

УДК 748.14:771.537

П. М. Єгоров

Науково-дослідний, проектно-конструкторський
та технологічний інститут мікрографії (НДІ мікрографії)
пров. Академіка Підгорного, 1/60, 61046 Харків, Україна

Нечітка система визначення якості цифрових зображень документів, які надано на мікрофільмування

Представлено спосіб оцінки якості цифрових зображень документів, які призначені для мікрофільмування. Показано, що використання нечітких систем дозволяє визначити взаємозв'язок між властивостями цифрового зображення та можливістю отримання на його основі кадру мікрофільму, який відповідає нормативній документації з мікрофільмування.

Ключові слова: мікрофільм, страховий фонд документації, цифрове зображення, цифрова обробка зображень, якість цифрового зображення, нечіткі системи, фотографічне відтворення.

Вступ

Останнім часом використання цифрових методів оброблення інформації стало одним із головних напрямів удосконалення існуючих і розроблення перспективних технологій. Зокрема, у державній системі страхового фонду документації (далі — СФД) України, де за їхньою допомогою надається можливість створення цифрових копій різноманітних документів і виготовлення на їхній основі мікрофільмів. Основою сучасних технологій створення мікрофільмів є використання СОМ-систем (computer output microfilm), які дозволяють експонувати фотоплівку з цифрового файлу зображення документа. Загальний огляд сучасних технологій і проблем зберігання документації у державній системі СФД наведено в [1]. Однією із суттєвих проблем є те, що оцінювання вихідних документів в електронному вигляді з метою визначення їхньої якості, тобто відповідності вимогам нормативної документації щодо створення мікрофільму, відбувається на основі суб'єктивного висновку фахівців і потребує досвіду, витрат часу та пробних фотографічних кадрів. У підсумку це суттєво впливає на собівартість виготовлення мікрофільму.

Метою цієї роботи є розроблення автоматизованого способу визначення якості цифрових растрових напівтонових зображень документів текстової, конструкторської і технологічної документації (далі — цифрових зображень докумен-

тів), яка призначена для мікрофільмування. Актуальність вирішення цього завдання полягає у зменшенні собівартості виготовлення мікрофільмів.

Стан проблеми та визначення підходів до оцінювання якості цифрових зображень документів

Проведений аналіз нормативних документів і науково-технічної літератури з мікрофільмування [2–6] показав, що визначення якості цифрових зображень документів ототожнюється з визначенням якості технічних засобів їхнього створення та якості процесу оцифрування. Такий підхід, з точки зору виготовлення мікрофільмів, є недостатнім. Для мікрофільмування не менш важливим є те, що якість цифрових зображень документів визначається, насамперед, властивостями саме документа, з якого одержують електронну копію. Наприклад, цифрове зображення документа із згасаючим текстом має таку ж низьку контрастність, як і оригінал. Проблема якості власне цифрових зображень документів у літературі не розглядається.

У представленій роботі пропонується таке рішення поставленої проблеми.

Основу оцінювання якості напівтонових зображень складають підходи, які взято з цифрової обробки зображень [7–10]: підхід із визначенням ознак зображень, згідно з яким довільне зображення можна представити як сукупність формальних ознак, що одержана в результаті використання визначених математичних перетворень; підхід, згідно з яким довільний об'єкт може бути визначений за сукупністю його ознак та їхніх взаємозв'язків (системою ознак); підхід з використанням способів, які відносяться до розпізнавання образів у зображеннях і ґрунтуються на класифікації графічних об'єктів.

Визначальною особливістю вирішуваного завдання є те, що виконується класифікаційна оцінка не саме графічних образів, а якості відображення цих образів у зображенні кадру мікрофільму. Тобто, її можна трактувати як визначення складного змістовного поняття. Тому для визначення якості цифрових зображень документів обрано підходи нечітких систем, у межах яких розроблено методи відображення складних змістовних понять [11–17].

Основні поняття, на яких ґрунтуються нечіткі системи — нечітка множина та функція належності. Деяку нечітку множину A_Z можна визначити як сукупність двійок $\{z, M(z)\}$, де z — елементи множини Z , а $M(z)$ — функція належності, яка визначає ступінь належності елементів $z \in Z$ до множини A_Z :

$$A_Z = \{z, M(z) \mid z \in Z\}. \quad (1)$$

Це можна трактувати так: Z є об'єктом оцінювання, A_Z є нечіткою оцінкою відповідності елементів Z до визначеної змістової ознаки.

