

МЕТОДИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАЛЕЖНОСТІ КОМПОНЕНТІВ ДІАГНОСТИЧНИХ ЗАСОБІВ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬ ТЕХНОЛОГІЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

В даній статті розкрито сутність методів функціональної належності компонентів діагностичних засобів, які використовують технологію нечіткої логіки. Визначено та розкрито специфіку використання автоматичного блоку постановки діагнозу агрегатів, механізмів та систем транспортних засобів із урахуванням заданих значень їх діагностичних параметрів. У статті висвітлена система терм-множин діагностичних параметрів, яка об'єктивно відображає закономірності формування значень діагностичних параметрів у реальних умовах експлуатації транспортних засобів і може бути використана при побудові термієв діагностичних параметрів при проведенні експрес-контролю транспортних засобів в умовах їх використання для виконання завдань з охорони державного кордону.

Ключові слова: діагностичні засоби, нечіткі терм-множини, кластеризація, транспортні засоби.

V.A.SIVAK

National Academy of State Borderguard service of Ukraine named after B. Khmelnytskyi

METHODS OF FUNCTIONAL COMPONENTS FACILITIES OF DIAGNOSTIC TOOLS, WHICH USE FUZZY LOGIC TECHNOLOGY

This article reveals the essence of methods of components functional facilities of diagnostic tools, which use fuzzy logic technology. It was identified and disclosed, the specific use of automatic block diagnosis units, mechanisms and systems of vehicles with the current values of diagnostic parameters. In the article the system of term-sets of diagnostic parameters, which objectively reflect the regularities of formation of values of diagnostic parameters in real operation conditions of vehicles and can be used to construct terms of diagnostic parameters for carrying out express control of vehicles in terms of their use for performing tasks for the protection of the state border.

Keywords: Diagnostic tools, the fuzzy term set, clustering, vehicles.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Стабільне існування України як суверенної держави, вимагає захисту її кордонів. Це завдання покладено на підрозділи та органи Державної прикордонної служби України (ДПСУ), які згідно вимог чинного законодавства здійснюють як охорону так і оборону державного кордону [1].

В той же час, для забезпечення оперативності та мобільності несення підрозділами та органами ДПСУ прикордонної служби, залучається достатня кількість штатних сучасних транспортних засобів (ТЗ). Так для потреб прикордонників в сучасних, маневрених та мобільних ТЗ, тільки в період з 2012 по 2015 рік було закуплено та отримано в рамках міжнародної технічної допомоги понад 660 од. ТЗ та спеціальної техніки на загальну суму близько 292 млн. грн., при цьому, процес оновлення парку техніки триває [2].

На превеликий жаль, в процесі використання даних ТЗ і СТ за призначенням актуальною постає проблематика із дотримання їх безпечної експлуатації при виконанні оперативно-службових та службово-бойових завдань з охорони державного кордону, що до цих пір на жаль науково та концептуально не обґрунтовано. Сумна статистика дорожньо-транспортних пригод та подій з ТЗ за останніх 5 років, як на службовому так і на особистому транспорті свідчить про недосконалість процесу забезпечення безпеки експлуатації ТЗ персоналом ДПСУ і як результат, за останні 5 років у ДПСУ сталося біля 225 ДТП, в яких загинув 51 чоловік та 110 чоловік було травмовано, а також пошкоджено більш, як 56 одиниць службових ТЗ [3].

В рамках вирішення проблематики забезпечення безпечної експлуатації ТЗ підрозділами і ООДК та з метою підвищення рівня контролю технічного стану даних ТЗ, автором досліджується можливість застосування методів функціональної належності компонентів діагностичних засобів, які використовують технологію нечіткої логіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми та на які опирається автор. Дослідження питань використання технології нечіткої логіки в діагностичних системах ТЗ, в процесі їх експлуатації, здійснювалось в наукових працях таких відомих вчених, як Варфоломєєв В.Н., Васильєв В.І., Гордієнко Е.К. та інші [4, 5]. Однак існує необхідність розкрити можливість використання технології нечіткої логіки, як основи застосування відомих методів побудови функцій належності компонентів діагностичних засобів в площині специфіки вирішення проблеми забезпечення безпеки експлуатації ТЗ, в умовах виконання завдань з охорони державного кордону.

Метою даної статті є розкриття сутності методів функціональної належності компонентів діагностичних засобів, які використовують технологію нечіткої логіки, а також визначення специфіки використання автоматичного блоку постановки діагнозу агрегатів, механізмів та систем транспортних засобів із урахуванням заданих значень їх діагностичних параметрів.

