

Штрибець В.В., Трофименко А.О., Ліганенко В.В., Тришин В.В.

ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ АВАРІЙ СУДНОВОЇ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Функціонування суднової котельної установки пов'язано з великою кількістю потенційних відмов, які, у свою чергу, викликають аварії і можуть призводити як до людських жертв, так і до пошкодження суднового устаткування. У роботі узагальнені дані про аварії суднових котельних установок (вибухи, пожежі, відключення електроенергії або інші серйозні порушення у роботі морських суден) з метою визначення найгірших сценаріїв під час їх роботи. Для кількісного аналізу ризиків виникнення аварій суднової котельної установки вдосконалений підхід з використанням нечіткої експертної системи на основі використання у відповідних продукційних правилах інтервальних нечітких множин другого типу. При цьому в якості функцій приналежності вдосконаленої нечіткої експертної системи використовуються площі невизначеності інтервальних нечітких множин другого типу.

Інтервальні нечіткі множини другого типу, з одного боку, забезпечують формалізацію більшої кількості додаткових ступенів невизначеності в порівнянні з класичними нечіткими множинами першого типу, з іншого боку, є такими, що реалізуються при розробці нечітких логічних систем і мають меншу обчислювальну складність, у порівнянні з нечіткими множинами другого типу.

Під час дослідження були протестовані три типи функцій приналежності для створення нечітких множин і виділення відмінностей між цими функціями (функція приналежності Гауса (GMF), трикутна функція приналежності (TMF) і функція приналежності трапецієподібної форми (ZMF)).

В якості базової методології аналізу аварій у роботі використання підхід метод аналізу ризиків, він розглядає проблеми, пов'язані з характеристиками системи і режимами відмови для кожного компонента системи, та забезпечує наявність відповідних заходів безпеки, що в свою чергу підходить для визначення, ідентифікації і перевірки механічних та електричних апаратних систем на предмет потенційних відмов (Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)).

Ключові слова: суднова котельна установка, аварійна ситуація, інтервальна нечітка множина другого типу, площа невизначеності.

Постановка проблеми. Суднові котельні установки представляють собою системи різної конструкції, що виробляють пар для різних застосувань на борту судна, основними з яких є системи вироблення електроенергії і технологічні системи обігріву суднових систем [1, 2].

Функціонування суднової котельної установки пов'язано з великою кількістю потенційних відмов, які, у свою чергу, викликають аварії і можуть призводити як до людського жертв, так і до пошкодження суднового устаткування і т. д. Таким чином, для забезпечення безпеки персоналу, який бере участь в експлуатації в цілому судна і, зокрема, суднових котельних установок, повинні бути сформовані підходи для визначення оцінок і правил безпеки.

Одним з таких підходів є підхід на основі методології Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). FMEA ефективно застосовується для оцінки відмов різних компонентів, впливу на сам компонент і систему в цілому [3]. Зокрема, в роботі [3] представлені результати оцінки експлуатаційного ризику потенційних режимів відмови суднових котельних установок, виявлених за допомогою методу FMEA, заснованого на підході нечітких множин першого типу. Цей підхід заснований на дослідженні, яке проводилося після вивчення значної кількості літератури, звітів про минулі аварії, різних порад з безпеки морського транспорту, пов'язаних з аваріями морських котлів, і мозкових штурмів з досвідченими експертами щодо потенційних відмов суднових котельних установок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останніх дослідженнях основна увага була зосереджена на ризиках експлуатації різних суднових механізмів [4-7], пожеж [8, 9] і вибухів [10, 11] на суднах. У роботі [3] досліджені й оцінені можливі відмови суднових котлів, а також їх вплив на роботу суднових механізмів і загальну безпеку на борту судна. Запропоновано нечітку експертну систему аналізу аварій котлів на основі використання нечітких множин першого типу та відповідної нечіткої логічної моделі Сугено.

Метою дослідження є удосконалення нечіткої експертної системи аналізу аварій суднової котельної установки на основі використання інтервальних нечітких множин другого типу.

Основні результати дослідження. У роботі [3] наведені дані про найбільш резонансні аварії суднових котельних установок у період з 1995 року по 2017 рік, які викликали або вибух, пожежу, відключення електроенергії або інші серйозні порушення у роботі морських суден (деякі приклади аварій суднових котельних установок наведено у табл. 1).