Головні для цієї роботи властивості функції належності такі. Функція належності є безперервною в області визначення. Область значень функції належності розташована в інтервалі $0 \leq M(z) \leq 1$. Функція належності визначається як кількісне оцінювання властивостей аналізованого об'єкта. Для цього, по-перше, визначаються межі інтервалів інтересу в області визначення функції належності, по-друге — математичні функції, за якими обчислюються значення в межах кожного з інтервалів.

У межах нечіткого підходу конкретні значення в межах інтервалів можна визначати за об'єктивною оцінкою, наприклад, за результатами досліджень. Але надважливим є те, що визначення функції належності можливе за суб'єктивною оцінкою, наприклад, за експертною, або на підставі деяких інтуїтивних припущень. Перевага такого підходу полягає в тому, що надається можливість оцінювання в умовах, коли аналізований об'єкт необхідно оцінити за властивостями, які не придатні до безпосереднього вимірювання. Наприклад, поняття краси [15], або, як у цьому випадку, якості.

Дотепний приклад побудови функції належності наведено в [16]. Задача: чи є п'ятниця вихідним днем. З точки зору бухгалтерського обліку — ні. Але за суб'єктивною оцінкою багатьох людей — деякою мірою це можливо. Для вирішення задачі необхідно надати кожному дню тижня ступінь відповідності до поняття «вихідний». На рис. 1 наведено приклад побудови такої функції належності.

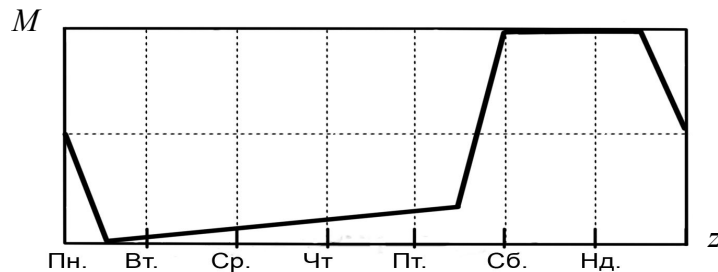


Рис. 1. Приклад побудови функції належності

Практичне використання нечітких множин засноване на побудові системи нечіткого логічного виведення. Існує доволі багато різних підходів до проектування систем нечіткого виведення. Крім того, розробка нечітких систем має адаптивний характер, і рішення про конкретну форму (наприклад, схему) логічного виведення приймається розробником залежно від вирішуваної задачі. Тому представити загальну схему нечіткого виведення немає можливості. Але в більшості випадків можна виділити декілька загальних етапів. Приклад можливої схеми, на основі популярного методу нечіткого виведення Мамдані [17], наведено на рис. 2.

На рис. 2 позначення мають такий зміст:

Input — вхід нечіткого виведення;

q_1, q_2 — чіткі змінні на вході;

μ_1, μ_2, μ_3 — вхідні функцій належності;

If – Then Rule₁, If – Then Rule₂, If – Then Rule₃ — продукційні правила нечіткого логічного виведення;

μ'_1, μ'_2, μ'_3 — вихідні функцій належності, відповідні до продукційних правил нечіткого логічного виведення;

CM — правила виведення нечіткої композиції (метод композиції);

Output — вихід нечіткого виведення.

У цьому прикладі на вхід *Input* надано вектор двох вхідних змінних (q_1, q_2). Вхідними змінними виступають чіткі числові значення довільних за змістом величин. У випадку цифрового нечіткого регулятора це можуть бути, наприклад, деякі вимірювані фізичні величини об'єкта управління: поточні координати, швид-

кість, прискорення тощо. У випадку експертної системи прогнозування економічної діяльності це можуть бути рейтинги економічних показників торговельних фірм, показники біржових індексів цінних паперів та ін.

