

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Поворознюк Анатолій Іванович**



УДК 004.891.3+681.5

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В  
МЕДИЧНІЙ ДІАГНОСТИЦІ НА ОСНОВІ СИНТЕЗУ  
СТРУКТУРОВАНИХ МОДЕЛЕЙ**

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

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

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі обчислювальної техніки та програмування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Харків.

**Науковий консультант** доктор технічних наук, професор  
**Дмитрієнко Валерій Дмитрович,**  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», професор кафедри  
обчислювальної техніки та програмування

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Злепко Сергій Макарович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри проектування медико-біологічної  
апаратури

доктор технічних наук, професор  
**Мороз Борис Іванович,**  
Академія митної служби України, м. Дніпропетровськ,  
декан факультету інформаційних та транспортних  
систем і технологій

доктор технічних наук, професор  
**Раскін Лев Григорович,**  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», завідувач кафедри  
комп'ютерного моніторингу і логістики

Захист відбудеться «09» червня 2011 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002.

Автореферат розісланий «29» 04 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Северин В. П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Впровадження інформаційних технологій у медицину привело до створення широкого спектра медичних інформаційних систем (МІС). На сьогоднішній час виділяють сім рівнів розвитку зазначених систем, від автоматизованих медичних записів до інтелектуальних комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень у медицині (СППРМ) з використанням медичних баз знань і застосуванням інтелектуальних технологій синтезу комп'ютерного діагнозу, моніторингу й оптимізації процесу лікування. При цьому необхідно відзначити успіхи як у розробці теорії, так і в створенні МІС учених України й зарубіжжя: Н. М. Амосова, В. М. Ахутіна, Л. А. Бокерія, М. Л. Биховського, Р. М. Баєвського, С. А. Гаспаряна, Ю. М. Довженко, С. М. Злепко, Б. А. Кобринського, В. А. Ліщука, О. Ю. Майорова, А. П. Мінцера, А. П. Ротштейна, Л. Г. Раскина, Л. С. Файнзільберга та ін.

Процес обробки інформації в СППРМ складається з послідовності етапів: уведення й формалізація медико-біологічної інформації; формування множини діагностичних ознак, яка повинна задовольняти критеріям незалежності й інформаційної повноти; синтез вирішального правила для формування комп'ютерного діагнозу; оптимізація процесу лікування. При аналізі біосигналов і медичних зображень, найбільш трудомістким і відповідальним етапом є виділення інформативних структурних елементів, параметри яких служать для обчислення діагностичних ознак. Задача розробки СППРМ розбивається на множину локальних підзадач. Характеристики функціонування системи визначаються обґрунтуванням і коректним застосуванням математичних методів обробки медико-біологічних даних на всіх етапах перетворення інформації, тому виникає необхідність в розробці інформаційних технологій реалізації відзначених етапів на підставі єдиного формалізованого підходу.

Незважаючи на значні успіхи, на сьогоднішній час не існує комплексного багатокритеріального формалізованого підходу до побудови СППРМ, модель об'єктів діагностики (ОД) розглядається у вигляді "чорного ящика", а методи, що застосовуються, призначені для рішення локальних підзадач, не достатньо враховують складності організації підсистем організму, що діагностуються, особливостей формування системи діагностичних ознак і складної ітераційної процедури постановки діагнозу (від попереднього до уточненого).

Таким чином, актуальною є проблема розвитку теоретичних основ і інформаційних технологій перспективного класу СППРМ на основі структурної ідентифікації ОД для забезпечення необхідного рівня достовірності комп'ютерного діагнозу в умовах аналізу великої кількості залежних різнорідних ознак, включаючи аналіз біологічних сигналів і медичних зображень, при обмеженій навчальній вибірці. Така постановка проблеми визначила напрямки дисертаційних досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри обчислювальної техніки та програмування НТУ "ХПІ" по держбюджетним темам МОН України. Здобувач очолював в якості наукового керівника теми: "Розробка теорії і методів структурної ідентифікації при проектуванні комп'ютерних систем медичної діагностики" (ДР № 0104U003361); "Розробка теорії і методів побудови інтелектуальних медичних систем на основі структурної ідентифікації" (ДР № 0107U000599); "Розробка теорії та методів побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень в медицині на основі синтезу структурованих моделей" (ДР № 0110U001246). Був відповідальним виконавцем тем: "Автоматизована система оцінки впливу багатокомпонентного забруднення навколишнього середовища на формування порушень (імунологічної реактивності) дитини" (ДР № 0193U027864); "Розробка теорії і методів структурної ідентифікації біологічних об'єктів" (ДР № 0198U005684). Виконавець окремих етапів НДР: "Комп'ютерна медична система "Догляд" (ДР № 0195U006746); "Розробка методів, алгоритмів, програм контролю й діагностики порушень кровообігу головного мозку" (ДР № 0196U006469), а також науковим керівником договорів про науково-технічне співробітництво НТУ "ХПІ" з організаціями: № 60/14–08 – Інститут неврології, психіатрії і наркології АМН України (м. Харків); № 60/17–08 – Інститут дерматології і венерології АМН України (м. Харків); № 60/18–08 – Інститут охорони здоров'я дітей і підлітків АМН України (м. Харків).

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є розвиток теорії інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень у медичній діагностиці на основі обґрунтування інформаційних технологій синтезу структурованих моделей складно організованих взаємозалежних підсистем організму, що є об'єктами діагностики, і методів синтезу діагностичних вирішальних правил на цих моделях. Для досягнення зазначеної мети поставлені основні задачі:

1. Провести системний аналіз існуючих методів обробки інформації в СППРМ для обґрунтування й розвитку концепції структурної ідентифікації об'єктів діагностики.

