

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

**Скаковська Алла Миколаївна**

**УДК 681.518**

**ФУНКЦІОНАЛЬНО-СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ  
РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ**

**Спеціальність 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Харків – 2009**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України і в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, професор **Соколов Олександр Юрійович**, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є.Жуковського «Харківський авіаційний інститут», завідувач кафедри інформатики.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор **Дмитрієнко Валерій Дмитрович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри обчислювальної техніки та програмування;

доктор технічних наук, професор **Машталір Володимир Петрович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, декан факультету комп'ютерних наук.

Захист відбудеться 25.02.2009 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.01 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м.Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м.Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розіслано 22.01.2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С.Ф.Чалий

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Зображення як носій інформації є джерелом первинних даних у численних напрямках людської діяльності: медицина, космічні, геологічні та біологічні дослідження, дефектоскопія. Тому оброблення та розпізнавання зображень є невід'ємною складовою частиною систем штучного інтелекту. Важливе значення в конструюванні технологій машинного сприйняття та інтерпретації зображень мають методи та алгоритми адаптивного розпізнавання зображень.

Одним із головних завдань, поставлених перед теорією та практикою штучного інтелекту, є моделювання функцій людського інтелекту. Сучасні алгоритми робототехнічних комплексів і штучних інтелектуальних систем орієнтовані на безпосереднє оброблення зорової інформації з фіксованим часом реагування. Але формування якісного зображення в електронно-оптичній системі та достовірність його розпізнавання значною мірою залежать від гостроти зору оператора, відбивної здатності об'єкта дослідження, атомного номера мішені, внутрішніх шумів датчиків, лінійних спотворень сигналу зображення, тимчасових флуктуацій освітленості, статистичної та психовізуальної надмірності інформації.

Значний внесок до створення науково-методологічних основ проектування таких систем зробили вітчизняні та зарубіжні вчені: О.Г.Івахненко, Є.П.Путятін, І.Б.Сіроджа, В.П.Машталір, В.І.Васильєв, Р.А.Воробель, В.В.Грицик, М.І.Шлезінгер, В.М.Крилов, А.С.Довбиш, Ю.І.Журавльов, В.О.Сойфер, Р.Дуда, Р.Гонзалес, П.Харт. Але існуючі методи розпізнавання зображень не дозволяють враховувати усіх факторів суб'єктивного управління такими системами, що є причиною високої ітеративності процесу навчання.

Отже, суттєвим недоліком існуючих штучних інтелектуальних систем розпізнавання є відсутність адаптивності до впливу суб'єктивних особливостей дослідження.

У зв'язку з вищевикладеним тема дисертації має важливе наукове і прикладне значення, оскільки вона спрямована на вирішення **актуальної наукової задачі** розробки нової функціонально-статистичної моделі та методів адаптивного розпізнавання зображень, що дозволяє підвищити ефективність розпізнавання електронно-оптичних зображень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт Національного аерокосмічного університету ім. М.Є.Жуковського "ХАІ" та Сумського державного університету в рамках науково-дослідних тем «Розробка засобів інформаційних технологій підтримки прийняття рішень для проектування елементів аерокосмічних систем» (ДР№0106U001036), «Математичні моделі, алгоритми та засоби інформаційної технології аналізу та синтезу інтелектуальних систем» (ДР № 0105U002825), «Розробка

методологічних засад, інформаційного та програмного забезпечення адаптивної системи керування дистанційним навчанням» (ДР № 63.02.02.06–08), у яких здобувач була виконавцем.

**Мета та задачі дослідження.** *Метою роботи є розробка нової функціонально-статистичної моделі та методів адаптивного розпізнавання зображень для підвищення ефективності розпізнавання чорно-білих електронно-оптичних зображень класу 2D за рахунок автоматизації ітераційних операцій настроювання.*

Відповідно до поставленої мети та розробленого підходу сформульовані такі *задачі дослідження*:

1. Аналіз інженерних моделей і методів розпізнавання та обґрунтування необхідності підвищення ефективності методів розпізнавання електронно-оптичних зображень.

2. Розробка функціонально-статистичної моделі розпізнавання зображень в електронно-оптичних системах.

3. Синтез методу адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень на основі розробленої функціонально-статистичної моделі.

4. Синтез методу автоматичної класифікації чорно-білих зображень для самонастроювання електронно-оптичних систем розпізнавання із урахуванням досвіду експерта.

5. Імітаційне моделювання розроблених моделей та методу адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень, а також вирішення за їх допомогою реальних практичних задач.

*Об'єкт дослідження* – процеси розпізнавання чорно-білих зображень класу 2D в електронно-оптичних системах.

*Предмет дослідження* – методи та моделі розпізнавання електронно-оптичних зображень.

*Методи досліджень*: методи системного аналізу з метою побудови адекватних дійсним процесам математичних моделей; методи та моделі розпізнавання образів для побудови оптимальних контейнерів класів розпізнавання; методи теорії ймовірностей і математичної статистики для оцінки випадкових величин і перевірки статистичних гіпотез; методи та характеристики теорії інформації для оцінки функціональної ефективності системи розпізнавання зображень; об'єктно орієнтована методологія проектування складних систем та програмного забезпечення.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше розроблено функціонально-статистичну модель розпізнавання електронно-оптичних зображень, яка ґрунтується на оцінці інформаційної здатності електронно-оптичної системи розпізнавання і реалізується шляхом максимізації інформаційної міри різноманітності функціональних станів такої системи на кожному кроці навчання, що дозволяє підвищити ефективність класифікаційного розпізнавання зображень шляхом настроювання системи без участі людини-оператора.

2. Удосконалено метод адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень, який на відміну від існуючих передбачає адаптацію вхідного математичного опису досліджуваного об'єкта та аналіз технічного стану електронно-оптичної системи розпізнавання зображень. Це дозволило забезпечити класифікацію функціональних станів системи розпізнавання з достатньо високою точністю за нечіткою навчальною матрицею.

3. Набув подальшого розвитку метод автоматичної класифікації чорно-білих зображень класу 2D для самонастроювання електронно-оптичних систем, що на відміну від існуючих полягає в побудові метричного простору за класами матриць яскравостей досліджуваного об'єкта для оцінки міри різноманітності функціональних станів системи розпізнавання. Це дозволяє сформулювати керуючі впливи на функціональну ефективність електронно-оптичної системи розпізнавання із урахуванням досвіду експерта.

