. 2. Функція належності: струм

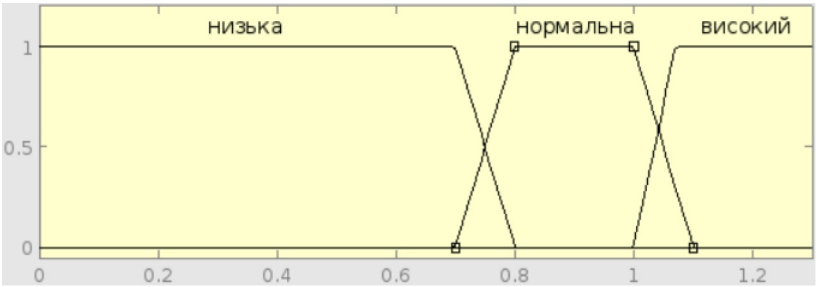

Рис. 3. Функція належності: напруга

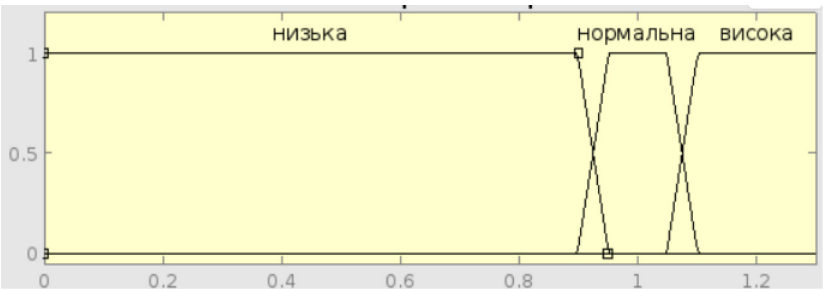

Рис. 4. Функція належності: температура

Функція належності «стан роботи ПЧ» наведена на рисунку 5, термами якої є «аварійний рівень», «попереджувальний рівень», «нормальний рівень».

Експертним шляхом був сформований набір правил стану роботи ПЧ від вхідних даних, якими є вихідний струм, вихідна напруга, температура силових ключів. База правил показана в таблиці 1.

Для розуміння взаємозв'язку вхідних лінгвістичних змінних і вихідної – отримані поверхні нечіткого виводу системи (рис. 6–8).

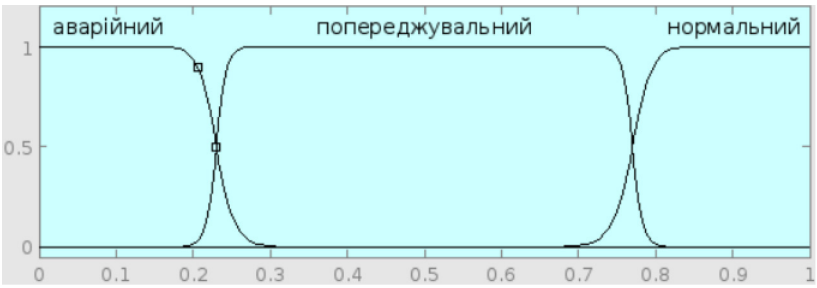

Рис. 5. Функція належності: стан роботи ПЧ

Таблиця 1

База правил лінгвістичних змінних

If (струм is нормальний) and (температура is нормальна) and (напруга is нормальна) then (стан is нормальний)
If (струм is нормальний) and (температура is висока) and (напруга is нормальна) then (стан is попереджувальний)
If (температура is висока) and (напруга is нормальна) then (стан is попереджувальний)
If (струм is високий) and (напруга is нормальна) then (стан is аварійний)
If (струм is високий) and (температура is нормальна) and (напруга is нормальна) then (стан is аварійний)
If (струм is високий) and (температура is висока) and (напруга is нормальна) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (напруга is низька) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (температура is нормальна) and (напруга is низька) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (температура is висока) and (напруга is низька) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (температура is висока) and (напруга is висока) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (температура is нормальна) and (напруга is висока) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (напруга is висока) then (стан is аварійний)
If (струм is високий) and (температура is низька) and (напруга is висока) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (температура is низька) and (напруга is висока) then (стан is аварійний)