2. Розробити структуровану модель об'єктів діагностики, яка враховує структурний і функціональний базиси, а також експертні оцінки й невизначеність параметрів функціонального базису.

3. При використанні в СППРМ у якості вихідних даних біологічних квазіперіодичних сигналів (БКС), які відображають циклічні процеси в організмі, розробити формалізований метод виділення структурних елементів БКС різних типів.

4. Виконати адаптацію методу структурної ідентифікації БКС для двовимірних медичних зображень, для чого розробити структуровану модель двовимірного структурного елемента.

5. Розробити метод синтезу ієрархічної структури заданої множини станів (діагнозів) на основі ієрархічної кластеризації діагнозів у просторі діагностичних ознак.

6. Розробити метод синтезу й реконфігурації ієрархічної структури діагностичних ознак, що задовольняє критеріям мінімального кореляційного зв'язку між ознаками, максимальної інформативності й відповідає топології структури діагнозів для реалізації ітераційної процедури уточнюючого діагнозу.

7. Розробити метод оцінки інформативності різнорідних діагностичних ознак і формування діагностично-значимих інтервалів числових ознак на основі мінімізації інтегральної помилки, обумовленої заміною теоретичного закону розподілу гистограмою і обмеженістю навчальної вибірки.

8. Розробити метод синтезу уточнюючого діагнозу з розщепленням недостовірних рішень при взаємодії ієрархічних структур діагностичних ознак і діагнозів на основі аналізу апріорних умовних ймовірностей, їхніх невизначеностей і експертних оцінок структур симптомокомплексів.

9. Розробити структуру й програмне забезпечення СППРМ, виконати перевірку адекватності розроблених інформаційних технологій при обробці реальних біомедичних даних.

*Об'єктом дослідження* є процес діагностики функціонального стану підсистем організму людини.

*Предметом дослідження* виступають методи й засоби синтезу структурованих моделей об'єктів діагностики і діагностичних вирішальних правил на цих моделях при побудові систем підтримки прийняття рішень у медичній діагностиці.

*Методи дослідження.* Теоретичні дослідження й методика рішення задач побудови СППРМ базується на наступних методах дослідження: на основі системного аналізу й методів підтримки прийняття рішень (МАІ) розроблена узагальнена схема перетворення інформації в СППРМ і формалізовані її етапи; на основі концепцій еволюційної ідентифікації структурованих моделей, побудована структурована модель ОД; за допомогою методів теорії розпізнавання образів і методу непараметричного перетворення Хока виконана структурна ідентифікація БКС різної природи; на основі методу аналізу поточкових моделей (алгоритм "дефекту") та теоретико-інформаційного підходу виконано синтез ієрархічних структур діагностичних ознак та діагностуємих станів; на основі теорії прийняття рішень (метод послідовного аналізу Вальда) виконано синтез комбінованого вирішального правила на цих структурах.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що запропонований, обґрунтований і застосований комплексний підхід до рішення науково-практичної проблеми підвищення ефективності функціонування систем підтримки прийняття рішень в медичній діагностиці на основі формалізації етапів перетворення інформації й синтезу структурованих моделей

об'єктів діагностики відзначених етапів та вирішальних правил на цих моделях на основі:

1. Вперше побудована концептуальна модель об'єкта діагностики у вигляді структури взаємозалежних підсистем організму людини, при їхній взаємодії з навколишнім середовищем і на її основі розроблена структурована модель об'єкта діагностики. Запропонована модель враховує не тільки структурний і функціональний базис, але й невизначеність параметрів функціонального базису й експертні оцінки.

2. Вперше розроблено метод виділення структурних елементів різних біологічних сигналів, у якому виконується перетворення вихідного простору ознак в інформативний простір параметрів з використанням методології й обчислювальних процедур перетворення Хока. Це дозволяє застосовувати формалізований підхід при виділенні різних типів структурних елементів, включаючи атипічні форми для різних типів сигналів, що в остаточному підсумку підвищує вірогідність ідентифікації.

3. Вперше розроблено метод ієрархічної кластеризації заданої множини станів (діагнозів) і діагностичних ознак на основі потокових моделей, який, на відміну від відомих методів кластерного аналізу, виконує кластеризацію в просторі, де задані тільки відстані між об'єктами, враховує експертні оцінки, знаходить оптимальне рішення за критерієм мінімуму міжкластерного зв'язку, і не критичний до розмірності задачі.

4. Вперше розроблено метод синтезу й реконфігурації ієрархічної структури діагностичних ознак, що задовольняє критеріям мінімального кореляційного зв'язку між ознаками, максимальної інформативності й відповідає топології структури діагнозів, що дозволило забезпечити оптимальну схему обстеження пацієнтів при реалізації ітераційної процедури уточнюючого діагнозу.

5. Одержав подальший розвиток метод оцінки інформативності різнорідних діагностичних ознак і на його основі вперше розроблено метод формування нерівномірних діагностично-значимих інтервалів числових ознак за критерієм мінімуму інтегральної помилки, яка обумовлена заміною теоретичного закону розподілу гістограмою і обмеженістю навчальної вибірки, що дозволило оцінити достовірність статистичних оцінок (оцінок умовних ймовірностей) при істотній апіорній невизначеності.