**Практичне значення одержаних результатів.** Одержані автором теоретичні результати доведені до конкретних інженерних методик, алгоритмів, винаходу і пакетів прикладних програм, що підтверджується актом впровадження на підприємстві ВАТ «Selmi» (м. Суми, протокол №3 від 30.03.2007) і Деклараційним патентом на винахід №2003065957; 64570A, МКІ Н-01J37/21 від 26.06.2003 «Спосіб автоматичного фокусування електронного мікроскопа за зображенням досліджуваного об'єкта».

Практичний ефект дисертаційного дослідження виявився у покращанні характеру і умов праці дослідників та науковців, що аналізують отримані в електронно-оптичних системах зображення за рахунок автоматизації ітераційних операцій настроювання системи, які забирають основний час дослідження. Використання наведених результатів дозволило розв'язати задачу модернізації та інтелектуалізації електронно-оптичних систем розпізнавання зображень, що сприяло розширенню їх функціональних можливостей і підвищенню їх конкурентно-спроможності на світовому ринку.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. У працях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать: у праці [1] – розробка функціонально-статистичної моделі розпізнавання електронно-оптичного зображення; [2] – імітаційне моделювання процесу розпізнавання електронно-оптичних зображень та програмна реалізація визначення нормованого поля допусків на управляючий параметр настроювання електронного мікроскопа; [3] доведення твердження 2 та обґрунтування формул (4–6); [4] – алгоритм визначення мінімального обсягу репрезентативної навчальної вибірки та його програмна реалізація в електронно-оптичній системі; [5] – алгоритм обчислення критерію оптимізації параметрів навчання електронно-оптичної системи розпізнавання; [7] – вдосконалення методу адаптивного розпізнавання зображень, що дозволило розпізнавати електронно-оптичні зображення без участі людини-оператора; [8] – імітаційне моделювання та програмна реалізація розпізнавання зображення, отриманого в електронно-оптичній

системі; [9] – спосіб підвищення оперативності розпізнавання зображення для класифікаційної автонастройки електронно-оптичної системи розпізнавання; [10] – програмна реалізація способу автоматичного фокусування електронного мікроскопа за зображенням досліджуваного об'єкта; [11] – розробка та реалізація алгоритму розпізнавання електроннограм в електронній мікроскопії; [15] – імітаційне моделювання методу адаптивного розпізнавання; [17,18] – об'єктно-орієнтована реалізація алгоритму навчання та екзамєну для електронно-оптичної системи розпізнавання; [20] – розробка теоретико-множинної моделі розпізнавання електронно-оптичних зображень; [21] – формування вхідного математичного опису, алгоритм та програмна реалізація навчання електронно-оптичної системи розпізнавання.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на 12 міжнародних, всеукраїнських і всесоюзних конференціях: Науково-технічній конференції викладачів, співробітників і студентів СумДУ (Суми, 2000, 2001); V Всеукраїнській міжнародній конференції з оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів «Укробраз-2000» (Київ, 2000); VI Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах «КУСС-2001» (Вінниця, 2001); Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика-2001» (Одеса, 2001); Міжнародній науковій конференції «Сучасні методи кодування в електронних системах» (Суми, 2002, 2005); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми гуманізації та гармонізації управління» (Харків, 2002, 2005, 2006); Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика-2007» (Севастополь, 2007); Міжнародній конференції “Інтелектуальні системи в промисловості і освіті – 2007” (Суми, 2007).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 22 праці: 9 статей у спеціалізованих наукових журналах і збірниках наукових праць згідно з переліком ВАКу України (із них 1 – без співавторів), 12 матеріалів і тез доповідей конференцій, 1 винахід.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатка. Повний обсяг дисертації становить 156 сторінок (у тому числі 138 сторінок основного тексту), 39 рисунків, 13 таблиць, додаток на 2 сторінках, список використаних джерел, що містить 154 найменування та займає 16 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, розкрито наукову та практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про публікації та апробацію роботи.

У **першому розділі** здійснено огляд вітчизняної та зарубіжної літератури з питань, пов'язаних з темою дисертаційної роботи. Досліджено сучасний

стан розвитку людино-машинних електронно-оптичних систем розпізнавання, які застосовуються в задачах автоматичної класифікації, вибору інформативного набору ознак при розпізнаванні, приведені початкових даних до вигляду, зручного для розпізнавання, динамічного розпізнавання та класифікації, а також у задачах прогнозування.

Ітеративний характер перелічених задач потребує впровадження в промисловість адаптивних методів розпізнавання, що дозволять підвищити ефективність розпізнавання електронно-оптичних зображень за рахунок істотного зменшення кількості випробувань та урахування суб'єктивних особливостей дослідження.

Проаналізовано моделі представлення знань у задачах розпізнавання зображень, за умов апріорної невизначеності. Виділено переваги функціонально-статистичних моделей у вигляді діаграм відображень множин, що дозволяють на етапі системного аналізу не тільки встановлювати відношення між елементами інформаційного забезпечення та інформаційними потоками оброблення інформації, але і полегшують розроблення структур алгоритмів різних режимів функціонування адаптивних систем, що навчаються.

На підставі проведеного аналізу зроблено висновок про доцільність розробки системи, що поєднає можливість адаптації до конкретних типів досліджуваних зразків, робочих умов настроювання електронно-оптичної системи, здатність розпізнавати зображення оптимальної якості (максимально різке) і оцінювати поточний функціональний стан електронно-оптичної системи з метою його корекції, але не виключає з контуру участі людини-оператора.

У кінці розділу наведено обґрунтування вибору мети дисертаційної роботи і сформульовані задачі дослідження.

**Другий розділ** роботи присвячено побудові функціонально-статистичної моделі розпізнавання електронно-оптичних зображень. Запропонована модель відображує детерміновані і статистичні властивості, що визначають зміну характеристик і параметрів об'єкта. Отже, обов'язковою вимогою, пропонованою до такої моделі, є виконання діалектичного положення про співвідношення між детермінізмом і випадковістю, у силу якого підтвердженням правильності ймовірнісної моделі є її перехід за певних умов у детерміновану модель.