Таблиця 1 – Приклади аварій суднових котельних установок.

№	Назва судна	Тип судна	Дата	Місце розташування	Результат аварії
1.	Manhattan Bridge	Контейнеровоз	19 січня 2017 р.	Порт Фелікстоу, Великобританія	вибух допоміжного котла
2	CSC Rong Hai	Грузове судно	2 березня 2012 г.	Нанкін, Китай	вибух котла
3.	MV Hellenic Sea	Суховантаж	26 квітня 2012 р.	Порт Інчхон, Корея	вибух котла
4.	LNG Aries	Танкер	3 грудня 2012 р.	Кавасакі, Японія	втрата управління
5.	Saldanha	Суховантаж	18 листопада 2008 р.	Ньюкасл, Новий Південний Уельс, Австралія	вибух котла

В якості базової методології аналізу аварій у роботі [3] запропоновано використання підходу FMEA. FMEA – це метод аналізу ризиків, який підходить для визначення, ідентифікації і перевірки механічних та електричних апаратних систем на предмет потенційних відмов. Цей інструмент розглядає проблеми, пов'язані з характеристиками

системи і режимами відмови для кожного компонента системи, і забезпечує наявність відповідних заходів безпеки.

З використанням підходу FMEA визначено можливі види відмов, отримані зі звітів про аварії, зокрема: виток у трубках, несправність запобіжного клапана, несправність кришки доступу, несправність парового сепаратора, несправність форсунки системи подачі палива, низька температура мазуту, несправність стрижня електрода розпалювання в системі запалювання, несправність відкриття автоматичної вентиляційної заслінки, падіння полум'я в котлах і т. д. Всього визначено 30 видів можливих відмов з визначенням можливої причини відмови, наслідків та методів запобігання відмов.

В якості параметрів оцінки ризику в контексті використання FMEA запропоновано розглядати такі: параметр виникнення аварії, параметр серйозності аварії та параметр невиявлення. Виникнення (O) – це оцінка того, як часто прогнозується виникнення конкретної причини відмови. Серйозність (S) – це оцінка серйозності наслідків потенційної відмови для процесу або системи та її оточення. Невиявлення (D) – це оцінка ймовірності того, що робочі параметри системи управління не виявлять потенційну причину і такий режим відмови до того, як компонент буде пошкоджений і система буде зупинена [3]. Дані параметри надалі запропоновано розглядати як лінгвістичні змінні (ЛЗ) у рамках теорії нечітких множин, які в якості значень розглядають по десять термів відповідно. У табл. 2 наведені запропоновані значення ЛЗ з використанням різних функцій типу приналежності (MF) для нечітких множин першого типу. У роботі були протестовані три типи функцій приналежності для створення нечітких множин і виділення відмінностей між цими функціями, а саме таких як функція приналежності Гауса (GMF), трикутна функція приналежності (TMF) і функція приналежності трапецієподібної форми (ZMF).

Таблиця 2 – Параметри функцій приналежності для моделювання нечітких множин першого типу

Назва терму ЛЗ	Терм ЛЗ	GMF(σ, m)	ZMF (s, t, u, v)	TMF (s, t, v)
1	2	3	4	5
Поява "Малоймовірно"	O ₁	(0,425, 1)	(0,1, 0,9, 1,1, 1,9)	(0, 1, 2)
Подія "Дуже віддалена"	O ₂	(0,425, 2)	(1.1, 1.9, 2.1, 2.9)	(1, 2, 3)
Подія "Віддалена"	O ₃	(0,425, 3)	(2.1, 2.9, 3.1, 3.9)	(2, 3, 4)
Подія "Дуже низька"	O ₄	(0,425, 4)	(3.1, 3.9, 4.1, 4.9)	(3, 4, 5)
Подія "Низька"	O ₅	(0,425, 5)	(4.1, 4.9, 5.1, 5.9)	(4, 5, 6)
Подія "Помірна"	O ₆	(0,425, 6)	(5.1, 5.9, 6.1, 6.9)	(5, 6, 7)
Подія "Помірно висока"	O ₇	(0,425, 7)	(6.1, 6.9, 7.1, 7.9)	(6, 7, 8)
Подія "Висока"	O ₈	(0,425, 8)	(7.1, 7.9, 8.1, 8.9)	(7, 8, 9)
Подія "Дуже висока"	O ₉	(0,425, 9)	(8.1, 8.9, 9.1, 9.9)	(8, 9,10)
Подія "Майже напевно "	O ₁₀	(0,425, 10)	(9.1, 9.9, 10.1, 10.9)	(9,10,11)
Рівень серйозності «Немає»	S ₁	(0,425, 1)	(0,1, 0,9, 1,1, 1,9)	(0, 1, 2)