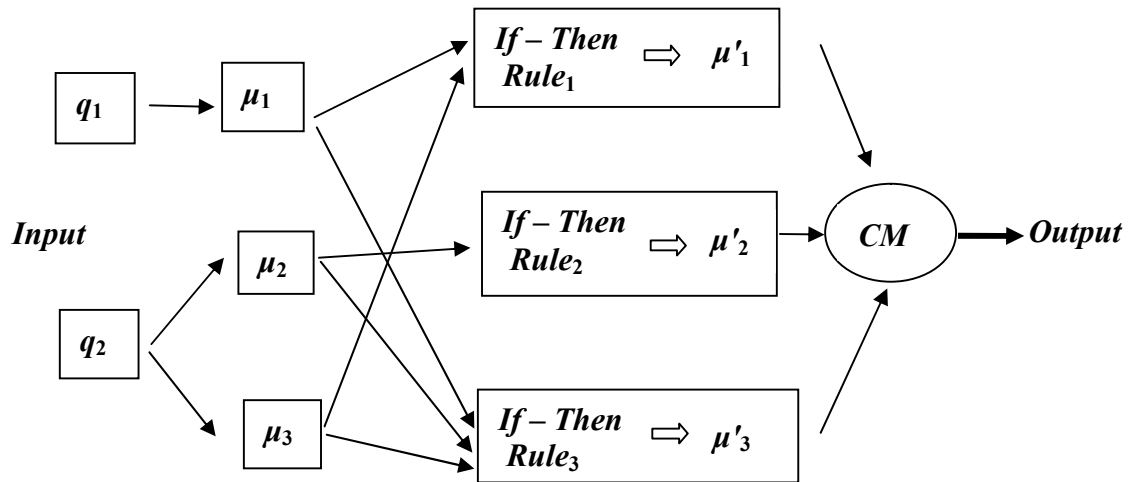


Рис. 2. Приклад можливої схеми нечіткого виведення

Перший етап нечіткого виведення — фаззифікація або визначення ступеня належності даних на вході до деякої сукупності нечітких множин. У цьому прикладі μ_1, μ_2, μ_3 — це входні функції належності, згідно з якими здійснюється фаззифікація входніх змінних. Поточні фаззифіковані вихідні дані набувають значень: $\mu_1 = \mu_1(q_1), \mu_2 = \mu_2(q_2), \mu_3 = \mu_3(q_2)$. Кожне з цих значень визначає ступінь належності до деякої нечіткої множини. Кожній нечіткій множині зіставлено визначене змістовне поняття (лінгвістична змінна) входньої класифікації, наприклад, «менш швидкий», «більш швидкий», «значно швидший» тощо.

Наступний етап — нечітке логічне виведення, або одержання нечітких змінних з використанням фаззифікованих величин. У наведеному прикладі — на основі нечітких продукційних правил виведення. Записи *If – Then Rule* є позначеннями деякого набору продукційних правил нечіткого логічного виведення. Основою такого запису є аналогія з правилами чіткої логічної імплікації з використанням конструкції «якщо — то».

Приклад дії логічного продукційного правила логічного виведення наведено для правила *If – Then Rule*₃. Нехай μ_1, μ_2, μ_3 є значеннями нечітких змінних, і продукційне правило має такий вигляд:

$$\text{If}(\mu_1 \text{ AND } (\mu_2 \text{ OR } (\mu_3))) \text{ Then}(\mu'_3), \quad (2)$$

де *AND* — операція нечіткої логічної кон'юнкції; *OR* — операція нечіткої логічної диз'юнкції.

Тоді продукційне правило відповідає такій послідовності перетворень: виконати операцію нечіткої логічної кон'юнкції над операндами (μ_1, μ_2) ; виконати операцію нечіткої логічної диз'юнкції над результатом кон'юнкції та μ_3 ; визначи-

ти результат продукційного правила як значення вихідної функції належності μ'_3 від результату диз'юнкції.

Відзначимо, що вихідні функції належності μ'_1, μ'_2, μ'_3 визначають лінгвістичні змінні вихідної класифікації цього етапу, наприклад «посилити», «послабити», «значно послабити» тощо.

Операції нечітких кон'юнкції і диз'юнкції у більшості випадків використання нечітких систем відповідають визначенню засновника цього напрямку — Л. Заде [11–13]: кон'юнкції відповідає мінімальне значення вхідних операндів, диз'юнкції відповідає максимальне значення вхідних операндів. На практиці розроблено значну кількість модифікацій цих логічних операцій [14, 15, 17], тому правила, за якими вони здійснюються в конкретному випадку, визначаються окремо.

Наступний етап нечіткого виведення — це виведення на основі правил композиції (позначення CM на рис. 2) — має такий запис:

$$Output = CM(\mu'_1, \mu'_2, \mu'_3), \quad (3)$$

де CM — метод композиції.

Метод композиції є деякою сукупністю правил, за використання яких відбувається операція композиції. На відміну від продукційних правил виведення, правила композиції не обов'язково матимуть характер логічного виведення. Зокрема, можна виконати композицію за таким правилом: вихід дорівнює лінгвістичній змінній, яка має найбільше значення, наприклад «ім'я μ'_3 — посилити». Такий підхід має важливе значення для цієї роботи.