Викладення основного матеріалу дослідження. В рамках теоретичного аспекту розробленої та запропонованої автором Концепції забезпечення безпечної експлуатації ТЗ підрозділів та органів ДПСУ в

умовах охорони державного кордону, сутність якої викладена у матеріалах [6], для підвищення рівня контролю технічного стану ТЗ підрозділів та ООДК пропонується використовувати удосконалені методи поглибленого діагностування агрегатів та систем ТЗ та обґрунтування діагностичних нормативів експлуатаційної безпеки ТЗ. Разом з тим, в рамках впровадження нових інформаційних технологій у вирішення проблеми забезпечення експлуатаційної безпеки ТЗ, необхідно розглянути сутність та можливість використання методів функціональної належності компонентів діагностичних засобів, які використовують технологію нечіткої логіки.

Досвід використання технології нечіткої логіки в діагностичних системах, які давно та успішно застосовуються в предметних галузях авіації, космонавтики, медицини, морському, залізничному транспорті, дає підстави вважати, що найбільш доцільним об'єктом для застосування нечіткої логіки є блок автоматичної постановки діагнозу [7, 8]. Як правило, він має структуру, яка зображена на рис. 1

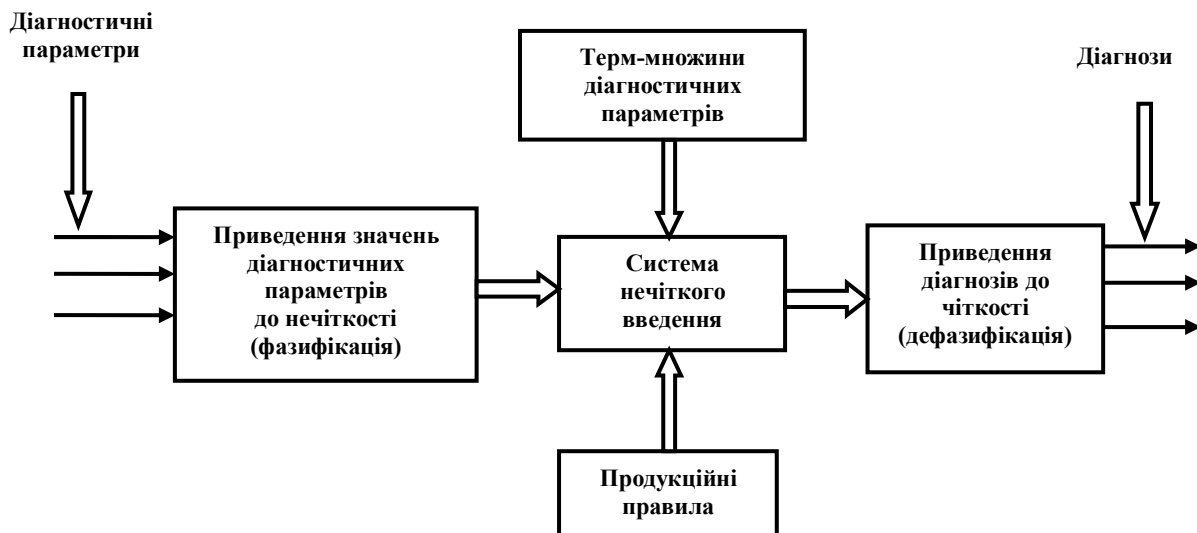


Рис. 1. Структура блоку автоматичної постановки діагнозу з використанням технології нечіткої логіки

Як відомо, в основі теорії нечіткої логіки лежать поняття нечіткої і лінгвістичних змінних, а також нечітких множин. Поняття нечіткої та лінгвістичної змінних використовуються при описі об'єктів та явищ за допомогою нечітких множин [9].

Нечітка змінна характеризується трійкою $\langle \alpha, X, A \rangle$, де α – найменування змінної; X – універсальна множина (галузь визначення α); A – нечітка множина на X , що описує обмеження на значення нечіткої змінної α .

Лінгвістичною змінною (ЛП) називається набір $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$, де β – найменування лінгвістичної змінної; T – безліч її значень (терм-множин) найменування, що представляють собою, нечіткі змінні, областю визначення кожної з яких є множина X . Множина T називається базовою терм-множиною лінгвістичної змінної; G – синтаксична процедура, що дозволяє оперувати елементами терм-множин T , зокрема, генерувати нові терми (значення). M – семантична процедура, що дозволяє перетворити кожне нове значення лінгвістичною змінною, яке утворене процедурою G , у непарну змінну, тобто сформувати відповідну нечітку множину.