Назва терму ЛЗ	Терм ЛЗ	GMF(σ , m)	ZMF (s , t , u , v)	TMF (s , t , v)
1	2	3	4	5
Рівень серйозності «Дуже незначний»	S ₂	(0,425, 2)	(1.1, 1.9, 2.1, 2.9)	(1, 2, 3)
Рівень серйозності «Незначний»	S ₃	(0,425, 3)	(2.1, 2.9, 3.1, 3.9)	(2, 3, 4)
Рівень серйозності «Низький»	S ₄	(0,425, 4)	(3.1, 3.9, 4.1, 4.9)	(3, 4, 5)
Рівень серйозності "Середній"	S ₅	(0,425, 5)	(4.1, 4.9, 5.1, 5.9)	(4, 5, 6)
Рівень серйозності «Значний»	S ₆	(0,425, 6)	(5.1, 5.9, 6.1, 6.9)	(5, 6, 7)
Рівень серйозності «Дуже значний»	S ₇	(0,425, 7)	(6.1, 6.9, 7.1, 7.9)	(6, 7, 8)
Рівень серйозності «Екстремальний»	S ₈	(0,425, 8)	(7.1, 7.9, 8.1, 8.9)	(7, 8, 9)
Рівень серйозності «Дуже високий»	S ₉	(0,425, 9)	(8.1, 8.9, 9.1, 9.9)	(8, 9,10)
Рівень серйозності "Серйозний"	S ₁₀	(0,425, 10)	(9.1, 9.9, 10.1, 10.9)	(9,10,11)
Невиявлення«Майже неможливе »	D ₁	(0,425, 1)	(0,1, 0,9, 1,1, 1,9)	(0, 1, 2)
Невиявлення"Дуже віддалено"	D ₂	(0,425, 2)	(1.1, 1.9, 2.1, 2.9)	(1, 2, 3)
Невиявлення"Віддалено"	D ₃	(0,425, 3)	(2.1, 2.9, 3.1, 3.9)	(2, 3, 4)
Невиявлення«Дуже низьке»	D ₄	(0,425, 4)	(3.1, 3.9, 4.1, 4.9)	(3, 4, 5)
Невиявлення«Низьке»	D ₅	(0,425, 5)	(4.1, 4.9, 5.1, 5.9)	(4, 5, 6)
Невиявлення"Помірне"	D ₆	(0,425, 6)	(5.1, 5.9, 6.1, 6.9)	(5, 6, 7)
Невиявлення"Помірно високе"	D ₇	(0,425, 7)	(6.1, 6.9, 7.1, 7.9)	(6, 7, 8)
Невиявлення"Високе"	D ₈	(0,425, 8)	(7.1, 7.9, 8.1, 8.9)	(7, 8, 9)
Невиявлення"Дуже високе"	D ₉	(0,425, 9)	(8.1, 8.9, 9.1, 9.9)	(8, 9,10)
Невиявлення" Майже напевно"	D ₁₀	(0,425, 10)	(9.1, 9.9, 10.1, 10.9)	(9,10,11)

У даній роботі пропонується в якості термів розглядати інтервальні нечіткі множини другого типу (ІНМТ2).

Визначення 1. У загальному випадку нечітким інтервалом ІНМТ2 будемо називати ІНМТ2 \tilde{A}_I з опуклою верхньою і нижньою функціями приналежності, обмежують займаю площа невизначеності даного ІНМТ2.

Визначення 2. У загальному випадку нечітким числом ІНМТ2 будемо називати ІНМТ2 \tilde{A}_Δ з опуклою й унімодальною верхньою і нижньою функціями приналежності, обмежують займаю площа невизначеності даного ІНМТ2.