Функціонально-статистична модель (1) включає, як обов'язкову складову частину, вхідний математичний опис поданий у вигляді декартового добутку

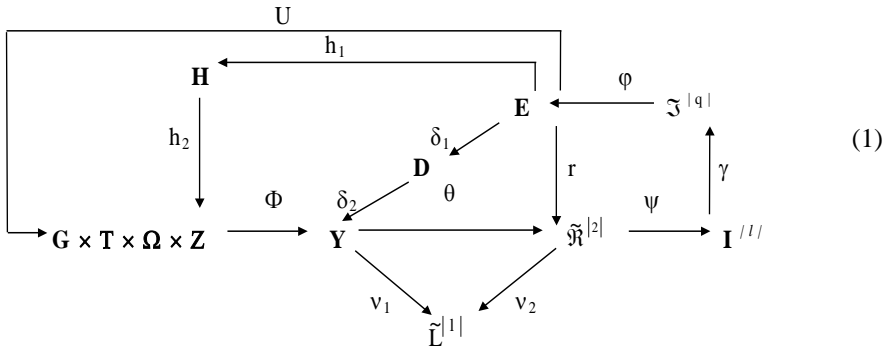
$$W = G \times T \times \Psi \times Z,$$

де  $G$  – множина факторів, що впливають на об'єкт розпізнавання;

$T$  – множина моментів часу зняття інформації;

$\Psi$  – простір ознак розпізнавання;

$Z$  – простір можливих станів системи.



Тут оператор  $\theta: Y \rightarrow \tilde{\mathfrak{R}}^{|2|}$  розбиває простір ознак на класи розпізнавання, а оператор класифікації  $\psi: \tilde{\mathfrak{R}}^{|2|} \rightarrow I^{|l|}$  перевіряє основну статистичну гіпотезу про належність реалізацій  $\{x_m^{(j)} | j = \overline{1, n}\}$  нечіткому класу  $X_m^o$  ( $l$  – кількість статистичних гіпотез). Оператор  $\gamma: I^{|l|} \rightarrow \mathfrak{S}^{|q|}$  шляхом оцінки статистичних гіпотез формує множину точнісних характеристик  $\mathfrak{S}^{|q|}$ , де  $q = l^2$  – кількість точнісних характеристик. Оператор  $\phi: \mathfrak{S}^{|q|} \rightarrow E$  обчислює множину значень інформаційного критерію, який є функціоналом точнісних характеристик. Контур оптимізації геометричних параметрів нечіткого розбиття  $\tilde{\mathfrak{R}}^{|2|}$  шляхом пошуку максимуму критерію функціональної ефективності навчання розпізнаванню реалізацій класу  $X_m^o$  замикається оператором  $r: E \rightarrow \tilde{\mathfrak{R}}^{|2|}$ . Оператори  $v_1: Y \rightarrow \tilde{\mathfrak{L}}^{|1|}$  і  $v_2: \tilde{\mathfrak{R}}^{|2|} \rightarrow \tilde{\mathfrak{L}}^{|1|}$  є відповідно операторами апріорної й апостеріорної побудови покриття  $\tilde{\mathfrak{L}}^{|M|}$ , які утворюють комутативне кільце.

Принциповою відмінністю запропонованої функціонально-статистичної моделі розпізнавання електронно-оптичних зображень від відомих моделей автоматичної класифікації є ітераційна оптимізація процесу навчання за інформаційним критерієм функціональної ефективності з метою його наближення до глобального максимуму.

Розроблено і досліджено критерії та алгоритми оцінки функціональної ефективності процесу навчання системи розпізнавання зображень і визначено умови його проведення. Запропоновано робочу модифікацію ентропійного інформаційного критерію функціональної ефективності навчання адаптивної системи для двохальтернативного рішення при рівномірних гіпотезах, яка має вигляд



$$E_m^{(k)} = 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha^{(k)}}{\alpha^{(k)} + D_2^{(k)}} \log_2 \frac{\alpha^{(k)}}{\alpha^{(k)} + D_2^{(k)}} + \frac{D_1^{(k)}}{D_1^{(k)} + \beta^{(k)}} \log_2 \frac{D_1^{(k)}}{D_1^{(k)} + \beta^{(k)}} + \frac{\beta^{(k)}}{D_1^{(k)} + \beta^{(k)}} \log_2 \frac{\beta^{(k)}}{D_1^{(k)} + \beta^{(k)}} + \frac{D_2^{(k)}}{\alpha^{(k)} + D_2^{(k)}} \log_2 \frac{D_2^{(k)}}{\alpha^{(k)} + D_2^{(k)}} \right), \quad (2)$$

де  $D_1^{(k)}, D_2^{(k)}, \alpha^{(k)}, \beta^{(k)}$  – точнісні характеристики процесу навчання: перша та друга достовірності, помилки першого та другого роду відповідно, оцінки яких отримано на  $k$ -му кроці навчання.

$$D_1^{(k)} = \frac{K_1^{(k)}}{n_{\min}}; \quad \alpha^{(k)} = \frac{K_2^{(k)}}{n_{\min}}; \quad \beta^{(k)} = \frac{K_3^{(k)}}{n_{\min}}; \quad D_2^{(k)} = \frac{K_4^{(k)}}{n_{\min}},$$

де  $K_1^{(k)}, K_2^{(k)}$  – кількість подій, що означають відповідно належність та неналежність реалізацій образу контейнера  $K_{1,k}^o$ , якщо дійсно  $\{x_1^{(j)}\} \in X_1^o$ ;

$K_3^{(k)}, K_4^{(k)}$  – кількість подій, які означають відповідно належність і неналежність реалізацій контейнера  $K_{1,k}^o$ , якщо вони насправді належать класу  $X_2^o$ ;

$n_{\min}$  – мінімальний обсяг репрезентативної навчальної вибірки.

Одержані у процесі навчання оптимальні параметри настроювання системи розпізнавання зображень на базі гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання дозволяють використовувати для дефазифікації величин на екзамені функцію належності:

$$\mu_m = \left[ 1 - \frac{d(x_m^* \oplus x^{(j)})}{d_m^*} \right]^+, \quad (3)$$

де  $[\dots]^+$  – позитивна частина функції;

$x^{(j)}$  – реалізація, що розпізнається;

$\oplus$  – логічна операція нерівнозначності.