6. Вперше розроблено метод синтезу уточнюючого діагнозу з розщепленням недостовірних рішень при взаємодії ієрархічних структур діагностичних ознак і діагнозів на основі аналізу апіорних умовних ймовірностей, їхніх невизначеностей і експертних оцінок структур симптомкомплексів. Метод реалізує оптимальну схему аналізу діагностичних ознак, дозволяє виконувати "песимістичну" оцінку діагнозу й диференціацію негативних відповідей системи у випадку, коли заданий рівень достовірності діагнозу в конкретного пацієнта не досягнуто.

7. Одержав подальший розвиток метод структурної ідентифікації біологічних сигналів для структурної ідентифікації двовимірних медичних зображень, що дозволяє виконувати пошук двовимірних структурних елементів на напівтонових зображеннях, у яких застосування методів оконтурювання є не ефективним.

**Практичне значення одержаних результатів** в галузі розробки комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень у медицині полягає в тому, що розроблені в дисертаційній роботі моделі й методи структурної ідентифікації є науково-методичною основою для розробки відповідних алгоритмів і програмного забезпечення. Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

– розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення структурної ідентифікації біологічних квазіперіодичних сигналів, яке може бути використано для виділення різних типів структурних елементів, включаючи атипичні форми, біологічних сигналів різної природи;

– розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення синтезу ієрархічних структур діагностичних ознак і діагностуємих станів та синтезу діагностичного вирішального правила при взаємодії вказаних структур, що забезпечує оптимальну схему обстеження пацієнтів, виконує "песимістичний" прогноз, обумовлений невизначеністю апріорних умовних ймовірностей при врахуванні експертних оцінок структур симптомокомплексів при послідовному аналізі діагностичних ознак до досягнення заданого рівня вірогідності діагнозу;

– запропонована й реалізована структура та програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень в медичній діагностиці, що дозволяє формалізувати етапи обробки медико-біологічної інформації, підвищити обґрунтованість та достовірність комп'ютерного діагнозу, та адаптуватися до заданих прикладних галузей медицини.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у вигляді моделей, алгоритмів і пакетів прикладних програм для рішення завдань підтримки прийняття рішень у медичній діагностиці, що підтверджується актами про впровадження наступних організацій: Інститут неврології, психіатрії й наркології Академії медичних наук України (м. Харків) для обробки реографічних сигналів; Харківський національний університет ім. Каразіна В. Н. для реконструктивної обробки ультразвукових зображень; Державне підприємство «НДІ гігієни праці й профзахворювань» (м. Харків) для синтезу ієрархічної структури діагностичних ознак за результатами дослідження клінічного аналізу крові; відділ комп'ютерної томографії Харківської медичної академії післядипломної освіти для обробки томограм; лабораторія імунології Українського НДІ дерматології й венерології (м. Харків) для синтезу ієрархічної структури діагностичних ознак і діагностичної багатофакторної моделі оцінки впливу шкідливих факторів умов роботи на показники здоров'я працівників; кафедра «Обчислювальна техніка й програмування» НТУ «ХПІ» у

науково-дослідній роботі й навчальному процесі при вивченні дисциплін "Комп'ютерні системи медичної діагностики", "Методи й засоби побудови дослідницьких систем", "Комп'ютеризація спеціалізованих середовищ", в курсовому та дипломному проектуванні.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: концепція структурної ідентифікації та структурована модель ОД; метод виділення структурних елементів БКС різних типів на основі синтезу структурованих моделей еталонів структурних елементів і його адаптація для структурної ідентифікації двовимірних медичних зображень; метод синтезу ієрархічної структури заданої множини станів (діагнозів); метод синтезу й реконфігурації ієрархічної структури діагностичних ознак; метод оцінки інформативності різнорідних діагностичних ознак і формування діагностично-значимих інтервалів числових ознак; метод синтезу уточнюючого діагнозу з розщепленням недостовірних рішень при взаємодії ієрархічних структур діагностичних ознак і діагнозів; структура й програмне забезпечення СППРМ.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: III – XVIII Міжнародних науково-практичних конференціях "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье" (Харків, 1995–2010); I – X Міжнародних наукових конференціях "Проблемы информатики и моделирования" (Харків, 2001–2009; Ялта, 2010); Міжнародній науковій конференції "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" (Харків, 2004); Міжнародній науково-технічній конференції "Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні" (Харків, 2004); XIII–XVI Міжнародних конференціях з автоматичного керування "Автоматика 2006–2009" (Вінниця, 2006; Севастополь, 2007; Одеса, 2008; Чернівці, 2009); V Міжнародній науково-практичній конференції "Комп'ютерні системи в автоматизації виробничих процесів" (Хмельницький, 2007); IV науковій конференції Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, (Харків, 2008); IX–X Міжнародних конференціях "Контроль і управління в складних системах" (Вінниця, 2008, 2010); 10–11 Міжнародних науково-практичних конференціях "Сучасні інформаційні та електронні технології" (Одеса, 2009, 2010); Міжнародних наукових конференціях "Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту" (Херсон-Євпаторія, 2009, 2010); Міжнародній конференції "International Conference on Intelligent Information and Engineering Systems" INFOS 2009 (Krynica, Poland, 2009); первой Международной научно-технической конференции "Компьютерные науки и технологии" КНиТ-2009 (Белгород, Россия, 2009); XII Міжнародній науково-технічній конференції "Системний аналіз і інформаційні технології" (Київ, 2010).