У рамках даної роботи пропонується використання трикутних нечітких чисел і трапецієподібних нечітких інтервалів, доцільність використання яких обумовлюється, по-перше, простотою виконання операцій над ними, по-друге, можливістю їх наочної графічної інтерпретації.

Особливістю вистави трикутного нечіткого числа (ТНЧ) або трапецієподібного нечіткого інтервалу (ТНІ) в термінах ІНМТ2 є те, що:

- по-перше, ліві і праві межі нечітких величин в термінах ІНМТ2 являють собою не точки, а інтервали невизначеності;

- по-друге, крайні значення інтервалів невизначеності, в свою чергу, є кордони двох НМТ1, визначених верхньою функцією приналежності $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$, і нижньою функцією приналежності $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$, які обмежують займану площу невизначеності (FOU) ТНЧ ІНМТ2 або ТНІ ІНМТ2 зверху і знизу відповідно;

- верхня $\bar{\mu}_{\tilde{A}}$, і нижня $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$ функції приналежності визначають нормальні опуклі НМТ1 на непустому носії, причому в разі ТНЧ ІНМТ2 це будуть унімодальні нормальні опуклі НМТ1.

Визначення 3. У загальному випадку, FOU ТНЧ ІНМТ2 \tilde{A}_Δ , крім класичного уявлення FOU, згідно [12-14], будемо формально представляти також у вигляді кортежу з такими параметрами:

$$FOU(\tilde{A}_\Delta) = \langle \alpha_{\bar{\mu}}, \alpha_{\underline{\mu}}, a_{\bar{\mu}}, a_{\underline{\mu}}, \beta_{\bar{\mu}}, \beta_{\underline{\mu}} \rangle, \quad (1)$$

де $\alpha_{\bar{\mu}}$ – верхній лівий коефіцієнт нечіткості $\bar{\mu}_{\tilde{A}_\Delta}$;

$\alpha_{\underline{\mu}}$ – нижній лівий коефіцієнт нечіткості $\underline{\mu}_{\tilde{A}_\Delta}$;

$a_{\bar{\mu}}$ – верхній центр (модальне значення) $\bar{\mu}_{\tilde{A}_\Delta}$;

$a_{\underline{\mu}}$ – нижній центр (модальне значення) $\underline{\mu}_{\tilde{A}_\Delta}$;

$\beta_{\bar{\mu}}$ – верхній правий коефіцієнт нечіткості $\bar{\mu}_{\tilde{A}_\Delta}$;

$\beta_{\underline{\mu}}$ – нижній правий коефіцієнт нечіткості $\underline{\mu}_{\tilde{A}_\Delta}$.

При цьому, трикутна верхня функція приналежності $\bar{\mu}_{\tilde{A}_\Delta}$ FOU(\tilde{A}_Δ) породжує нормальне унімодальне опукле НМТ1 на непустому носії – відкритим інтервалом $[a_{\bar{\mu}} - \alpha_{\bar{\mu}}, a_{\bar{\mu}} + \beta_{\bar{\mu}}]$, а трикутна нижня функція приналежності $\underline{\mu}_{\tilde{A}_\Delta}$ FOU(\tilde{A}_Δ) породжує нормальне унімодальне опукле НМТ1 на непустому носії – відкритим інтервалом $[a_{\underline{\mu}} - \alpha_{\underline{\mu}}, a_{\underline{\mu}} + \beta_{\underline{\mu}}]$.

Визначення 4. У загальному випадку, FOU ТНІ ІНМТ2 \tilde{A}_I , крім класичного

уявлення FOU згідно [12-14], будемо формально представляти також у вигляді кортежу з такими параметрами:

$$FOU(\tilde{A}_\Pi) = \langle \alpha_{\bar{\mu}}, \alpha_{\underline{\mu}}, a_{\bar{\mu}}, a_{\underline{\mu}}, b_{\bar{\mu}}, b_{\underline{\mu}}, \beta_{\bar{\mu}}, \beta_{\underline{\mu}} \rangle, \quad (2)$$