*Твердження 1.* Нехай існує нечітке розбиття, нечіткі класи якого мають контейнери у вигляді гіперсфер і для яких задано відношення схожості  $R$ , тоді функція (3) є функцією належності.

Але в задачах класифікації зображень з додатковим налаштуванням електронно-оптичної системи (наприклад, із множини еталонних зображень потрібно вибрати одне) виникає потреба збільшити потужність алфавіту класів розпізнавання. Це призводить до зменшення достовірності розпізнавання через збільшення ступеня перетину класів.

Запропоновані функціонально-статистична модель розпізнавання зображень (1) та критерій функціональної ефективності навчання (2) системи розпізнавання дозволяють перейти у **третьому розділі** до удосконалення методу адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень і подальшого розвитку методу автоматичної класифікації для самонастроювання електронно-оптичних систем розпізнавання.

На рис.1 запропоновано загальну схему методу адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень.

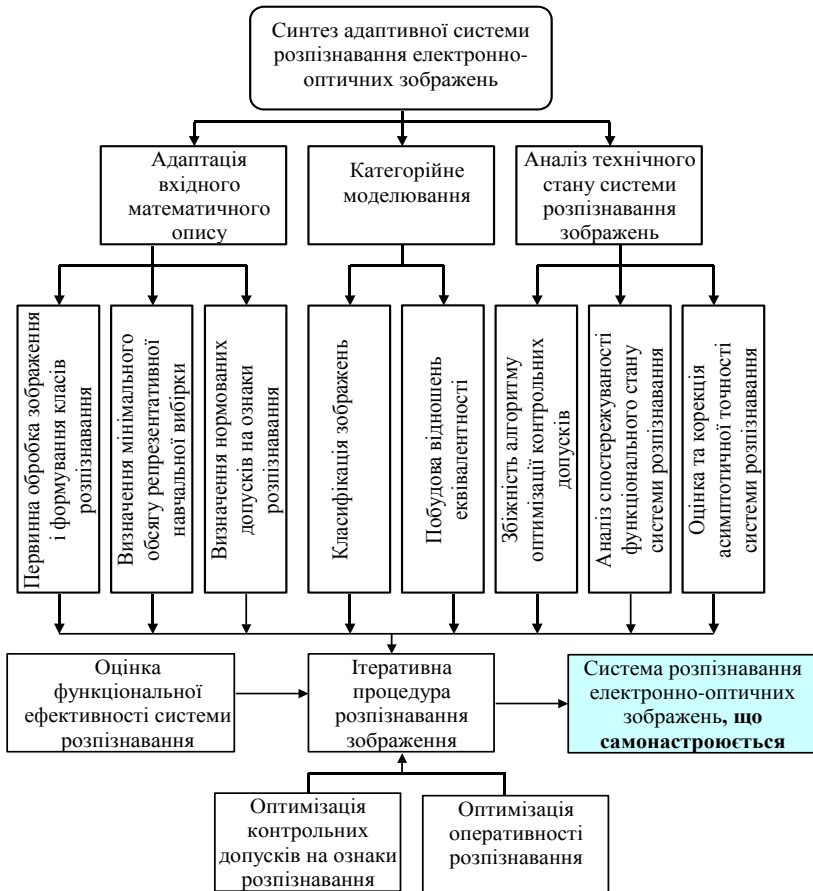


Рис. 1. Структурна схема методу адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень

На прикладі оптичної людино-машинної системи розпізнавання – растрового електронного мікроскопа РЕМ-103-1 досліджено визначення

системи нормованих допусків, що задає область відповідної системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання, за умови збереження випадковості координат векторів-реалізацій образу і недопущення збігу еталонних векторів-реалізацій.

Визначення нижнього нормованого допуску  $A_H$  відбувається за правилом

$$A_H = d_1^* \cdot \chi, \quad \text{де} \quad \chi = \frac{I_{Л1} - I_{Л2}}{d(x_1 \oplus x_2)}.$$

Тут  $I_{Л1}, I_{Л2}$  – значення управляючого параметра системи – струму об'єктивної лінзи, які визначають зображення класів  $X_1^0$  і  $X_2^0$  відповідно;  $d(x_1 \oplus x_2)$  – міжцентрова кодова відстань. Аналогічно здійснюється визначення верхнього нормованого допуску  $A_B$ .

У роботі досліджено проблему спостережуваності процесу розпізнавання в електронно-оптичній системі, вирішення якої дозволяє розв'язати задачу оцінки інформативності ознак розпізнавання безпосередньо у процесі навчання. Для двохальтернативного навчання при рівномірних гіпотезах отримано необхідні та достатні умови спостережуваності  $m$ -го функціонального стану адаптивної системи розпізнавання:

$$\frac{D_1}{\beta + D_1} > \frac{1}{2}; \quad \frac{D_2}{\alpha + D_2} > \frac{1}{2}; \quad \left( \frac{D_1}{\beta + D_1} + \frac{D_2}{\alpha + D_2} \right) > \left( \frac{\beta}{\beta + D_1} + \frac{\alpha}{\alpha + D_2} \right). \quad (4)$$

Відсутність у функції інформаційного критерію функціональної ефективності взаємооднозначності потребує знання робочої області її визначення. Обмеження такої області як зліва, так і справа задаються такими умовами:

$$P \left\{ \frac{n_i}{n} - \varepsilon_Q \leq p_i \leq \frac{n_i}{n} + \varepsilon_Q \right\} = 1 - Q, \quad (5)$$

де  $Q$  – рівень значущості. Тут статистична похибка  $\varepsilon_Q = |p_i - \tilde{p}_i|$ , де  $\tilde{p}_i = n_i/n$  – емпірична частота знаходження значення  $i$ -ї ознаки в своєму контрольному полі допусків, визначається за формулою

$$\varepsilon_Q = \frac{\arg [\Phi(x) = 1 - Q/2]}{2\sqrt{n}}, \quad n > 1, \quad (6)$$

де  $\Phi(x)$  – функція Лапласа.

*Визначення 1.* Вибірka вважається репрезентативною у статистичному розумінні з випробування, при якому поточний довірчий інтервал (6) накривається заданим інтервалом  $[0,5 \pm \Delta]$ , де  $|\Delta| < 0,5$ .