**Публікації.** Основні положення й результати дисертації опубліковані в 47 наукових працях, серед них 33 наукові праці в фахових виданнях ВАК України.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 418 сторінок, серед яких 11 рисунків та 2 таблиці на 15 окремих сторінках, 21 таблиця і 50 рисунків по тексту, 6 додатків на 64 сторінках, список використаних літературних джерел з 289 найменувань на 29 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертації, її наукова й практична цінність, сформульовані мета й завдання роботи, наведена її загальна характеристика.

У **першому розділі** проводиться аналіз сфер застосування медичних комп'ютерних інформаційних систем та показано місце систем підтримки прийняття рішень у загальному спектрі медичних комп'ютерних інформаційних систем. На основі аналізу типів вихідних даних і особливостей їхньої обробки показано, що при прийнятті рішень використовується різноманітна (числові, рангові, дихотомічні, номінальні ознаки, а також біомедичні сигнали й зображення), отримана різними лікарями й у різний час, недостатньо формалізована й несуча елементи суб'єктивної оцінки лікаря інформація. Показано обмеженість застосування традиційних методів формування множини діагностичних ознак.

Показано, що при аналізі біосигналов і медичних зображень, найбільш трудомістким і відповідальним етапом є виділення інформативних структурних елементів, параметри яких служать для обчислення діагностичних ознак. Методи контурного аналізу, які застосовуються для виділення структурних елементів БКС, засновані на досить докладному описі еталонів кожного типу структурного елемента для кожного виду сигналу, тому обмеженістю застосування вказаних методів є їх евристичність, специфічність для кожного типу сигналів, що не дозволяє виконувати їхню адаптацію для інших типів сигналів, необхідність опису еталонів всіх атипічних форм, а також чутливість до рівня шумів.

Проведено порівняльний аналіз методів синтезу вирішального правила (ВП) для комп'ютерного діагнозу: детерміністичних, заснованих на формуванні структур симптомкомплексів; ймовірнісних, заснованих на підрахунку умовних ймовірностей; методів розпізнавання образів; методів, заснованих на нечіткій логіці, штучних нейронних мережах і т.п. На підставі проведеного аналізу зроблений висновок, що на теперішній час не існує комплексного багатокритеріального формалізованого підходу до побудови СППРМ, модель

ОД розглядається у вигляді "чорного ящика", а методи, які застосовуються, призначені для рішення локальних підзадач, не враховують складності організації підсистем організму що діагностуються, особливостей формування системи діагностичних ознак і ітераційної процедури постановки діагнозу.

У другому розділі виконана формалізація задачі структурної ідентифікації біологічних об'єктів. В якості концептуальної моделі ОД розглядаються багаторівневі, ієрархічні, взаємозалежні підсистеми організму людини, при їхній взаємодії з навколишнім середовищем (обмін речовиною, енергією й інформацією), параметрами ОД, що вимірюються, є різнорідні діагностичні ознаки, а процес постановки діагнозу є ітераційною процедурою.

При цьому, на кожному  $k$ -му рівні взаємодії внутрішнього й зовнішнього середовища, кожна  $i$ -а підсистема організму  $R_i$  (серцево-судинна, дихання, нервова, імунна й ін.) перебуває в певному  $j$ -му стані  $s_{ij}^k$  з множини  $S_i = \{s_{ij}^k\}$ ;  $k = \overline{0,14}$ ;  $i = \overline{1, n_k}$ ;  $j = \overline{1, n_i}$ , де  $n_k$  – число підсистем організму, на  $k$ -му рівні взаємодії;  $n_i$  – число можливих станів  $i$ -ї підсистеми на  $k$ -му рівні.

Множина станів  $S_i$  умовно розбивається на підмножини:  $S_{in}$  – норма,  $S_{ig}$  – граничний стан і  $S_{ip}$  – патологія, тобто  $S_i = S_{in} \cup S_{ig} \cup S_{ip}$ . Множина станів усього організму  $S$  визначається множинами станів всіх його підсистем  $S = \{S_i\}$   $i = \overline{1, n_r}$ , де  $n_r = \max_k n_k$ . Прийнята в медицині система діагнозів  $D = \{D_i\}$   $i = \overline{1, n_d}$  є відображенням множини можливих станів організму на систему термінів і визначень  $\{s_{ij}^k\} \rightarrow \{D_i\}$ . При цьому, кожний діагноз є деякою підмножиною станів організму  $D_i \subset S$ , причому кожний стан організму може відображати кілька рівнів взаємодії його підсистем. Діагноз  $D_0$  – "практично здоровий" визначається як  $D_0 = \{s_{ij}^k\} \forall s_{ij}^k \in (S_{in} \cap S_{ig})$ , а множина інших діагнозів  $\{D_i\}_{i \neq 0} = \{s_{ij}^k\} \exists s_{ij}^k \in S_{ip}$ . Вихідними даними для діагностики є прийнята в медичній практиці система діагностичних ознак  $X = \{x_0, \dots, x_i, \dots, x_m\}$ , яка, якоюсь мірою відображає поточний  $j$ -й стан  $i$ -ї підсистеми організму на  $k$ -му рівні взаємодії  $s_{ij}^k$ , тобто множина станів  $\{s_{ij}^k\}$  відображається на множину ознак  $X$ . Таким чином, невідомий поточний стан підсистем організму  $s_{ij}^k$  відображається як на множину діагнозів  $\{D_i\}$ , так і на множину ознак, при цьому завданням СППРМ є визначення залежності  $X \rightarrow \{D_j\}$ .