- де $\alpha_{\bar{\mu}}$ – верхній лівий коефіцієнт нечіткості $\bar{\mu}_{\tilde{A}_\Pi}$;
 $\alpha_{\underline{\mu}}$ – нижній лівий коефіцієнт нечіткості $\underline{\mu}_{\tilde{A}_\Pi}$;
 $a_{\bar{\mu}}$ – верхнє нижнє модальне значення $\bar{\mu}_{\tilde{A}_\Pi}$;
 $a_{\underline{\mu}}$ – нижнє модальне значення $\underline{\mu}_{\tilde{A}_\Pi}$;
 $b_{\bar{\mu}}$ – верхнє модальне значення $\bar{\mu}_{\tilde{A}_\Pi}$;
 $b_{\underline{\mu}}$ – нижнє верхнє модальне значення $\underline{\mu}_{\tilde{A}_\Pi}$;
 $\beta_{\bar{\mu}}$ – верхній правий коефіцієнт нечіткості $\bar{\mu}_{\tilde{A}_\Pi}$;
 $\beta_{\underline{\mu}}$ – нижній правий коефіцієнт нечіткості $\underline{\mu}_{\tilde{A}_\Pi}$.

При цьому, трапецієвидна верхня функція приналежності $\bar{\mu}_{\tilde{A}_\Pi} FOU(\tilde{A}_\Pi)$ породжує нормальне опукле НМТ1 на непустому носії – відкритим інтервалом $[a_{\bar{\mu}} - \alpha_{\bar{\mu}}, b_{\bar{\mu}} + \beta_{\bar{\mu}}]$, а трапецієвидна нижня функція приналежності $\underline{\mu}_{\tilde{A}_\Pi} FOU(\tilde{A}_\Pi)$ породжує нормальне унімодальне опукле НМТ1 на непустому носії – відкритим інтервалом $[a_{\underline{\mu}} - \alpha_{\underline{\mu}}, b_{\underline{\mu}} + \beta_{\underline{\mu}}]$.

Для побудови термів ЛЗ на основі НМТ1, відповідно до табл. 2, використовувався додаток Fuzzy Logic Toolbox зі складу програмного забезпечення MatLab. Приклад результатів побудови перших трьох термів для ЛЗ О з використанням ТНЧ та ТНІ відповідно наведено на рис. 1 і 2.

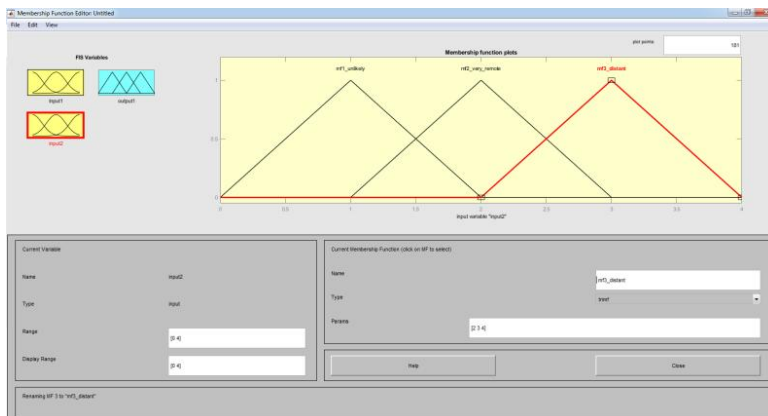


Рисунок 1 – Приклад побудови термів на основі НМТ1 з використанням ТНЧ

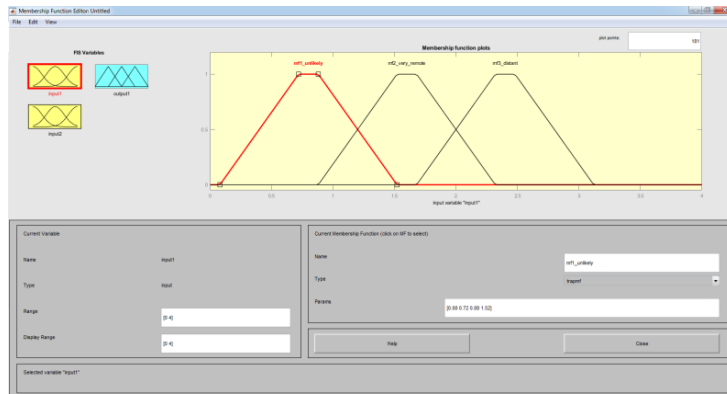


Рисунок 2 – Приклад побудови термів на основі НМТ1 з використанням ТНІ

Для конвертування нечіткої логічної системи першого типу в нечітку логічну систему другого типу використовувалась функція `convert To Type 2` програмного забезпечення MatLab. Приклади результатів конвертування для ІНМТ2 наведено на рис. 3 і 4.