У роботі запропоновано метод визначення за критерієм Парето мінімального обсягу  $n_{\min}$  репрезентативної навчальної вибірки за умови

отримання прийнятних із практичних міркувань статистичної похибки та оперативності алгоритму його обчислення. Для розв'язання цієї суперечливої задачі використано метод динамічного довірчого інтервального оцінювання, суть якого полягає в побудові після кожного випробування довірчого інтервалу, який оцінює ймовірність  $p_i$  знаходження  $i$ -ї ознаки в полі контрольних допусків з імовірністю довіри (5).

Задача оптимізації системи контрольних допусків розглядається як визначення оптимального значення симетричного поля контрольних допусків  $\{\delta_{K,i}^* \mid i = \overline{1, N}\} = \arg E_m^*$ , де  $G_{\text{доп}}$  – область допустимих значень контрольних допусків. Розроблено та досліджено паралельний алгоритм оптимізації системи контрольних допусків.

Ідея оптимізації параметрів навчання полягає у наближенні глобального максимуму інформаційного критерію оптимізації до найбільшого його значення в області значень функції. Тому важливого значення набуває дослідження збіжності такого алгоритму. Якщо  $E_1^*$  – максимальне значення критерію функціональної ефективності навчання,  $E_{1\text{max}}^{(L)}$  – максимальне значення критерію функціональної ефективності на  $L$ -му останньому кроці ітераційної процедури, то має місце така теорема.

*Теорема 1.* Ітераційний алгоритм паралельної оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання збігається з імовірністю, тобто  $E_1^* = E_{1\text{max}}^{(L)} + \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  – будь-яке мале додатне число.

Для доведення достатніх умов збіжності в теоремі 1 використовувався евристичний метод виведення, оскільки функції критерію функціональної ефективності навчання є взаємнонеоднозначними.

Досліджено вплив потужності алфавіту класів розпізнавання на асимптотичну достовірність електронно-оптичної системи розпізнавання, отримано коефіцієнти парного та множинного перетинів класів як у геометричній, так і в імовірнісній формах і встановлено їх аналітичний зв'язок з точнісними характеристиками процесу навчання.

Коефіцієнт парного перетину класів  $\eta_{m,l}$  розглядається як відношення повної ймовірності  $P_{\text{нр}}$  неправильного розпізнавання  $X_m$  до повної ймовірності  $P_{\text{пр}}$  правильного розпізнавання  $X_l$ :

$$\eta_{m,l} = \frac{P_{\text{нр}}}{P_{\text{пр}}} = \frac{p_m \alpha + p_l \beta}{p_m D_1 + p_l D_2},$$

де  $p_m, p_l$  – імовірності появи випадкових величин  $X_m$  і  $X_l$  відповідно.

У разі відсутності апіорної інформації доцільно взяти  $p_m = p_l = 0.5$ . Тоді

$$\eta_{m,l} = \frac{\alpha + \beta}{D_1 + D_2}.$$

Для дослідження впливу потужності абетки класів розпізнавання  $\{X_m^0\}^{\wedge}$  на достовірність рішень, що приймаються, доведено такі твердження.

*Твердження 2.* Нехай у бінарному просторі ознак розпізнавання  $\Omega$  потужності  $N$  здійснюється нечітке розбиття на  $M$  класів еквівалентності, в якому задано множину вершин еталонних векторів  $\{x_m\}$ , і відома кодова відстань між центрами сусідніх класів  $d(x_m \oplus x_l)$ , де  $x_l$  – сусідній (найближчий) еталонний вектор до  $x_m$ ;  $\oplus$  – логічна операція нерівнозначності, тоді парний коефіцієнт перетину  $\eta_{m,l}$  залежить як від міжцентрової відстані класів розпізнавання, так і від середньоквадратичних відхилень реалізацій класів, що перетинаються.

*Твердження 3.* Збільшення парного коефіцієнта перетину класів розпізнавання при  $\sigma_m, \sigma_l = \text{const}$  призводить до зменшення достовірності рішення, що приймається.

Запропонований коефіцієнт перетину класів дозволяє оцінювати точність розпізнавання образів і визначати при збільшенні абетки класів розпізнавання її критичну потужність, яка потребує застосування завадозахищених методів прийняття рішень.

Для підвищення оперативності ітераційних процедур розпізнавання зображення із змінним кроком збільшення параметра оптимізації (струму об'єктивної лінзи) розглянуто застосування величини приросту радіуса контейнера за законом чисел р-Фібоначчі. Теоретично обґрунтовано та експериментально показано, що тривалість стабілізації зображення для растрового електронного мікроскопа РЕМ-103-1 не перевищувала 5с замість 14с при сталому кроці. На рис. 2 показано залежність кількості ітерацій від часу настроювання електронно-оптичної системи розпізнавання: 1 – оператором; 2 – адаптивною системою розпізнавання при збільшенні в процесі навчання радіуса контейнера зі сталим кроком  $h=1$ ; 3 – адаптивною системою розпізнавання при збільшенні у процесі навчання радіуса контейнера за законом чисел р-Фібоначчі.

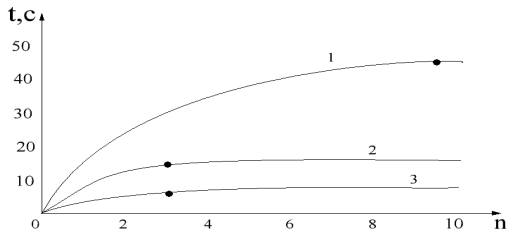


Рис. 2. Залежність кількості ітерацій від часу настроювання системи

У дисертаційній роботі набув подальшого розвитку метод автоматичної класифікації чорно-білих зображень класу 2D для самонастроювання електронно-оптичних систем, що полягає в побудові метричного простору за класами матриць яскравостей досліджуваного об'єкта для оцінки міри різноманітності функціональних станів системи розпізнавання. Це дозволяє сформулювати керуючі впливи на функціональну ефективність електронно-оптичної системи розпізнавання із урахуванням досвіду експерта.