Останній етап — етап дефазифікації, тобто одержання на виході нечіткого виведення чіткої числової оцінки. Необхідно відмітити, що цей етап не обов'язковий. Наприклад, виведення можна припинити на етапі визначення лінгвістичної змінної.

У разі виконання дефазифікація може бути реалізована значною кількістю способів, конкретний спосіб обирається залежно від вирішуваної задачі. Тоді правила композиції подано у вигляді способу обчислення. Наприклад, одержати на виході нечіткого виведення чітку числову величину можна за допомогою так званого способу центра мас. Нехай кожній із числових оцінок μ'_1, μ'_2, μ'_3 , які одержано на виході продукційних правил, відповідає маса матеріальної точки. Матеріальні точки розташовані на прямій з деякими відстанями одна від одної (наприклад, однаковими). Значення чіткої оцінки визначається як рішення відомої з курсу фізики задачі визначення центра мас системи матеріальних точок. Відзначимо, що спосіб центра мас має поширене використання на практиці.

Практичного значення система нечіткого виведення набуває лише тоді, коли вихідна реакція розробленої схеми є адекватною до цілей її побудови. Але під час проектування визначити точно функції належності, особливо у разі використання суб'єктивного підходу до їхнього створення, як правило, неможливо. Тому спроектовану систему піддають калібруванню, тобто практичному уточненню функцій належності. Сенс калібрування наочно можна представити так. Наведена схема нечіткого виведення має аналогію до нейронних мереж. Калібрування за такого підходу має аналогію до навчання мережі й виконується на основі спеціально сформованих даних для навчання. Наприклад, у межах цієї роботи для калібру-

вання було використано набір кадрів експериментального мікрофільму, який отримано з відібраних цифрових зображень, які замікрофільмовані у широкому діапазоні експозицій.

На підставі наведеного виділимо таку важливу властивість нечітких систем: можливість перетворення деяких вимірюваних величин на вході системи у змістовні поняття на виході. Ця характерна властивість дозволяє розробити нечітку систему, в якій результат одержано у вигляді змістовного поняття.

Розроблення нечіткої системи визначення якості цифрових зображень документів

Відповідно до зазначеного вище підходу до оцінювання якості на основі визначення об'єктів як системи ознак, необхідно визначити ознаки та ввести їхні метрики.

Вихідним положенням запропонованого способу є те, що довільне цифрове зображення документа можна представити як поєднання трьох основних складових: інформаційної, фонової та шумової.

Інформаційну складову визначено як області цифрового зображення документа, пікселі яких належать до графічних об'єктів (тобто до об'єктів, значущих для розпізнавання людиною змісту зображення).

Фонову складову визначено як області цифрового зображення документа, пікселі яких не належать до графічних об'єктів.

Шумову складову цифрового зображення документа визначено як випадковому компоненту змін яскравості пікселів фонової складової.

Для виокремлення інформаційної складової аналізоване зображення надається до бінаризації. Результатом є одержання бінаризованого зображення (відповідного до цифрового зображення документа), у якому пікселям, які належать до інформаційної складової, надано значення «логічна одиниця», а пікселям, що належать до фонової складової — «логічний нуль». Такий підхід надає можливості виконати обчислення ознак напівтонового зображення роздільно для кожної з його основних складових. Бінаризацію проведено за допомогою спеціально розробленого способу. Взагалі, бінаризацію цифрових зображень можна провести значним числом способів, а методам бінаризації різноманітних видів зображень присвячено безліч літератури, тому у цій статті немає можливості провести навіть їхній обмежений огляд. Тому опис розробленого способу заплановано як тему для окремої статті.

Доцільно зробити таке зауваження: в алгоритмі, за яким відбувається визначення якості напівтонового зображення, використовується так зване «вікно зміщення», тому викладене далі необхідно розуміти у зв'язку з цією технологією. Наприклад, вираз «аналізований фрагмент» визначає поточні пікселі у цьому вікні.

Метрикою фонової складової F обрано середнє значення яскравості пікселів у всьому аналізованому фрагменті, які не належать до інформаційної складової:

$$F = \frac{\sum_x \sum_y (I_{x,y}^{(F)})}{Q_F}, \quad (4)$$

де $I_{x,y}^{(F)}$ — значення яскравості пікселя фонові складові зображення з координатами (x, y) ; Q_F — кількість пікселів фонові складові зображення.