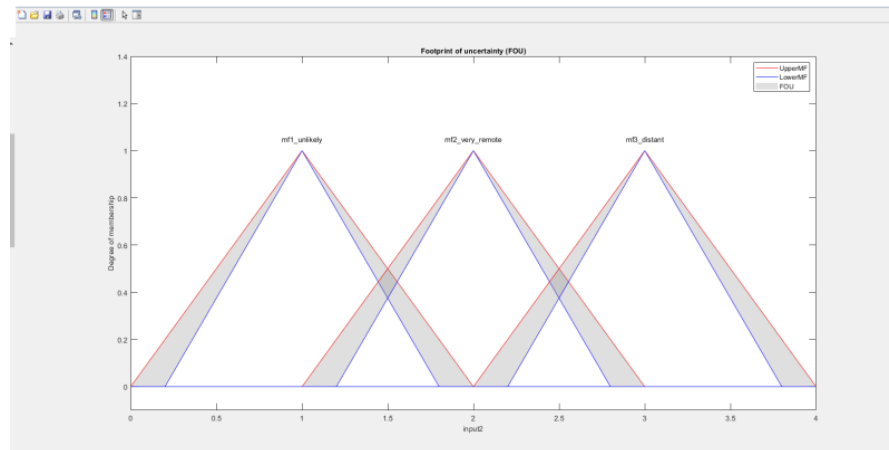


Рисунок 3 – Приклад конвертування термів на основі ІНМТ2 з використанням ТНЧ

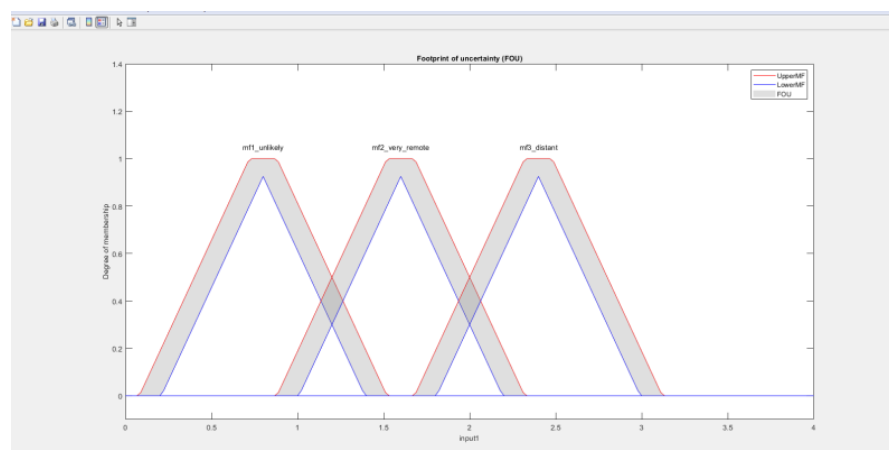


Рисунок 4 – Приклад конвертування термів на основі ІНМТ2 з використанням ТНІ

На рис. 5 наведена узагальнена архітектура експертної системи для аналізу аварій на суднових котельних установках на основі НЛС ІТ2.

У загальному випадку інтервальні нечіткі множини другого типу, з одного боку, забезпечують формалізацію більшої кількості додаткових ступенів невизначеності у порівнянні з класичними нечіткими множинами першого типу, з іншого боку, є такими, що реалізуються при розробці нечітких логічних систем і мають меншу обчислювальну складність, у порівнянні з нечіткими множинами другого типу [12-14].