Класифікаційне настроювання електронно-оптичної системи розглядається як непряма задача навчання, що складається з таких етапів: обчислення на кожному кроці настроювання  $s$  інформаційної міри різноманітності  $E(s)$  між початковим  $X_0$  і поточним  $X_S^0$  класами; порівняння значення  $E(s)$  з попереднім; зміна залежно від результату порівняння управляючого параметра системи розпізнавання  $g_j$  – струму фокусувальної лінзи за ітераційним алгоритмом

$$g_{\xi}(s) = g_{\xi}(s-1) + \begin{cases} h_{\xi}(s), & \text{if } E(s) \geq E(s-1); \\ -h_{\xi}(s), & \text{if } E(s) < E(s-1), \end{cases}$$

де  $h_0(s)$  – крок зміни  $o$ -го параметра настроювання.

Процес нормалізації зображення закінчується, коли знайдене оптимальне значення  $\{g_o^*\}$ , що забезпечує максимально чітке зображення.

При цьому оптимізація структурованих параметрів навчання здійснюється шляхом багатоциклічної ітераційної процедури пошуку глобального максимуму запропонованих у роботі модифікацій інформаційного критерію функціональної ефективності навчання системи в робочих областях визначення їх функцій. Згідно з принципами редукції (В.І.Васильєв) та квантовості подання знань (І.Б.Сіроджа) на кожному кроці навчання здійснюються трансформація вихідного розподілу реалізацій образу та його вписування в оптимальний контейнер, який відновлюється в радіальному базисі дискретного простору ознак розпізнавання. Така цілеспрямована нормалізація образів у процесі навчання дозволяє побудувати нечітке розбиття, яке максимізує інформаційну міру різноманітності для класів, що належать заданому алфавіту. При цьому на відміну від відомих методів автоматичної класифікації механізм підвищення ефективності машинного навчання системи за умови нечіткої компактності реалізацій образу здійснюється шляхом цілеспрямованої зміни значень ознак розпізнавання.

**Четвертий розділ** присвячено імітаційному моделюванню запропонованих в роботі функціонально-статистичної моделі та методу адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень, а також розв'язанню практичних задач.

Досліджено і розв'язано задачі класифікаційного самонастроювання здатної навчатися електронно-оптичної системи розпізнавання шляхом

максимізації інформаційної міри різноманітності функціональних станів системи та пошуку в процесі настроювання її глобального максимуму в робочій області визначення функції, що дозволяє визначити момент перенавчання системи із урахуванням досвіду експерта.

Розроблено і запатентовано новий спосіб автофокусування електронного мікроскопа за зображенням зразка, що досліджується. Аналіз результатів фізичного моделювання запропонованої методики показав, що ітераційна процедура пошуку глобального максимуму інформаційного критерію оптимізації у процесі автофокусування дозволяє цілеспрямовано змінювати параметр настроювання – струм обмотки керування фокусувальної лінзи.

Досліджено трудомісткість застосування запропонованого адаптивного методу автофокусування зображення на мікроскопі РЕМ-103-1, який у порівнянні із відомими методами зменшив час настроювання на 50% (оцінка здійснювалася за результатами 50 прогонів алгоритму навчання автоматизованої системи управління мікроскопом).

Розроблено та досліджено методику розпізнавання отриманих у електронній мікроскопії в режимі мікродифракції електроннограм, що належать до класу нестационарних за яскравістю зображень. При цьому інтегральні характеристики зображень подаються у полярних координатах, що забезпечує інваріантність методу до зсуву, повороту та зміни масштабу і одночасно зменшують обчислювальну трудомісткість алгоритму навчання.

Розроблено та експериментально досліджено методику розпізнавання морфологічних зображень тканин, отриманих у пацієнтів за методом біопсії при діагностуванні онкологічних захворювань. Впровадження цієї розробки в Сумському онкологічному центрі дозволяє створювати базу знань з метою раннього діагностування онкопатологій у населення.

Розроблено та досліджено розпізнавання фрагментів телевізійних зображень шляхом максимізації інформаційної міри між еталонним кадром і кадром, що порівнюється. На відміну від алгоритмів кореляційно-екстремального методу розроблений адаптивний метод розпізнавання дозволяє оптимізувати порогові значення – контрольні допуски на ознаки розпізнавання, що підвищує надійність ідентифікації.

У **додатку** наводяться матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи.

## **ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі наведено теоретичне обґрунтування та вирішення актуальної наукової задачі розробки нової ефективної функціонально-статистичної моделі та методів адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень. Аналіз отриманих результатів дає підставу зробити такі висновки:

1. На основі системного аналізу функціональних можливостей сучасних електронно-оптичних систем розпізнавання визначено проблему дисертаційних досліджень: підвищення ефективності розпізнавання електронно-оптичних зображень. Якість отриманого зображення залежить від типу досліджуваного зразка, вибору робочих умов електронно-оптичної системи, досвіду та стану зору оператора. Тому необхідність адаптації до суб'єктивних особливостей дослідження вимагає створення спеціальної системи, здатної створювати зображення оптимальної якості і оцінювати поточний функціональний стан системи з метою його корекції, але не виключає участі людини.

2. Розроблена функціонально-статистична модель розпізнавання електронно-оптичних зображень основана на оцінці інформаційної здатності електронно-оптичної системи розпізнавання і реалізується шляхом максимізації інформаційної міри різноманітності функціональних станів такої системи на кожному кроці навчання. Розробка такої моделі дозволила значно спростити синтез адаптивного розпізнавання зображень, оскільки вона є максимально наближеною до його системної реалізації. Моделювання інтелекту експерта і включення його методів мислення в контур управління електронно-оптичною системою розпізнавання дозволило урахувати суб'єктивні особливості дослідження та істотно зменшити кількість випробувань у процесі розпізнавання.

3. Удосконалено, досліджено і реалізовано метод адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень, що ґрунтується на прямій оцінці інформаційної спроможності системи за умов нечіткої компактності реалізацій образу й обмеження обсягу навчальної вибірки. Розроблений метод дозволив адаптувати вхідний математичний опис функціонального стану системи, що навчається, з метою побудови оптимального в інформаційному розумінні нечіткого класифікатора, який при достатній глибині оптимізації його просторово-часових параметрів функціонування забезпечує класифікацію функціональних станів системи розпізнавання з достатньо високою точністю за нечіткою навчальною матрицею (похибка 5%). Оцінка здійснювалася за результатами 50 прогонів алгоритму навчання автоматизованої системи розпізнавання електронно-оптичних зображень.