Нечітка підмножина A відрізняється від звичайного тим, що для елементів x з E (універсальна множина) немає однозначної відповіді «ТАК-НІ» щодо властивості R . У зв'язку із цим нечітку підмножину A універсальної множини E визначається як безліч упорядкованих пар $A = \{\mu_A(x)/x\}$, де $\mu_A(x)$ – характеристична функція належності (або просто функція належності), що ухвалює значення в деякій цілком упорядкованій множині M (наприклад, $M = [0,1]$).

Функція належності вказує ступінь (або рівень) належності елемента x підмножині A . Множину M називають множиною належностей.

Якщо $M = \{0,1\}$, то нечітка підмножина A може розглядатися як звичайна або чітка множина.

Наприклад, треба визначити частоту обертання колінчатого валу двигуна (або навантаження на вал) за допомогою понять «Низька», «Середня», «Висока», при цьому діапазон зміни частоти від 1000 об/хв до 5000 об/хв. У цьому випадку лінгвістична змінна може виглядати у такий спосіб: β – частота обертання; $T = \{\text{«Низька»}, \text{«Середня»}, \text{«Висока»}\}$; $X = [1000, 5000]$; G – процедура утворення нових термів; M – процедура завдання на $X = [1000, 5000]$ нечітких множин $A_1 = \text{«Низька»}$, $A_2 = \text{«Середня»}$, $A_3 = \text{«Висока»}$, а також нечітких множин для термів з $G(T)$ відповідно до правил трансляції нечітких множин.

При цьому терм-множину і розширена терм-множину можна характеризувати функціями належності, наприклад, як на рис. 2, 3.

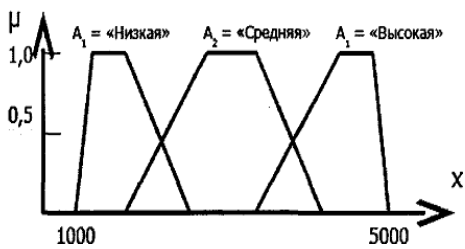


Рис. 2. Функції належності нечітких множин A1, A2, A3

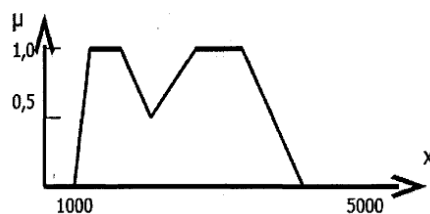


Рис. 3. Функція належності нечітких множин «Низька або середня» = A1 U A2

Після фазифікації (приведення до нечіткості) вихідних даних про частоту обертання, одержуємо ступені належності конкретних (точних) значень до того або іншого терму (дані оберти «Низькі» зі ступенем належності 0,9).

Визначаючи подібним чином сукупність діагностичних параметрів, що характеризують технічний стан об'єкта, можна поставити діагноз з оцінкою його вірогідності.

Існує понад десяток типових форм кривих для завдання функцій належності [10]. Найбільше поширення одержали трикутна та трапецеїдальна функції належності.

Трикутна функція належності визначається трійкою чисел (a, b, c), а її значення в точці x обчислюється згідно з виразом:

$$MF(x) = \begin{cases} 1 - \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1 - \frac{x-c}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad (1)$$

При (b-a) = (c-b) маємо випадок симетричної трикутної функції належності, яка може бути однозначно задана двома параметрами із трійки (a, b, c).

Аналогічно для завдання трапецеїдальної функції належності необхідна четвірка чисел (a, b, c, d):

$$MF(x) = \begin{cases} 1 - \frac{b-x}{b-a}, & c \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ 1 - \frac{x-c}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad (2)$$

При (d-a) = (d-c) трапецеїдальна функція належності ухвалює симетричний вид.

Основою для проведення операції нечіткого логічного виводу є база продукційних правил, що містить нечіткі висловлення у формі «ЯКЩО-ТО», а також функції належності для відповідних лінгвістичних терм.