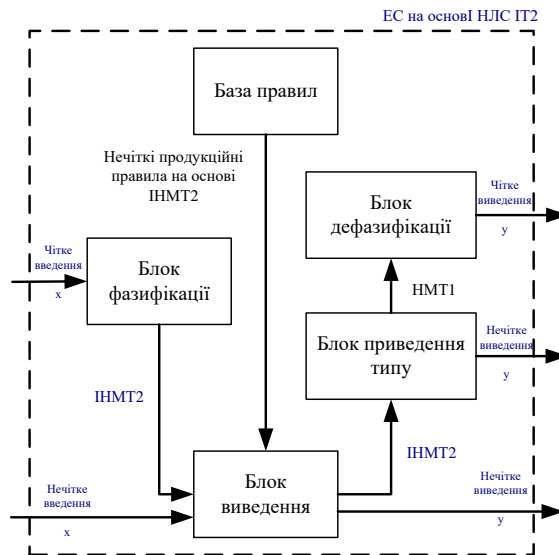


Рисунок 5 – Архітектура експертної системи на основі НЛС ІТ2

Висновки

1. Узагальнено аналіз даних про аварії суднових котельних установок з метою визначення найгірших сценаріїв під час їх роботи.
2. Для кількісного аналізу ризиків виникнення аварій суднової котельної установки вдосконалений підхід з використанням нечіткої експертної системи на основі використання у відповідних продукційних правилах інтервальних нечітких множин другого типу.
3. В якості функцій приналежності вдосконаленої нечіткої експертної системи використовуються площі невизначеності інтервальних нечітких множин другого типу.
4. Методика побудови площ невизначеності полягає в первинній побудові функцій приналежності для НМТ1 та в подальшому їх автоматичному конвертуванні в функції приналежності для ІНМТ2.
5. Запропонований підхід до побудови експертної системи на основі ІНМТ2 підвищить ефективність діяльності персоналу, задіяного в роботі морських котлів на борту суден, на інших морських і берегових об'єктах, дозволить вжити необхідних заходів для зменшення наслідків аварій, пов'язаних з експлуатацією суднових котельних установок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dr J. Cowley The Running and Maintenance of Marine Machinery. (sixth ed.), Institute of Marine Engineers in London (1992).

2. Introduction to Marine Engineering. (second ed.), Butterworth Heinemann, Oxford, Boston (1996).
3. Shoaib Ahmed, Xie-Chong Gu Accident-based FMECA study of Marine boiler for risk prioritization using fuzzy expert system, Results in Engineering, Volume 6, 2020, 100123, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100123>.
4. Q. Zhou, V.V. Thai Fuzzy and grey theories in failure mode and effect analysis for tanker equipment failure prediction Saf. Sci., 83 (Mar. 2016), pp. 74-79.
5. P. Okoh, S. Haugen A study of maintenance-related major accident cases in the 21st century. Process Saf. Environ. Protect., 92 (4) (Jul. 2014), pp. 346-356.
6. S. Kum, B. Sahin A root cause analysis for Arctic Marine accidents from 1993 to 2011. Saf. Sci., 74 (2015), pp. 206-220.
7. S. Liu, X. Guo, L. Zhang An improved assessment method for FMEA for a shipboard integrated electric propulsion system using fuzzy logic and DEMATEL theory. Energies, 12 (16) (2019).
8. B. Kwiecińska Cause-and-effect analysis of ship fires using relations diagrams. Zesz. Nauk. Akad. Morsk. w Szczecin., 44 (116) (2015), pp. 187-191.
9. J.G. Atherton The scientific investigation of marine fires and explosions. Mar. Technol. Soc. J., 46 (6) (2012), pp. 129-141.
10. B. Ünver, S. Gürgen, B. Sahin, İ. Altın Crankcase explosion for two-stroke marine diesel engine by using fault tree analysis method in fuzzy environment. Eng. Fail. Anal., 97 (Mar. 2019), pp. 288-299.
11. T. Baalisampang, R. Abbassi, V. Garaniya, F. Khan, M. Dadashzadeh Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation. Ocean Engineering, 158 (Jun. 2018), pp. 350-366.
12. Mendel J.M. Type-2 fuzzy sets and systems: an overview, IEEE Computational Intelligence Magazine, 2007. vol. 2. pp. 20-29.
13. Mendel J.M., John R.I. Type-2 Fuzzy Sets Made Simple, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002. vol. 10, no. 2. pp. 347-353.
14. Олизаренко С.А., Брежнев Е.В., Перепелица А.В. Нечеткие множества типа 2. Терминология и представление. Системы обработки информации. Харьков: ХУПС, 2010. Вип. 8 (89). С. 131–140.