4. Набув подальшого розвитку метод автоматичної класифікації чорно-білих зображень класу 2D для самонастроювання електронно-оптичних систем, що полягає в оптимізації просторово-часових параметрів функціонування системи розпізнавання шляхом максимізації її інформаційної спроможності. Це дозволяє сформувати керуючі впливи на функціональну ефективність електронно-оптичної системи розпізнавання із урахуванням досвіду експерта. Для оцінки технічного стану електронно-оптичної системи розпізнавання досліджено збіжність алгоритму оптимізації контрольних допусків на управляючий параметр такої системи, визначено мінімальний обсяг репрезентативної навчальної вибірки, реалізовано



оптимізацію розпізнавання зображень за оперативністю, проаналізовано спостережуваність та оцінено асимптотичну точність системи.

5. Проведено імітаційне моделювання розроблених моделей та методу адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень. Розроблено та запатентовано новий спосіб автофокусування растрового електронного мікроскопа за зображенням досліджуваного зразка, який дозволив зменшити час настроювання на 50%. Розроблені модель, метод та програмний інструментарій використані при проектуванні системи автофокусування зображення для нової моделі електронного мікроскопа РЕМ-106-І, що підтверджено актом впровадження ВАТ “Selmi” (м.Суми, протокол №3 від 30.03.2007).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Кузьмін І.В.* Класифікаційне настроювання електронного мікроскопа за методом функціонально-статистичних випробувань / І.В.Кузьмін, А.М.Скаковська // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця: ВДГУ, 2001. – №1. – С.92-98.

2. *Краснопоясовський А.С.* Визначення нормованого поля допусків на параметр настройки при автофокусуванні електронного мікроскопа за зображенням / А.С.Краснопоясовський, А.М.Скаковська // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2001. – №2. – С.33-36.

3. *Краснопоясовський А.С.* Оцінка асимптотичної точності системи розпізнавання образів з відкритою абеткою класів / А.С.Краснопоясовський, А.М.Скаковська // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки. – Суми: СумДУ, 2002. – №1 (34). – С.86-89.

4. *Краснопоясовський А.С.* Визначення мінімального обсягу репрезентативної навчальної вибірки / А.С.Краснопоясовський, А.М.Скаковська, М.В.Козинець // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки. – Суми: СумДУ, 2002. – №12(45). – С.70-73.

5. *Краснопоясовський А.С.* Обчислювальний аспект оптимізації контейнерів класів розпізнавання у радіальному базисі / А.С.Краснопоясовський, А.М.Скаковська, І.В.Шелехов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2003. – №3(20). – С.86-89.

6. *Скаковская А.Н.* Функционально-статистический метод управления растровым электронным микроскопом // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харків: НАКУ ім. М.Є.Жуковського «ХАІ», 2007. – №2(21). – С.16-20.

7. *Соколов О.Ю.* Класифікація зображень в контейнерному просторі ознак розпізнавання / О.Ю.Соколов, А.М.Скаковська // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2008. – №1(31). – С.50-52.

8. *Краснопоясовський А.С.* Оптимізація параметрів нормалізації образу при класифікаційному настроюванні електронного мікроскопа / А.С.Краснопоясовський, А.М.Скаковська // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – Харьков: ХНУРЕ, 2003. – □ Вып. 123. – □ С.62-66.

9. *Соколов О.Ю.* Оптимізація стабілізації зображення за оперативністю при класифікаційному настроюванні системи розпізнавання / О.Ю.Соколов, А.М.Скаковська // Системи обробки інформації: Зб. наук. праць. – Харків: ХУПС, 2007. – Вип.9(67). – С.92-94.

10. *Пат. 64570А* України, МКІ Н 01 J 37/21. Спосіб автоматичного фокусування електронного мікроскопа за зображенням досліджуваного об'єкта / А.С.Краснопоясовський, А.М.Скаковська, М.В.Козинець, І.В.Шелехов. Заявник і патентовласник СумДУ. – №2003065957. Заявл. 26.06.2003. Опубл. 16.02.04, Бюл. № 2.

11. *Краснопоясовський А.С.* Автофокусування електронного мікроскопа за зображенням / А.С.Краснопоясовський, А.М.Скаковська // Матеріали 5-ї Всеукр. міжнар. конф. УкрОбраз'2000: Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів. – Київ, 2000. – С.183-186.

12. *Скаковська А.М.* Класифікаційна настройка електронного мікроскопа. // Матеріали Міжнар. конф. з управління «Автоматика-2001». – Одеса: ОДПУ, 2001. – С.117-118.

13. *Скаковська А.М.* Оптимізація автофокусування електронного мікроскопа за оперативністю // Матеріали 6-ї Міжн. конф. «Контроль і управління в складних системах». – Вінниця: Універсам, 2001. – С.110.

14. *Скаковська А.М.* Класифікаційне настроювання інтелектуальної системи // Матеріали Междунар. научн. конф. «Современные методы кодирования в электронных системах». – Сумы: СумГУ, 2002. – С.28.

15. *Скаковська А.М.* Побудова оптимального класифікатора за методом функціонально-статистичних випробувань /А.М.Скаковська, В.О.Боровик // Матеріали 3-й Междунар. междисципли. научн.-практ. конф. «Современные проблемы гуманизации и гармонизации управления». – Харків: ХНУ ім.В.Н.Каразіна, 2002. – С.264-265.

16. *Скаковська А.М.* Інформаційний синтез адаптивної системи керування, що навчається // Матеріали II Междунар. научн. конф. «Современные методы кодирования в электронных системах». – Сумы: СумГУ, 2004. – С.38-39.

17. *Скаковська А.М.* Розпізнавання морфологічних зображень в медицині / А.М.Скаковська, В.О.Боровик // Матеріали 6-ї Міжнар. міждисципл. наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми науки та освіти». – Харків: ХНУ ім.В.Н.Каразіна, 2005. – С.249.

18. *Скаковська А.М.* Об'єктно-орієнтована реалізація алгоритму навчання та екзамену системи керування, що навчається / А.М.Скаковська, В.О.Боровик // Матеріали 7-ї Міжнар. міждисципл. наук.-практ. конф.