В взаємозв'язаній багаторівневій системі, одна ознака  $x_i$  (її зміна або прояв) відображає зміну станів багатьох підсистем організму  $\{R_0, \dots, R_i, \dots, R_l\}$  (наприклад, така інтегральна ознака, як температура тіла проявляється при багатьох патологіях)  $\{s_{0j}^k, \dots, s_{ij}^k, \dots, s_{lj}^k\} \rightarrow x_i$ , а зміна стану однієї підсистеми реєструється зміною багатьох ознак  $s_{ij}^k \rightarrow \{x_0, \dots, x_i, \dots, x_k\}$ , тобто відношення

між  $\{s_{ij}^k\}$  і  $X$  мають тип "багато до багатьох", тому представлення системи ознак у вигляді вектора не відображає складності відносин  $\{s_{ij}^k\}$  і  $X$ .

Запропонований у роботі метод структурної ідентифікації ОД реалізується у вигляді ієрархічної системи інформативних діагностичних ознак мінімально необхідного обсягу. Процес постановка діагнозу є складним багатоетапним процесом прийняття рішення (від попереднього діагнозу до розгорнутого клінічного діагнозу). При цьому на різних етапах постановки діагнозу використовується система діагностичних ознак різного ступеня деталізації. Розроблена концептуальна модель об'єкта діагностики у вигляді взаємодії ієрархічних структур діагностичних ознак і діагнозів та вирішального правила на цій моделі, як показано на рис. 1.

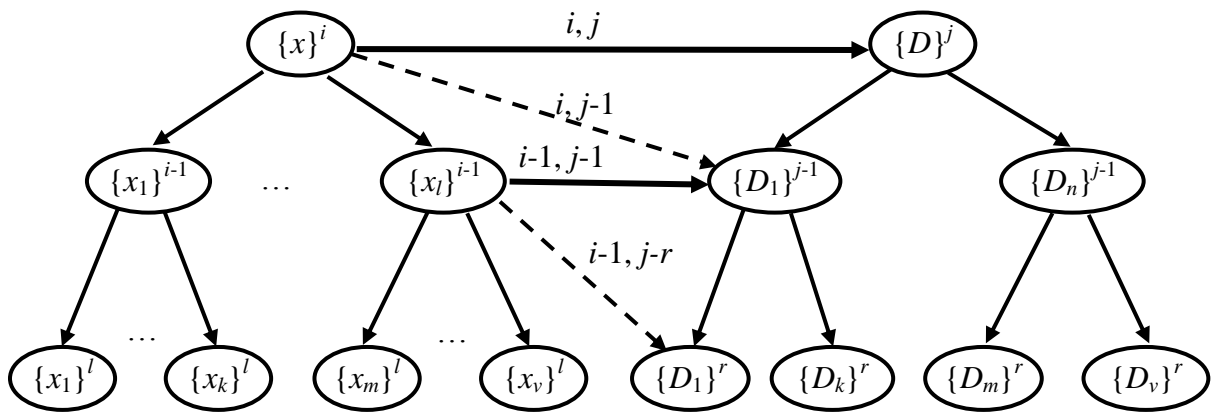


Рис. 1. Взаємодія ієрархій ознаки/діагнози

Для реалізації диференційної діагностики, ієрархічна структура діагнозів будується у вигляді бінарного дерева таким чином, що на нижньому рівні ієрархії присутні всі вихідні діагнози, а елементи ієрархії діагнозів більш високих рівнів являють собою класи захворювань різного рівня деталізації. Синтез бінарного дерева діагнозів виконується методом послідовної кластеризації вихідної множини діагнозів.

Ієрархічна структура діагностичних ознак повинна забезпечити ітераційну процедуру постановки діагнозу й задовольняти критеріям незалежності й інформаційної повноти, тому синтез зазначеної ієрархічної структури виконується в кілька етапів, при цьому на кожному етапі вирішується локальна оптимізаційна задача. Ставиться завдання розробки такої діагностичної процедури при взаємодії ієрархічних структур ознак і діагнозів, що враховує імовірнісний підхід, експертні оцінки про структуру симптомокомплексів, а також статистичні характеристики навчальної вибірки. Показники якості класифікації залежать від розташування еліпсоїдів розсіювання об'єктів, що належать зазначеним класам, як показано на рис. 2.

У випадку пересічення еліпсоїдів розсіювання, можна умовно виділити

області достовірного рішення (виділені цифрами 1, 2 для станів  $D_i$  і  $D_j$  відповідно) і область недостовірного рішення (виділена цифрою 3). Різні

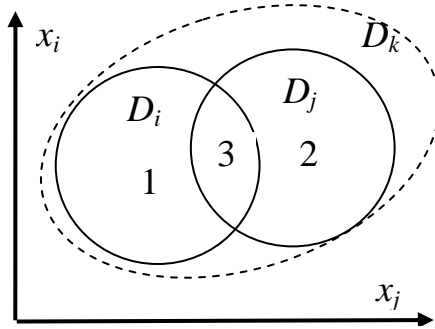


Рис. 2. Розміщення еліпсоїдів розсіювання

варіанти ВП мінімізують область 3 за різними критеріями класифікації  $Q_{\{D\}}$ . Для сильних рішень  $Y$ :  $Q_{\{D\}} \geq T$ , для слабких рішень  $Y'$ :  $Q_{\{D\}} < T$ , де  $T$  – поріг. Якщо в ВП використовується ітераційна процедура оптимізації  $Q_{\{D\}}$  (наприклад, метод послідовного аналізу, при якому послідовно збільшується число ознак, які аналізуються), то процес постановки діагнозу на  $i$ -му рівні ієрархії діагнозів є послідовністю слабких рішень, що приводить до сильного рішення

$P1: Y'_{i0} \rightarrow Y'_{i1} \rightarrow \dots \rightarrow Y'_{ij} \rightarrow \dots \rightarrow Y'_{in} = Y_i$ . Процес постановки уточнюючого діагнозу є послідовністю сильних рішень при підвищенні рівня ієрархії діагнозів  $P2: Y_0 \rightarrow Y_1 \rightarrow \dots \rightarrow Y_i \rightarrow \dots \rightarrow Y_m$ .