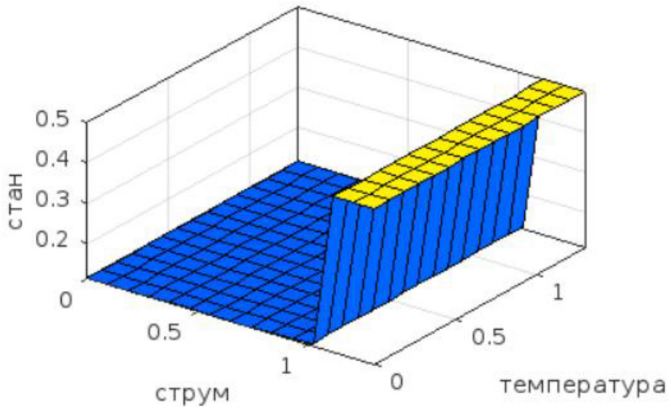

Рис. 6. Поверхня відклику стану роботи перетворювача частоти від температури ключа та вихідного струму

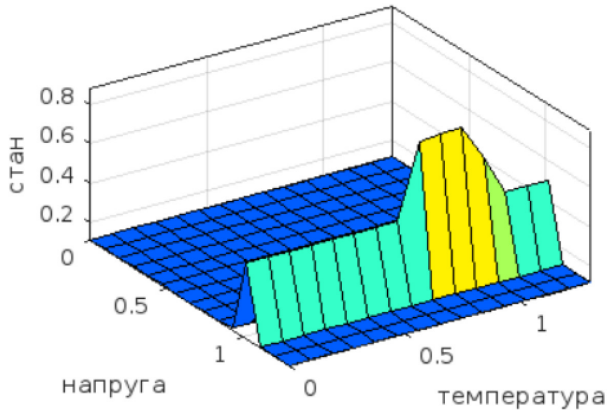

Рис. 7. Поверхня відклику стану роботи перетворювача частоти від температури ключа та вихідної напруги

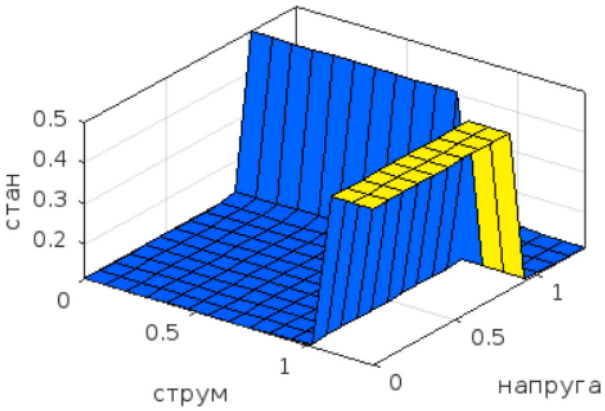

Рис. 8. Поверхня відклику стану роботи перетворювача частоти від вихідної напруги та вихідного струму

Висновки

На базі нечіткої логіки отримані поверхні відклику робочого стану перетворювача частоти суднового електротехнічного комплексу. Дані поверхні дають можливість оператору діагностувати та надати рекомендації щодо його технічного обслуговування

Таким чином можна стверджувати, що використання апарату нечіткої логіки дає можливість підвищити якість та зменшити терміни технічного обслуговування перетворювача частоти суднового електротехнічного комплексу при моніторингу його технічного стану.

Список використаної літератури

1. Гобрей Р. М., Рубаненко Е. І. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. Частина 1. Київ : «ДП НТУКЦ», 2008. 528 с.

2. Гобрей Р. М, Шинкаренко Г. В., Коліушко Г. М., Болдирєв Д. Г. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. Частина 2. Київ : «ДП НТУКЦ», 2011. 1008 с.

3. Тараненко С. В., Голубєва С. М. Аналіз показників надійності суднових електродвигунів, що використовуються у сучасному судновому обладнанні. *Водний транспорт*, 2021. № 2(33). С. 5–12. https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01.

4. Губаревич О. В., Голубєва С. М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, 2019. № 1(21). С. 55–63. https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63

5. Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К., Чорна О. А. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів: навчальний посібник. Кременчуг : ЧП Щербатих А. В., 2019. 122 с.

6. Бешта О. С. Худолій С. С. Визначення впливу дискретизації на процес ідентифікації динамічних параметрів. *Сборник научных трудов НГУ*, 2002. № 15, Т. 1. С. 161–167.