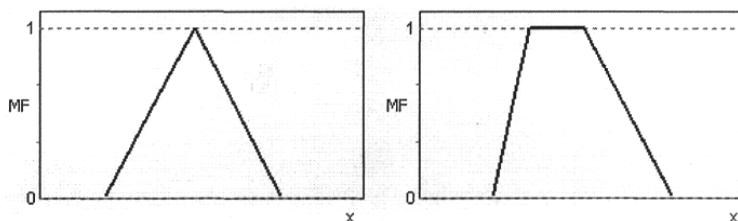


Рис. 4. Типові кусочно-лінійні функції належності

Розглянемо докладніше нечіткий вивід на прикладі механізму Мамдани (Mamdani). Це найпоширеніший спосіб логічного виводу в діагностичних нечітких системах. У ньому використовується мінімаксна композиція нечітких множин. Даний механізм містить у собі наступну послідовність дій (рис. 1):

процедура фазифікації: визначаються ступені істинності, тобто значення функцій належності для лівих частин кожного правила (передумов). Для бази правил з m правилами позначимо ступені істинності як A_{ik}(x_k), i = 1..m, k = 1..n; нечіткий вивід. Спочатку визначаються рівні «відсікання» для лівої частини кожного з

правил: $\alpha_{fai} = \min_i (A_{ik}(x_k))$.

Далі знаходиться «усічені» функції належності: $B(y) = \min_i (\alpha_{fai} B_i(y))$, композиція, або об'єднання отриманих усічених функцій, для чого використовується максимальна композиція нечітких множин: $MF(y) = \max_i (B(y))$, де MF(y) – функція належності підсумкової нечіткої множини; дефазифікація, або

приведення до чіткості. Існує кілька методів дефазифікації. Наприклад, метод середнього центру, або центроїдний метод. Геометричний зміст такого значення - центр ваги для кривої $MF(y)$. На рис. 5 графічно показано процес нечіткого виводу по Мамдані для двох вхідних діагностичних параметрів і двох нечітких правил R1 і R2.

В цих умовах, найбільш важкою проблемою при побудові нечіткої логічних систем є проблема побудови терм – множин. Найчастіше вони будуються методом прямого або непрямого експертного опитування, що вносить значну частку суб'єктивності в розроблювальну систему [11].

У той же час специфіка організації процесів діагностування агрегатів і систем ТЗ і прийнята в провідних країнах світу концепція використання діагностичної інформації для керування процесами технічної експлуатації та ремонту ТЗ на автотранспортних підприємствах, забезпечує нагромадження великого обсягу цієї інформації.

Наявність такої інформації дозволяє в більшості випадків відмовитися від експертного методу побудови термів і перейти до більш досконалої й обґрунтованої послідовності їх побудови.