Однак, з врахуванням рис. 2, на кожному  $i$ -му кроці послідовності  $P2$ , для конкретного пацієнта послідовність слабких рішень  $P1$  може привести (точка попадає в область 1 або 2), а може не привести до сильного рішення (точка попадає в область 3). Тому виникає необхідність в розробці такої діагностичної процедури, при якій не тільки мінімізується ризик слабких рішень, але й при їхньому виникненні, виконується розщеплення слабких рішень шляхом аналізу альтернативного дерева рішень із метою одержання сильного рішення на максимально можливому рівні ієрархії.

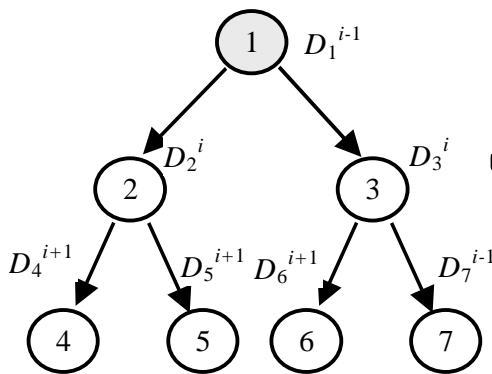


Рис. 3. Основне дерево рішень і еліпсоїди розсіювання

На рис. 3 показана частина бінарного дерева діагнозів і розташування еліпсоїдів розсіювання. Треба відмітити, що кластеризація вершин 2 і 3 на рис. 3 проводиться найкращим чином відносно критерію  $Q_D = Q_{2,3}$ , тобто область перетину вершин 2 і 3  $\Omega_{2,3}$  є мінімальною при всіх

можливих варіантах розбиття. Однак, причиною слабого рішення є попадання точки, яка характеризує пацієнта, що досліджується, в область перетину вершин 2 і 3, тобто  $Y' \in \Omega_{2,3}$ . Найбільш ймовірною причиною слабого рішення є попадання точки в ту з областей  $\Omega_{4,6}$ ,  $\Omega_{4,7}$ ,  $\Omega_{5,6}$ ,  $\Omega_{5,7}$ , що отримана при мінімальному критерії кластеризації  $Q_D$

$$Y' \in \Omega_{ij} = \underset{Q_D}{\operatorname{argmin}} \{Q_{4,6}, Q_{4,7}, Q_{5,6}, Q_{5,7}\}. \quad (1)$$

Після визначення  $\Omega_{ij}$  по (1), починаючи від вершини 1, будується альтернативне дерево рішень, у якому вершини  $i$  і  $j$  поєднуються в один кластер. Основне й альтернативне дерева рішень відрізняються на  $i$ -му рівні (додається два альтернативних нащадки), інші рівні збігаються. На основі відзначеної вище концептуальної моделі ОД виконана формалізація локальних підзадач і відповідних їм етапів перетворення інформації в СППРМ: 1) структурна ідентифікація біосигналів і зображень; 2) формалізація опису різнорідних діагностичних ознак; 3) синтез ієрархічної структури діагнозів; 4) синтез ієрархічної структури діагностичних ознак; 5) синтез діагностичного ВП; 6) синтез індивідуальних діагностичних прогнозуючих моделей; 7) рекомендації з вибору оптимальної методики лікування.

Введено поняття розширеної структурованої моделі ОД, що задається в такий спосіб

$$C' = \{S, \Phi, E, \varepsilon_\sigma, \varepsilon_\Delta\}, \quad (2)$$

де  $S = \{P, V\}$  – структура моделі, що задана множинами вершин  $P$  і дуг  $V$ ;  $\Phi$  – функціональний базис моделі, причому функції можуть приписуватися як вершинам  $\Phi_p$ , так і дугам  $\Phi_v$ ;  $E$  – експертні оцінки, які при необхідності доповнюють  $\Phi$  компоненти;  $\varepsilon_\sigma$  – невизначеність параметрів  $\Phi$ -базису, що визначається статистичними властивостями навчальної вибірки;  $\varepsilon_\Delta$  – невизначеність параметрів  $\Phi$ -базису, що визначається точністю їхнього завдання (кроком квантування).

Значення  $\varepsilon_\sigma$  використовується не тільки як оцінка параметрів моделі (традиційний підхід), але і є критерієм оптимальності оптимізаційних процедур при синтезі моделі. Так як деякі алгоритми оптимізації вимагають квантування параметрів моделі, то виникає завдання вибору типу квантування (рівномірного або нерівномірного) і відповідного кроку квантування, тому  $\varepsilon_\Delta$  є вихідним параметром оптимізаційних процедур.