REFERENCES

1. Dr J. Cowley (1992). The Running and Maintenance of Marine Machinery. (sixth ed.), Institute of Marine Engineers in London.
2. Introduction to Marine Engineering (1996). (second ed.), Butterworth Heinemann, Oxford, Boston.
3. Shoaib Ahmed, Xie-Chong Gu Accident-based FMECA study of Marine boiler for risk prioritization using fuzzy expert system, Results in Engineering, Volume 6, 2020, 100123, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100123>.
4. Q. Zhou, V.V. Thai Fuzzy and grey theories in failure mode and effect analysis for tanker equipment failure prediction Saf. Sci., 83 (Mar. 2016), pp. 74-79.
5. P. Okoh, S. Haugen A study of maintenance-related major accident cases in the 21st century. Process Saf. Environ. Protect., 92 (4) (Jul. 2014), pp. 346-356.
6. S. Kum, B. Sahin (2015). A root cause analysis for Arctic Marine accidents from 1993 to 2011. Saf. Sci., 74, pp. 206-220.

7. S. Liu, X. Guo, L. (2019) ZhangAn improved assessment method for FMEA for a shipboard integrated electric propulsion system using fuzzy logic and DEMATEL theory. *Energies*, 12 (16).
8. B. Kwiecińska (2015) Cause-and-effect analysis of ship fires using relations diagrams. *Zesz. Nauk. Akad. Morsk. w Szczecin.*, 44 (116), pp. 187-191.
9. J.G. Atherton (2012) The scientific investigation of marine fires and explosions. *Mar. Technol. Soc. J.*, 46 (6), pp. 129-141.
10. B. Ünver, S. Gürgen, B. Sahin, İ. AltınCrankcase explosion for two-stroke marine diesel engine by using fault tree analysis method in fuzzy environment. *Eng. Fail. Anal.*, 97 (Mar. 2019), pp. 288-299.
11. T. Baalisampang, R. Abbassi, V. Garaniya, F. Khan, M. Dadashzadeh Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation. *Ocean Engineering*, 158 (Jun. 2018), pp. 350-366.
12. Mendel J.M. (2007) Type-2 fuzzy sets and systems: an overview, *IEEE Computational Intelligence Magazine*. vol. 2. pp. 20-29.
13. Mendel J.M., John R.I. (2002) Type-2 Fuzzy Sets Made Simple, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. vol. 10, no. 2. pp. 347-353.
14. Olyzarenko S.A., Brezhnev E.V., Perepelytsa A.V. (2010) Nechetkyemnozhestvatypa 2. Termynolohiya y predstavlenye. *Systemy obrobky informatsii*. Kharkiv: KhUPS. Vyp. 8 (89). pp. 131–140. [in Ukrainian]

Shtrybets V.V., Trofymenko A.O., Lihanenko V.V., Tryshyn V.V.
**EXPERT SYSTEM FOR ANALYSIS OF ACCIDENTS IN SHIP BOILER BOILERS
 INSTALLATION**

The operation of the ship boiler plant is associated with a large number of potential failures, which, in turn, cause accidents and can lead to human casualties and damage to ship equipment, etc. The paper summarizes data on accidents of ship boiler plants (explosions, fires, power outages or other serious disturbances in the operation of ships) in order to determine the worst case scenarios during their operation. For the quantitative analysis of the risks of accidents in the ship's boiler plant, the approach using a fuzzy expert system based on the use of interval fuzzy sets of the second type in the relevant production rules has been improved. The areas of uncertainty of interval fuzzy sets of the second type are used as membership functions of the improved fuzzy expert system.

Interval fuzzy sets of the second type, on the one hand, provide formalization of more additional degrees of uncertainty in comparison with classical fuzzy sets of the first type, on the other hand, are realized in development of fuzzy logical systems and have less computational complexity, in comparison with fuzzy sets of another type.

During the study, three types of membership functions were tested to create fuzzy sets and distinguish between these functions (Gaussian membership function (GMF), triangular membership function (TMF) and trapezoidal membership function (ZMF)).

As a basic methodology for accident analysis in the work using the risk analysis method, it considers problems related to system characteristics and failure modes for each component of the system, and ensures the availability of appropriate security measures, which in turn is suitable for identification, identification and verification mechanical and electrical hardware systems for potential failures (Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)).

Key words: *ship boiler plant, emergency, interval fuzzy set of the second type, area of uncertainty.*