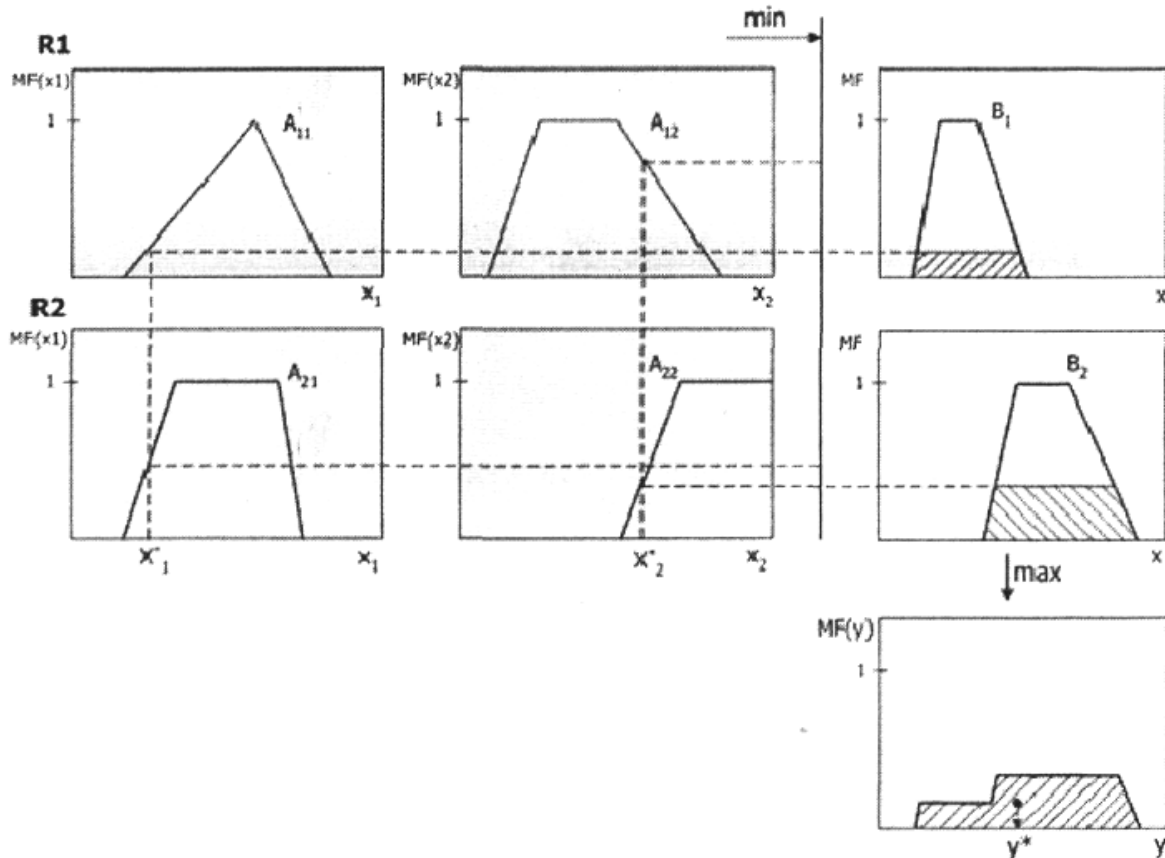


Рис. 5. Схема нечіткого виводу по Мамдані

Запропонована послідовність формування термів діагностичних параметрів містить у собі наступні етапи:

1. Формується база даних з комплексу діагностичних параметрів $\{S_i\}$.

2. Використовуючи методи кластерного аналізу, за базою експериментальних даних визначаються кластери кількісних значень у діагностичних параметрах $\{S_{ij}\}$.

При цьому, кластеризацію рекомендується проводити на основі використання неймережі Кохонена, відмінною рисою якої виявляється можливість самонавчання тільки на основі вектора вхідних даних.

Мережі Кохонена є типовим представником мереж, що вирішують завдання класифікації без вчителя. Мережа автоматично розбиває безліч експериментальних даних в n-мірному просторі на класи, близькі за змістом до «квадрата евклідової відстані», тобто в якості міри близькості використовується «евклідова міра»:

$$d(x, w_i) = \|x - w_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^N (x_j - w_{ij})^2}, \quad (3)$$

Таким чином, кількість кластерів визначається нейромережею автоматично, що дуже важливо при розробці нових методів діагностування, коли закономірності поведінки діагностичних параметрів ще слабо вивчені.

В ході практичної реалізація даного етапу зручно використовувати нейромережу Кохонена з

аналітичним пакетом Deductor Studio Lite 4.2 фірми «Basesgroup». В цьому випадку, результати кластеризації представляються у графічному виді (приклад наведений на рис. 6), а також у вигляді кількісних характеристик кожного із кластерів. Кожна експериментальна точка відображається на карті Кохонена у вигляді гнізда, яке пофарбовано в колір, який співвідноситься з величиною даного параметра. З рис. 6 видно, що експериментальні значення діагностичного параметра T (час спрацьовування гальмового приводу) автоматично розділені нейромережею на три кластери.

3. Визначаються мінімальне $S_i \min$ і максимальне $S_i \max$ значення параметрів, що потрапили в кожний i -тий кластер. Визначається також і центр кожного кластера S_{ic} .

4. Кількість термів параметру приймається рівним кількості отриманих кластерів. При цьому, вид функції належності переважно приймати у вигляді трапецеїдальної форми.

При побудові функції належності, необхідно розглядати впорядковану множину термів T . Дана процедура означає, що терм, який має носій, розташований лівіше на дійсній осі, одержує менший номер. Для впорядкування множини T використовуємо вираз:

$$(\forall T_i \in T)(\forall T_j \in T)(i > j \leftrightarrow (\exists x \in C_i)(\forall y \in C_j)(x > y)). \quad (4)$$

При цьому, терм-множини розглянутих лінгвістичних змінних повинні задовольняти наступним умовам:

$$(\forall \beta)\mu C_i(x') = 1, \mu C_m(x'') = 1; \quad (5)$$

$$(\forall \beta)(\forall T_i \in T \setminus \{T_m\})(0 < \sup \mu C_i \cap C_{i+1}(x) < 1); \quad (6)$$

$$(\forall \beta)(\forall T_i \in T)(\exists x \in X)(\mu C_i(x) = 1); \quad (7)$$

$$(\forall \beta)(\exists x'' \in R_i)((\forall x \in X)(x' < x < x'')). \quad (8)$$

Інтерпретація виразів (5) – (8) полягає у наступному.