При реалізації послідовності етапів перетворення інформації, на кожному з яких використовується критерій  $Q_i$ , виконується реконфігурація структури  $S_{i-1}$  на  $i$ -му етапі перетворення інформації шляхом структурних і функціональних перетворень. У загальному виді реконфігурація структури  $S$  представлена перетворенням  $X \xrightarrow{Q_1} S_1 \xrightarrow{Q_2} S_2 \xrightarrow{Q_3} \dots \xrightarrow{Q_n} S_n$ .

Реалізація методу структурної ідентифікації на основі застосування  $C'$  моделей виду (2) застосовується на наступних етапах перетворення інформації: 1 – структурована модель еталона структурного елемента БКС; 3, 4 – структуровані моделі діагностичних ознак і станів що діагностуються. Реконфігурація структури діагностичних ознак виконується на етапі 4.

У третьому розділі формалізована задача структурної ідентифікації БКС на основі синтезу структурованої моделі еталона структурного елемента формальними методами при структурній ідентифікації БКС різних типів. Відзначено, що основні труднощі етапу обробки БКС виникають при виділенні діагностичних структурних елементів на тлі завад, варіабельності та наявності артефактів. Помилки структурної ідентифікації (пропуск структурного елемента або помилкова ідентифікація) приводять до грубих помилок обчислення діагностичних ознак і помилок комп'ютерного діагнозу (якщо не передбачені спеціальні засоби, зокрема відмова від обробки "підозрілого" структурного елемента або підтвердження людиною-оператором правильності структурної ідентифікації). У роботі розроблена формалізована процедура ідентифікації структурних елементів БКС на основі побудови інформативного простору параметрів (перетворення  $X \rightarrow Y$ ) з використанням методології й обчислювальних процедур перетворення Хока.

Класичне застосування перетворення Хока полягає в апроксимації контурних точок двовимірних двохградаційних зображень аналітичними кривими. При цьому кожна  $i$ -та точка вихідного зображення переводиться в простір параметрів (коефіцієнтів апроксимуючої кривої) і утворює у ньому підпростір допустимих значень параметрів  $M_i$ . Область перетину  $\Omega$  підпросторів  $M_i$  для всіх контурних точок визначає істинне значення параметрів. При структурній ідентифікації БКС виконується перехід з вихідного простору (множини відліків сигналу  $X(t_i)$ ) в простір параметрів  $Y(P)$ , який формується при описі еталона структурного елемента обмеженим набором базисних опорних функцій (апроксимація еталона). Порівняння аналізованої ділянки сигналу з еталоном і прийняття рішення про наявність або відсутність структурного елемента заданого типу виконується в просторі параметрів.

Розглянутий БКС являє собою, гратчасту функцію  $x[t \times \tau_{кв}] = x_t$ , де  $x_t$ ,  $t = \overline{1, w}$  – амплітуди сигналу в точках дискретизації. При перетворенні  $X \rightarrow Y$  у новому просторі параметрів  $Y$  кожний структурний елемент  $\omega_p$  буде описаний деяким вектором  $y^{\omega_p} = (y_1^{\omega_p}, y_2^{\omega_p}, \dots, y_{N_y}^{\omega_p})$ , при цьому параметри  $y_j^{\omega_p}$  визначаються функціональною залежністю:

$$y_j^{\omega_p} = f_k(\{x_i^{\omega_p}\}_j), \quad i = \overline{1, N_x}, \quad j = \overline{1, N_y}, \quad (3)$$

де  $k$  – тип (номер) функціональної залежності;  $\{x_i^{\omega_p}\}_j$  –  $j$ -та підмножина параметрів (координат) об'єкта  $\omega_p$ ;  $N_x$ ,  $N_y$  – кількість параметрів структурного елемента  $\omega_p$  в просторах  $X$  і  $Y$  відповідно, причому  $N_y < N_x$ .

Функціональна залежність (3) вибирається з множини базисних функцій (графічних примітивів), до яких пред'являються наступні вимоги: простота,

інформативність, селективність.

Пошук інформативних фрагментів БКС виконується послідовною процедурою відділення структурних елементів заданого типу від всіх інших об'єктів. Еталон структурного елемента  $\omega^3$  задається шляхом вибору на сигналі границь підмножин, які характеризуються опорними точками  $x_i^{\omega^3}$ ,  $i \in \overline{1, N_x}$ . В просторі параметрів  $Y$  еталон  $\omega^3$  описується вектором  $y^{\omega^3} = (y_1^{\omega^3}, y_2^{\omega^3}, \dots, y_{N_y}^{\omega^3})$ , де параметри  $y_j^{\omega^3}$  розраховуються аналогічно (3) згідно виразу  $y_j^{\omega^3} = f_k(\{x_t^{\omega^3}\}_j)$ ,  $j = \overline{1, N_y}$ . Завдання еталонного об'єкта  $\omega^3$  дозволяє визначити клас шуканих структурних елементів  $\Omega_1$ , вид опорної функції для перетворення  $X \rightarrow Y$  і розмірність простору  $Y$ .

Для визначення відстаней між будь-якими об'єктами  $\omega_a$  й  $\omega_b$  у просторі  $Y$ , введена метрика  $d(\omega_a, \omega_b)$ , в основі якої лежить ідея методу потенційних функцій

$$d(\omega_a, \omega_b) = \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \alpha \sum_{j=1}^{N_y} w_j (y_j^{\omega_a} - y_j^{\omega_b})^2}}, \quad (4)$$

де  $y_j^{\omega_a}$ ,  $y_j^{\omega_b}$  – координати об'єктів  $\omega_a$  і  $\omega_b$  в просторі  $Y$  відповідно;  $\alpha > 0$  – коефіцієнт, від якого залежить швидкість зміни відстані між об'єктами  $\omega_a$  й  $\omega_b$  при збільшенні їхньої відмінності в просторі  $Y$ ;  $w_j$  – вагові коефіцієнти;  $N_y$  – розмірність простору  $Y$ .