7. Граф, М. С., Свінцицька, О. М., Артамонов, Є. Б. Нечітке моделювання для аналізу та прогнозування в складних інформаційних системах. *Технічна інженерія*, 2024. № 1(93), С. 139–146. https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-139-146

8. J. Jose, K. Nafeesa, K. Mohamed Ismail Yasar Arafath. Fuzzy logic based control of marine boiler system. *International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, 2015. pp. 1–5. DOI: 10.1109/PICC.2015.7455797

9. Зазірний А. А. Визначення та контролю місця положення судна з використанням нечіткої логіки. *Водний транспорт*, 2023. № 2(38). С. 157–164. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18

10. Niketa N., Shantharama Rai. Design and modeling of fuzzy logic based voltage controller for an alternator. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2013. Vol. 2, no. 2. P. 155–158. https://doi.org/10.35940/ijrte.2277-3878

11. Лебедь О. М. Багаторівневі інвертори напруги суднового електротехнічного комплексу. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету*. Одеса, 2022, с. 174–175. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15422.36166

References

1. Hobrei R. M., Rubanenko E.I. (2008). Tekhnichne diahnostuvannia, vyprobuvannia ta vymiriuvannia elektroobladnannia v umovakh montazhu, nalahodzhuvannia i v ekspluatatsii. Chastyna 1 [Technical diagnostics, testing and measurement of electrical equipment in installation, commissioning and operation conditions. Part 1]. Kyiv : "DP NTUKTs", 528 p. [in Ukrainian].

2. Hobrei R. M, Shynkarenko H. V., Koliushko H. M., Boldyriev D. H. (2011). Tekhnichne diahnostuvannia, vyprobuvannia ta vymiriuvannia elektroobladnannia v umovakh montazhu, nalahodzhuvannia i v ekspluatatsii. Chastyna 2 [Technical diagnostics, testing and measurement of electrical equipment in installation, commissioning and operation conditions. Part 2]. Kyiv : "DP NTUKTs", 1008 p. [in Ukrainian].

3. Taranenko S. V., Holubieva S. M. (2021). Analiz pokaznykiv nadiinosti sudnovykh elektrodvyhuniv, shcho vykorystovuiutsia u suchasnomu sudnovomu obladnanni [Analysis of reliability indicators of marine electric motors used in modern marine equipment]. *Vodnyi transport*, no. 2(33). pp. 5–12. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01

4. Hubarevych O. V., Holubieva S. M. (2019). Analiz metodiv diahnostyky tekhnichnoho stanu izoliatsii asynkhronnykh dvyhuniv [Analysis of methods for diagnosing the technical condition of insulation of asynchronous motors]. Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, no. 1(21). pp. 55–63. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63.

5. Chornyi O. P., Zachepa Yu. V., Tytiuk V. K., Chorna O. A. (2019). Monitorynh i diahnostyka elektromekhanichnykh obiektiv: navchalnyi posibnyk [Monitoring and diagnostics of electromechanical objects: a textbook]. Kremenchuh: ChP Shcherbatykh A. V., 122 p. [in Ukrainian].

6. Beshta O. S. Khudolii S. S. (2002). Vyznachennia vplyvu dyskretyzatsii na protses identyfikatsii dynamichnykh parametriv [Determining the impact of discretization on the process of identifying dynamic parameters]. *Sbornyk nauchnykh trudov NHU*, no. 15, V. 1. pp. 161–167. [in Ukrainian].

7. Hraf, M. S., Svintsytska, O. M., Artamonov, Ye. B. (2024). Nechitke modeliuvannia dlia analizu ta prohnozuvannia v skladnykh informatsiinykh systemakh [Fuzzy modeling for analysis and prediction in complex information systems]. *Tekhnichna inzheneriia*, no. 1(93), pp. 139–146. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-139-146

8. J. Jose, K. Nafeesa, K. Mohamed Ismail Yasar Arafath. (2015). Fuzzy logic based control of marine boiler system. *International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, pp. 1–5. DOI: 10.1109/PICC.2015.7455797

9. Zazirnyi A. A. (2023). Vyznachennia ta kontroliu mistsia polozhennia sudna z vykorystanniam nechitkoi lohiky [Determining and controlling the location of a vessel using fuzzy logic]. *Vodnyi transport*, no. 2(38), pp. 157–164. [in Ukrainian]. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18

10. Niketa N., Shantharama Rai. (2013). Design and modeling of fuzzy logic based voltage controller for an alternator. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Vol. 2, no. 2. pp. 155–158. https://doi.org/10.35940/ijrte.2277-3878

11. Lebed O. M. (2022). Bahatorivnevi invertory napruhy sudnovoho elektrotekhnichnoho kompleksu [Multilevel voltage inverters of the ship's electrical complex]. *Materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi morskoi konferentsii kafedry SEU i TE Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu*. Odesa, pp. 174–175. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15422.36166