Умова (5) підкреслює, що функції належності крайніх термів лінгвістичних змінних не можуть мати симетричну форму, що обумовлене розташуванням цих термів в упорядкованій множині T .

Умова (6) обмовляє неприпустимість у базовій множині T -термів нерозрізнених термів.

Умова (7) указує на те, що кожне поняття має хоча б один типовий об'єкт, який позначається цим поняттям. Тому неприпустимо сполучення на одному відрізку шкали функцій належності з різною висотою $d = \max \mu(x)$. Передбачається використання нормальних нечітких множин з висотою $d = 1$.

Умова (8) обумовлює обмеженість області визначення X кінцевою множиною точок.

5. Будуються нечіткі множини, що описують кожний терм діагностичних параметрів. Перший терм кожного параметра задається функцією належності виду:

$$F_{ij}(S) = \begin{cases} 1.0, & \text{якщо } s \leq S_{11} \\ \frac{s - S_{12}}{S_{11} - S_{12}}, & \text{якщо } S_{11} < s < S_{12} \\ 0, & \text{якщо } s \geq S_{12} \end{cases} \quad (9)$$

Останній g -терм кожного j -го параметра визначається функцією належності виду:

$$F_{ij}(S) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } s \leq S_{r1} \\ \frac{s - S_{r1}}{S_{r2} - S_{r1}}, & \text{якщо } S_{r1} < s < S_{r2} \\ 1.0, & \text{якщо } s \geq S_{r2} \end{cases} \quad (10)$$

Для обчислення нечітких i -х термів, що розташовані між першим (лівим) та останнім (правим) термом, використовується формула:

$$F_{ij}(S) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } s \leq S_{i1} \\ \frac{s - S_{i1}}{S_{i2} - S_{i1}}, & \text{якщо } S_{i1} < s < S_{i2} \\ \frac{s - S_{i4}}{S_{i3} - S_{i4}}, & \text{якщо } S_{i3} < s < S_{i4} \\ 0, & \text{якщо } s \geq S_{i4} \end{cases} \quad (11)$$

При визначенні опорних точок термів слід дотримуватися наступних умов:

1. Для першого терму: $S_{11} = S_{1\max} - \delta$, де $S_{1\max}$ – верхня межа першого кластера, а δ – похибка виміру діагностичного параметру; $S_{12} = S_{c2}$, де S_{c2} – центр другого кластеру.

2. Для останнього терму: $S_{r2} = S_{r\min} + \delta$, де $S_{r\min}$ – нижня межа останнього кластеру; $S_{r1} = S_{(r-2)4} = S_{c(r-1)}$, де $S_{c(r-1)}$ – центр передостаннього кластеру.

3.3. Для i -х кластерів, що розташовані між першим і останнім кластером: $S_{i1} = S_{(i-2)4} = S_{c(i-1)}$; $S_{i2} = S_{i\min} + \delta$; $S_{i3} = S_{i\max} - \delta$; $S_{i4} = S_{c(i+1)}$, де $S_{i\min}$ та $S_{i\max}$ відповідно нижня і верхня межа i -го кластеру, а $S_{c(i-1)}$ і $S_{c(i+1)}$ – центри $(i - 1)$ та $(i + 1)$ кластерів.