Метрикою інформаційної складові обрано величину сигналу $S_{x,y}$, визначену так:

$$S_{x,y} = F - I_{x,y}^{(V)}, \quad (5)$$

де $I_{x,y}^{(V)}$ — значення яскравості пікселя інформаційної складові зображення з координатами x, y .

Відмітимо, що $S_{x,y}$ визначається для кожного пікселя окремо.

Метрикою N величини шуму обрано середньоквадратичне відхилення у всьому аналізованому фрагменті:

$$N = \sqrt{\frac{\sum_x \sum_y (I_{x,y}^{(F)} - F)^2}{Q_F}}. \quad (6)$$

За основу оцінювання взято локальне відношення сигнал/шум (тобто просторовий розподіл відношення сигнал/шум) $SN_{x,y}$ та діапазон значень яскравості зображення DI відповідно до формул:

$$SN_{x,y} = \log_2\left(\frac{S_{x,y}}{N}\right), \quad (7)$$

$$DI = \log_2(I_{\max} - I_{\min}), \quad (8)$$

де I_{\max} — максимальне значення яскравості зображення; I_{\min} — мінімальне значення яскравості зображення.

На рис. 3 наведено розроблену схему нечіткого виведення.

На рисунку позначення мають такий зміст:

q_1, q_2, q_3 — вхідні чіткі змінні;

$\alpha q_1 + \beta q_2 + c = v$ — формула фаззифікації;

v, ω — проміжні нечіткі змінні;

CM_1, CM_2 — правила нечіткої композиції відповідно до гілок виведення.

Верхня гілка є відповідною до входу $Input_1$ та складається з трьох етапів.

Перший етап — це фаззифікація вхідних даних q_1 та q_2 ($SN_{x,y}$ та DI відповідно) та визначення нечіткої змінної v . Перетворення виконано аналогічно до логічної імплікації метода Сугено [17] (нечітка змінна одержується як лінійна функція двох аргументів):

$$v_{x,y} = \begin{cases} 0 & | SN_{x,y} > DI, \\ 0,91 \times (SN_{x,y} + 0,1 \times DI) & | SN_{x,y} \leq DI. \end{cases} \quad (9)$$

На другому етапі нечітка змінна v відображається на чотири нечіткі множини за допомогою чотирьох функцій належності $\mu_{11}, \mu_{12}, \mu_{13}, \mu_{14}$ відповідно до таких

лінгвістичних змінних: «якість хороша», «якість задовільна», «якість незадовільна» та «інформації немає». Кінцеву конфігурацію функцій належності μ_{11} , μ_{12} , μ_{13} , μ_{14} після калібрування нечіткої системи наведено на рис. 4.