«Сучасні проблеми науки та освіти». – Харків: ХНУ ім.В.Н.Каразіна, 2006. – С.245.

19. *Соколов А.Ю.* Интеллектуальные методы управления растровым электронным микроскопом на основе функционально-статистического подхода / А.Ю.Соколов, А.Н.Скаковская // Матеріали 14-ї Міжнар. конф. з автоматичного управління «Автоматика-2007». – Севастополь: СНУЯЄтаП, 2007. – С.176-178.

20. *Скаковська А.М.* Теоретико-множинна модель системи розпізнавання зображень // Матеріали I Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтелектуальні системи в промисловості і освіті». – Суми: СумДУ, 2007. – С.51-52.

21. *Скаковська А.М.* Розпізнавання електронограм в електронній мікроскопії / А.М.Скаковська, А.І.Тищенко // Матеріали научн.-техн. конф. препод., сотрудн. и студентов мех.-мат. факультета. – Суми: СумГУ, 2000. – С.98-100.

22. *Скаковська А.М.* Обробка нечітких зображень // Научн.-техн. конф. препод., сотрудн. и студентов мех.-матем. факультета. – Суми: СумГУ, 2001. – С.88-90.

## АНОТАЦІЯ

**Скаковська А.М.** Функціонально-статистична модель розпізнавання зображень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2008.

Дисертаційне дослідження виконано з метою розробки нової функціонально-статистичної моделі та адаптивних методів розпізнавання електронно-оптичних зображень, що дозволяє підвищити ефективність функціонування систем розпізнавання шляхом класифікаційного настроювання електронно-оптичної системи без участі людини-оператора.

На основі системного аналізу сформоване спеціальне математичне та програмне забезпечення, призначене для функціонування у системах штучного інтелекту, а розроблена модель склала основу алгоритму та програмного інтерфейсу розпізнавання зображень з урахуванням суб'єктивних особливостей досліджень.

Удосконалення автоматизованої технології опрацювання даних, поєднане з комплексом методів і моделей розпізнавання образів і теорії нечітких множин, дозволяє застосовувати апаратно-програмний комплекс, що складає основу досліджень при синтезі електронно-оптичних систем штучного інтелекту.

**Ключові слова:** функціонально-статистична модель, адаптивний метод розпізнавання зображень, система, ітераційні операції настроювання, штучний інтелект.

## АННОТАЦИЯ

**Скаковская А.Н.** Функционально-статистическая модель распознавания изображений. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.23 – системы и средства искусственного интеллекта. –Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2008.

Диссертационное исследование выполнено с целью разработки новой функционально-статистической модели и адаптивных методов распознавания изображений для повышения эффективности функционирования системы за счет классификационной настройки электронно-оптической системы распознавания без участия человека-оператора.

Разработанная функционально-статистическая модель позволяет на этапе системного анализа не только устанавливать отношения между элементами информационного обеспечения и информационными потоками обработки информации, но и существенно облегчает разработку алгоритмов различных режимов функционирования адаптивных систем распознавания изображений. Разработаны критерии и алгоритмы оценки функциональной эффективности процесса обучения электронно-оптической системы распознавания изображений и определены условия его проведения. Предложена рабочая модификация информационного критерия функциональной эффективности обучения адаптивной системы для двухальтернативного решения при равновероятных гипотезах.

Разработанный метод адаптивного распознавания электронно-оптических изображений позволяет повысить эффективность распознавания за счет адаптации к конкретным типам исследуемых образцов, рабочих условий настройки системы и возможности оценки текущего функционального состояния электронно-оптической системы с целью его коррекции, но не исключает из контура участия человека-оператора.

Основная идея обучения системы распознавания согласно принципов максимизации информации при принятии решений и квантовости формирования знаний состоит в решении задач нормализации входного математического описания объекта исследования и целенаправленной трансформации исходного нечеткого разбиения пространства признаков на классы распознавания в четкое разбиение путем оптимизации пространственно-временных параметров функционирования системы, влияющих на максимальную асимптотическую полную достоверность классификации функциональных состояний обучающейся системы распознавания.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность построения решающего правила с достаточно высокой точностью по многомерной обучающейся матрице (погрешность 5%) при

условии нечеткой компактности реализаций образа и минимального объема репрезентативной обучающей выборки, который более чем на порядок меньше обучающих выборок, используемых в статистических методах автоматической классификации.

На основе системного анализа сформировано специальное математическое и программное обеспечение для функционирования в системах искусственного интеллекта, а разработанная модель взята за основу программного интерфейса распознавания изображений с учетом субъективных особенностей исследований.

Усовершенствование автоматизации технологий обработки данных в комплексе с методами и моделями распознавания образов позволило использовать аппаратно-программный комплекс, составляющий основу исследований при синтезе систем искусственного интеллекта, для проектирования системы автофокусировки изображений для новых моделей растрового электронного микроскопа производства ВАТ "Selmi".

**Ключевые слова:** функционально-статистическая модель, адаптивный метод распознавания изображений, система, итерационные операции настройки, искусственный интеллект.

## ABSTRACT

**Skakovskaya A.N.** Functional-Statistical Image Recognition Model. – Manuscript.

Dissertation for Candidate of Technical Science Degree on specialty 05.13.23 – Systems and Means of Artificial Intelligence. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2008.

The dissertation research was to develop a new effective functional-statistical model and adaptive method for image recognition allowing increasing image recognition systems functioning effectiveness by using iterative operations tuning automation.

On basis of the system analysis special mathematical and programming tools destined to function in a system of artificial intelligence have been created. The developed model has been used as basis for the algorithm and the programming interface for image recognition that takes into account subjective features of the research.

Automated data processing technology improvement and group of methods and models from the patterns recognition and fuzzy sets theories allow utilizing hardware-software complex that forms basis for researches of artificial intelligence systems synthesis.

**Key words:** functional-statistical model, adaptive method of recognition of images, system, iterative operations of adjustment, artificial intellect.

Підписано до друку 22.10.2008. Формат 60х90/16. Папір ксерокс ний.  
Обл.-вид. арк. 0,9. Наклад 100 пр. Гарнітура Times New Roman Суг.  
Ум. друк. арк. 1,1. Замовлення №

Вид-во СумДУ. Свідоцтво ДК №3062 від 17.12.2007.  
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.  
Друкарня СумДУ. 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.