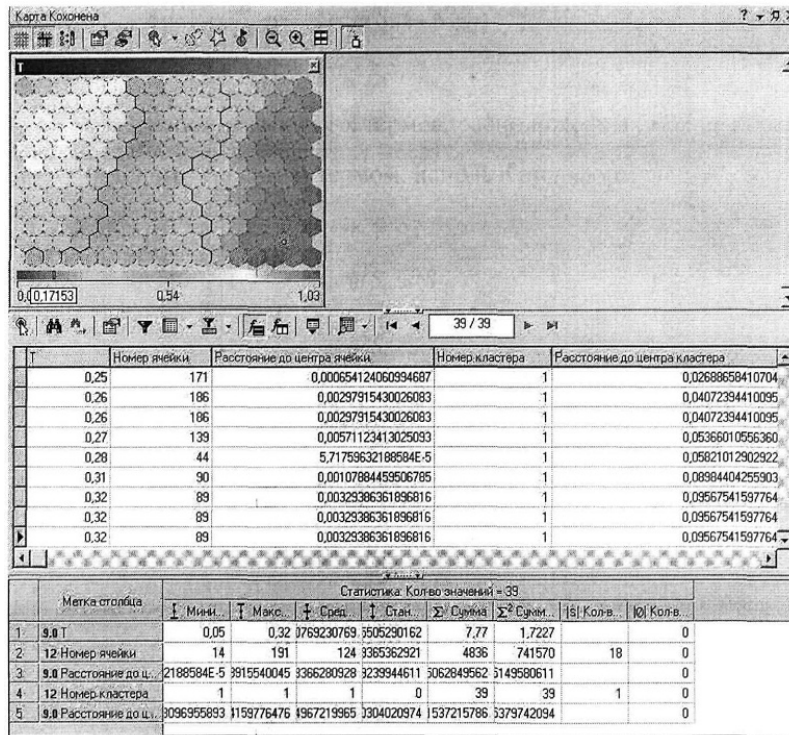


Рис. 6. Приклад кластеризації значень діагностичного параметру «Час спрацьовування гальмівного приводу» нейронною мережею Кохонена

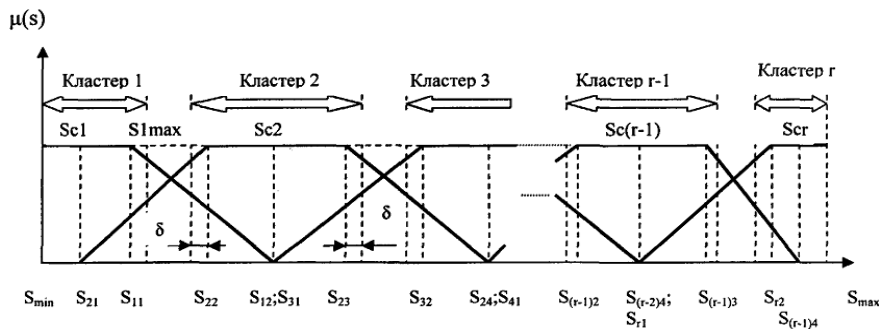


Рис. 7. До процесу формування термів діагностичних параметрів на основі кластеризації

Висновки

Таким чином, отримана система терм-множин діагностичних параметрів об'єктивно відображає закономірності формування значень діагностичних параметрів у реальних умовах експлуатації транспортних засобів. Відповідно, дані методи можуть бути використані при побудові термів діагностичних параметрів при проведенні експрес-контролю транспортних засобів в умовах їх використання для виконання оперативно-службових завдань з охорони державного кордону.

Література

1. Закон України «Про Державну прикордонну службу України» // Відомості Верховної Ради. – 2003. – № 27. – Ст. 208.
2. Букоємський С.Л. Про стан та перспективи технічного забезпечення ДПСУ за 2014 та вісім місяців 2015 року : доповідь на зборах керівного складу інженерно-технічних підрозділів РУ та органів ДПСУ / С.Л. Букоємський // Матеріали зборів керівного складу інженерно-технічних підрозділів Державної прикордонної служби України. – К. : АДПСУ, 2015. – 32 с.
3. Сівак В.А. Аналіз сучасного стану забезпечення безпеки експлуатації транспортних засобів органів охорони державного кордону / О.Й.Мацько, В. А. Сівак // Труды університету. – К. : Видавництво НУОУ, 2015. – № 3(130). – С. 207–210.
4. Васильев В.И. Метод обучаемых деревьев решений в задачах синтеза алгоритмов автоматической постановки диагноза систем автомобиля / В.И. Васильев, Я.А. Борщенко // Вестник МАДИ (ГТУ). – 2006. – № 6. – С. 91–92.
5. Гордиенко Е.К. Искусственные нейронные сети. Основные определения и модели / Е. К. Гордиенко, А. А. Лукьяница // Техническая кибернетика. – 1994. – № 5. – С. 79–92.
6. Сівак В.А. Концепція безпечної експлуатації транспортних засобів в умовах охорони державного

кордону / В.А. Сівак // Збірник наукових праць НАДПСУ. Серія: військові і технічні науки: наукове видання. – Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2015. – № 2(64). – С. 76–82.

7. Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации / Станислав Оссовский ; пер. с пол. И. Д. Рудинского. – М. : Финансы и статистика, 2004 (Великолук. гор. тип.). – 343 с.

8. Плахтеев А.П. Архитектура вычислительных средств мехатронных систем на автомобильном транспорте / А.П. Плахтеев // Автомобильный транспорт в XXI веке : материалы международной научно-технической конф. – Харьков, 2003. – С. 68–70.