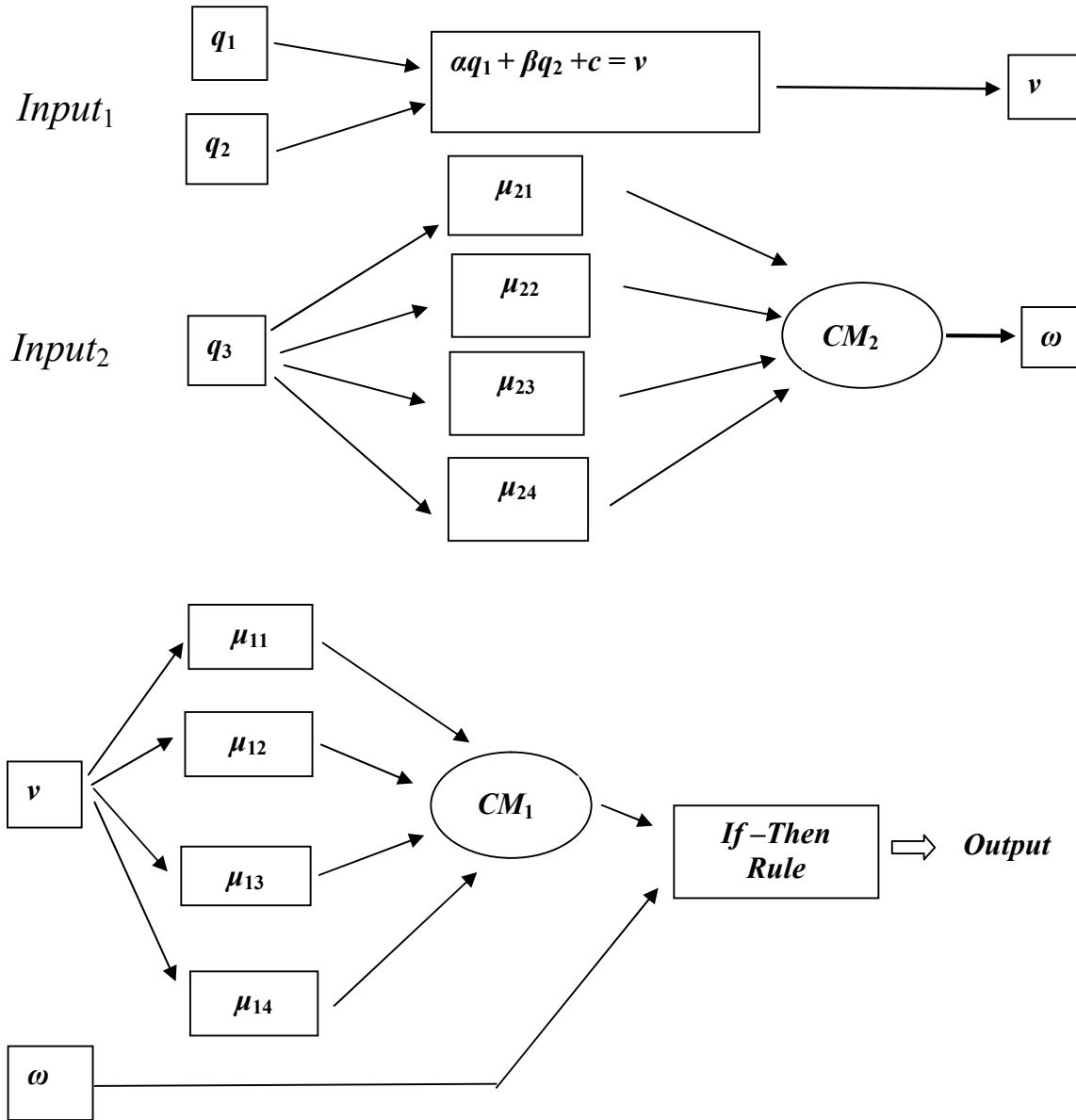


Рис. 3. Схема розробленого способу нечіткого виведення

На рис. 4 h позначає загальну для функцій належності вихідну проміжну нечітку змінну.

На третьому етапі композиції CM_1 спочатку обчислюються рейтинги лінгвістичних змінних. Рейтинг визначено як потужність відповідної нечіткої множини у всьому аналізованому фрагменті. Наприклад:

$$rate_1 = \sum_{m,n} \mu_{11}(v_{x,y}), \quad (10)$$

де $v_{x,y}$ — ступінь належності пікселя з координатами x, y інформаційної складової напівтонового зображення до нечіткої множини «якість хороша».

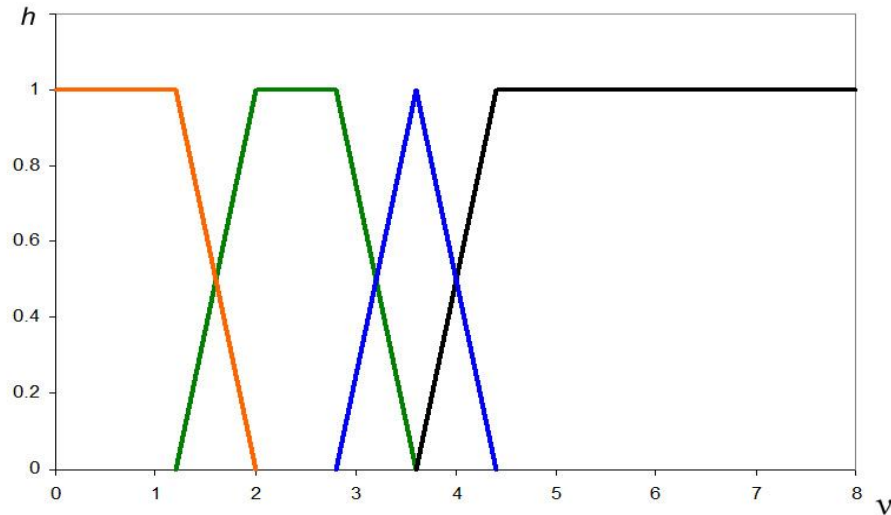


Рис. 4. Конфігурація функцій належності після калібрування

Результат SM_1 визначається за правилом:

$$Rate = \max(\{rate_1, rate_2, rate_3, rate_4\}), \quad (11)$$

де $Rate$ — лінгвістична змінна з найбільшою потужністю відповідної нечіткої множини.

Для врахування специфіки процесу фотографічного відтворення введено гілку нечіткого виведення, відповідну входу $Input_2$ на рис. 3. Справа в тому, що для мікрофільмування використовуються чорно-білі фотографічні плівки з наджорсткою характеристичною кривою [18], тому процес фотографічного відтворення має суттєву нелінійність.

Необхідно відмітити, що розгляд процесів фотографічного відображення виходить за межі даної статті, але суттєвим є таке. Основою врахування нелінійності обрано показник, названий діапазоном інформаційної складової, та який дорівнює максимальній величині сигналу $S_{x,y}$ для всього аналізованого фрагмента. Причиною є те, що співвідношення значень цього показника та діапазонів лінійних і нелінійних частин характеристичної кривої фотографічної плівки [18] визначає можливість покращення або погіршення якості вихідного напівтонового зображення в кадрі мікрофільму. У результаті досліджень виділено три чіткі інтервали для оцінювання впливу величини сигналу на якість зображення у мікрофільмі за критеріями нормативів з оптичної густини фону та вуалі. Відповідно до визначених інтервалів визначено такі функції належності до лінгвістичних змінних якості ци-

фрових зображень документів: «якість хороша» (функція належності μ_{21}); «якість задовільна» (функція належності μ_{22}); «якість незадовільна» (функція належності μ_{23}).

Композиція SM_2 повертає тільки ту змінну, яка можлива для визначення. Визначені лінгвістичні змінні змістовно визначають максимальний клас якості напівтонових зображень. Це треба розуміти так, що незалежно від того, який клас якості визначено за виведенням гілки $Input_1$, він не може перевищувати максимальний. Тому продукційні правила (правила *If – Then Rule* на рис. 3) виконано за аналогією до таблиці логічної істинності.

ω / <i>Rate</i>	хороша	задовільна	незадовільна
хороша	хороша	задовільна	незадовільна
задовільна	задовільна	незадовільна	–
незадовільна	незадовільна	–	–
інформації немає	–	–	–

Позначення в таблиці мають такий зміст: ω — максимальна якість зображення, визначена за гілкою нечіткого виведення $Input_2$ (рис. 3); *Rate* — якість зображення, визначена за гілкою нечіткого виведення $Input_1$ (рис. 3).

Риска в таблиці позначає, що оцінку для напівтонового зображення не може бути виконано, тобто це є еквівалентним відсутності інформації.

У результаті використання нечіткої системи зображенню надається дві оцінки. Перша оцінка надається кожному пікселю окремо і змістовно відображає локальний ступінь якості цифрового зображення документа. Друга оцінка надається всьому зображенню у цілому та відповідає лінгвістичній змінній, до якої належить більшість пікселів інформаційної складової.

Для практичного відпрацювання нечіткої системи розроблено наочну кольірну візуалізацію оцінки локальної якості: пікселі з оцінкою «якість хороша» забарвлені в чорний колір; з оцінкою «якість задовільна» — у синій колір; з оцінкою «якість незадовільна» — у зелений колір; з оцінкою «інформації немає» — у жовто-коричневий колір. Має сенс навести приклади тлумачення щодо відповідності відображення локальної оцінки якості. Якщо пікселі графічних деталей забарвлені чорним, то у кадрі мікрофільму відображення їхньої форми точно відповідатиме формі у вихідному цифровому зображенні, а їхня оптична густина відповідатиме вимогам чинної нормативної документації [19] (далі — НД). У свою чергу, графічні деталі, пікселі яких забарвлені зеленим, у кадрі мікрофільму зазнають пошкодження: їхній контраст буде або значно знижено, або вони зовсім зникнуть, оптична густина не відповідатиме вимогам чинної НД. Унаслідок цього відбудеться зниження такого показника чинної НД як читаність. Читаність — це суб'єктивний показник, який характеризує можливість однозначної інтерпретації людиною графічних позначень у мікрофільмі.