9. Гурко А.Г. Перспективы использования нечеткой логики в системах управления движением транспортными средствами / А. Г. Гурко // Автомобильный транспорт в XXI веке : материалы международной научно-технической конференции. – Харьков, 2003. – С. 66–68.

10. Димитров В.П. Особенности построения функций принадлежности лингвистических переменных предметной области «Технологическая настройка» / В.П. Димитров, Л.В. Борисова // Вестник ДГТУ. – Ростов-на-Дону, 2005. – Т. 5. № 5(27). – С. 653–660.

11. Тарасик В.П. Интеллектуальные системы управления транспортными средствами / В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич. – Минск : УП «Технопринт», 2004. – 512 с.

Рецензія/Peer review : 15.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 6.12.2015 р.

Рецензент: д.т.н., професор Андрощук О.С.

УДК 621.22

С.А. РУСАНОВ, Д.О. ДМИТРИЄВ, О.О. ЛОБОВ, П.П. РЕМІЗОВ

Херсонський національний технічний університет

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕУ «КАСКАД-3» І ЗМІШАНІ ЗАДАЧІ В АЛЬТЕРНАТИВНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

В статті розглянуто питання, пов'язані з моделюванням аеродинаміки вітроенергетичної установки «КАСКАД-3». За запропонованою авторами методикою розрахована прогнозована потужність обладнання. Отримана картина розподілення моментів на валу установки, отримані характеристики обладнання. В статті обговорюється питання класифікації аналогічних зовнішніх, внутрішніх та змішаних задач гідро- та аеродинаміки. Детально розглядається методика чисельних розрахунків – від виділення доменів до формування сітки геометрії. Результат співставляється з експериментальними даними.

Ключові слова: аеродинаміка, вітроенергетика, моделювання.

S.A. RUSANOV, D.O. DMITRIEV, O.O. LOBOV, P.P. REMIZOV

Kherson National Technical University

ENERGY CHARACTERISTICS WIND POWER INSTALLATIONS "CASCADE-3" AND THE MIXED PROBLEM IN THE ALTERNATIVE ENERGY

The article deals with issues related to the modelling of aerodynamics wind power installations "CASCADE-3." The projected capacity of the equipment is calculated with a help of method proposed by the authors. The result is the distribution of points on the shaft installations, equipment specifications are obtained. In discussing the problem there are classification of similar problems as external, internal and mixed problems hydro- and aerodynamics. The technique of numerical calculations is considered in detail – from the selection of domains to form mesh geometry. The result is compared with experimental data.

Keywords: aerodynamic, wind power installations "CASCADE-3", modelling.

Вступ. Вітроенергетика в розвинених країнах відіграє значну роль як частина енергетичних систем, при цьому в деяких країнах вона є однією з головних складових альтернативної енергетики [1]. Відомо [2], що одною з найбільших перешкод для використання вітроенергетичних установок (ВЕУ) є їх висока вартість. Широкий спектр типів ВЕУ передбачає значні витрати ще на проектних етапах, а в питомих показниках це особливо помітно для малих ВЕУ, де відношення до вартості виготовлення дослідних зразків буде значним. Вартість проектних робіт можна знизити за рахунок використання чисельних розрахунків в системах, які цільовим чином призначені для розрахунків ВЕУ [3], так і в універсальних CFD програмах, таких як ANSYS CFX, ANSYS Fluent, Autodesk Simulation CFD, Comsol Multiphysics та ін.

Крім того, багато задач вітроенергетики представляють не тільки практичний, але і теоретичний інтерес. Наприклад, відомо про поділ гідро- і газодинамічних задач на зовнішню, внутрішню і змішану [4], при цьому змішана задача розуміється як рух рідини або газу всередині каналів складної форми з одночасним обтіканням тіл. Змішана задача зазвичай розглядається стосовно до руху рідини крізь, наприклад, зернистий шар твердого матеріалу, коли вона переміщується як всередині каналів між частинками, так і одночасно обтікає тверді частинки – ці умови спостерігаються в процесах фільтрування, масопередачі в апаратах з насадками і т. д. Однак умови для змішаної задачі спостерігаються і в галузі альтернативної енергетики при роботі заглиблених вільнопотокових осьових лопатевих турбін для малих і мікро ГЕС [5], при роботі ВЕУ з повітряно-відвідними пристроями (дифузорному, конфузорному, комбінованими) [1]. У таких пристроях основний потік розділяється на дві складові – внутрішню, що