Для практичного використання було виконано калібрування функцій належності та тестування системи у цілому за експериментальними даними. На жаль,

колірні можливості друку не надають змоги відобразити безпосередньо на сторінках результати оброблення цифрових зображень документів, тому приклади оцінювання наведено на http://micrography.gov.ua/dept11/Article_Egorov.html

Результати аналізу правильності розробленого способу такі: оцінювання відповідне до можливості одержання якісного фотографічного відображення згідно з чинною НД за критеріями оптичної густини фону та вуалі, а також відповідне до ступеня можливих викривлень читаності документа в кадрі мікрофільму.

Висновки

Запропоновано спосіб для оцінювання якості цифрових зображень документів, які призначені для мікрофільмування. Спосіб ґрунтується на використанні нечіткої системи. Нечітку систему виконано з урахуванням специфіки процесу фотографічного відтворення мікрофільму. Результати тестування розробленого способу показали, що використання нечітких систем дозволяє провести класифікацію ознак цифрового зображення (у цьому випадку співвідношення сигнал/шум, діапазон яскравості та діапазон інформаційної складової), яка адекватно характеризує його відображення у кадрах мікрофільму за критеріями читаності та оптичної густини фону та вуалі.

Практична значущість роботи полягає в тому, що розроблені алгоритми є основою для створення експертної системи з автоматизації операцій вхідного контролю цифрових зображень документів, які надано на мікрофільмування.

1. Подорожний В.І. Актуальні проблеми довгострокового зберігання документації у страховому фонді документації України. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2016. Т. 18. № 2. С. 53–60.
2. Гаврилов А.П., Клещарь С.Н., Данилова Т.Н., Завалишин П.Е. Современное состояние проблемы оценки качества сканирования бумажных документов в России и за рубежом. *СФД (Страховий фонд документації): наук.-вироб. журн.* 2011. № 1(10). С. 38–47.
3. ДСТУ ISO 12653:2007. Електронні зображення. Тест-оригінал для чорно-білого сканування офісних документів. Характеристики. Методи використання. Чинний від 2009–07–01. Київ: Держспоживстандарт України, 2012.
4. Тимиргалиев С.М., Черновалова Н.И., Баркова Е.В., Ларкин В.В., Котов В.В., Клещарь С.Н., Заславский Ю.И. Методика контроля качества сканирования бумажных документов: методическое пособие и техническое руководство. Москва: ДиМи-Центр, 2012. 59 с.
5. Костюкевич Н.Г. Опыт изготовления электронных копий документов в Национальной библиотеке Беларуси: подходы к сканированию различных типов документов, технические требования к сканированию. *СФД (Страховий фонд документації): наук.-вироб. журн.* 2011. № 1(10). С. 49–55.
6. Ларкин Е.В. Математическая модель аналого-цифрового преобразования. Оцифровка документов на бумажных носителях. Тула, 2011. 9 с.
7. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. Москва: Техносфера, 2006. 616 с.
8. Претт У. Цифровая обработка изображений. Москва: МИР, 1982. Т. 2. 790 с.
9. Методы компьютерной обработки изображений/под ред. В.А. Сойфера. 2-е изд., испр. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.

10. Журавель И.М. Краткий курс теории обработки изображений. URL: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php>
11. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. *Математика сегодня: Сборник статей*/пер. с англ. Москва: Знание, 1974. С. 5–49.
12. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений/пер. с англ. А.Н. Колмогоров, С.П. Новиков. Москва: Мир, 1976. 165 с.
13. Заде Л.А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных интеллектуальных систем/пер. с англ. И.З. Батыршина. *Новости Искусственного интеллекта*. 2001. № 2–3. С. 7–11.
14. Терано Т., Асаи К., Сугено М. Прикладные нечеткие системы. Москва: Мир, 1993. 366 с.
15. Макеева А.В. Основы нечеткой логики: учеб. пособ. для вузов. — Нижний Новгород: ВГИПУ, 2009. С. 59.
16. Foundations of fuzzy logic. URL: <http://www.mathworks.com/help/fuzzy/foundations-of-fuzzy-logic.html#FP59888>
17. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1>
18. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. Москва: МИР, 1978. 670 с.
19. Мікрофільм страхового фонду документації. Технічні умови: ТУ У 20.5-37552598-001:2012. [На заміну ТУ У 75.2-14321156-001–2004; чинні від 2012–08–17 до 2017–07–01]. Харків: ДП «Харк. регіональний наук.-вироб. центр стандартизації, метрології та сертифікації», 2012. 56 с. (Технічні умови України).

Надійшла до редакції 14.04.2016