У загальному випадку, коли немає емпіричних даних про часове розташування початку кожного структурного елемента заданого класу, кожна точка  $t$  сигналу  $x[t \times \tau_{кв}] = x_t$  розглядається як початок  $t_i^{\omega_t}$  структурного елемента  $\omega_t$ . Значення відстаней від об'єкта  $\omega_t$  у просторі  $Y$  з метрикою  $R$  до еталона  $\omega^3$ , з урахуванням часової прив'язки об'єкта  $\omega_t$  (робота в розширеному просторі  $Y(P, t_i)$ ), у вихідній часовій області характеризується деякою функцією диференціації відстаней  $D(t_i) = f_r(\omega^3, \omega_t, R) = d(\omega^3, \omega_t)$ , яка обчислюється по (4) в кожній точці  $t_i$ .

Графічна ілюстрація побудови інтервалів належності  $\tau_i$  при аналізі функції  $D(t_i)$  показана на рис. 4. На основі аналізу  $D(t_i)$  у вихідній часовій області будуються інтервали розташування структурних елементів  $\tau_i$  (виконується розмітка сигналу). При виділенні опорних структурних елементів використовується аналіз  $D(t_i)$ , як показано вище. Для структурних елементів класів  $\Omega_2, \dots, \Omega_n$  використовується метод адаптивної часової маски, що

заснований на гіпотезі збереження порядку слідування й відношень тривалостей інтервалів  $\tau_i$  у межах періоду й незначній зміні тривалостей сусідніх періодів.

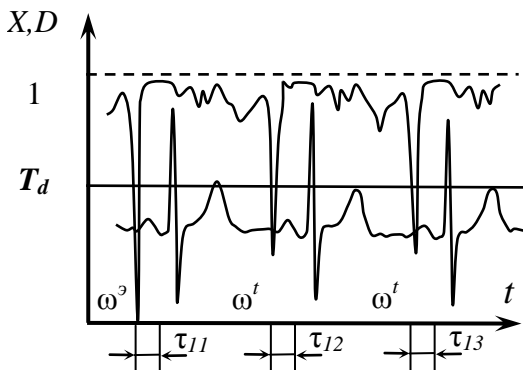


Рис. 4. Ідентифікація структурних елементів при аналізі  $D(t)$

Крім того, апіорі відомі середні значення тривалостей  $\tau_i$  і їхні діапазони варіювання для кожного типу БКС. Параметрами часової маски є відстані на часовій осі від центрів структурних елементів до опорної точки періоду. В якості опорної точки, для кожного типу БКС, вибирається точка (як правило, вершина) того структурного елемента який найбільш надійно виділяється на тлі завад і артефактів (структурний елемент даного

типу виділяється першим при структурній ідентифікації).

Застосування часової маски в методі структурної ідентифікації БКС, здійснюється шляхом побудови деякої квазіперіодичної ймовірнісної функції  $P^i(t)$ , що характеризує ймовірність розташування структурних елементів заданого типу на часовій осі (рис. 5).

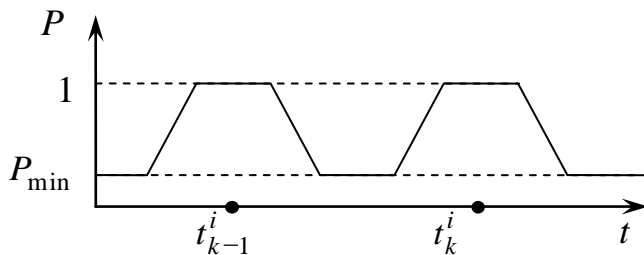


Рис. 5. Ймовірнісна функція для  $i$ -го типу структурного елемента БКС

Використання ймовірнісної функції  $P^i(t)$  можливо декількома способами: 1) значення ймовірнісної функції  $P^i(t)$  виступає в якості додаткової координати в просторі  $Y$ ; 2) ймовірнісна функція  $P^i(t)$  накладається на функцію диференціації відстаней

$D^k(t_i) = 1 - P^i(t) [1 - D(t_i)]$ , де  $D(t_i)$ ,  $D^k(t_i)$  – значення функції диференціації відстаней до й після корекції відповідно. З огляду на розглянуті раніше властивості  $D(t_i)$ , ВП має вигляд:

$$\omega_t \in \begin{cases} \Omega_1, & \theta(\omega_t, P_d) = P_d - M_\xi > 0; \\ \Omega_2, & \theta(\omega_t, P_d) = P_d - M_\xi \leq 0, \end{cases} \quad (5)$$

де  $\omega_t$  – об'єкт, що підлягає класифікації;  $P_d$  – порогове значення відстані;  $M_\xi$  – значення локального мінімуму  $D(t_i)$ .

Розроблено процедуру обчислення порогового елемента  $P_d$ , який мінімізує сумарну помилку класифікації. Сигнал БКС має стійкість статистичних характеристик (отже, і стійкість параметрів структурних елементів) у локальній області, а при тривалому моніторингу зазначені характе-



ристики можуть істотно мінятися. Сказане вище говорить на користь розробки адаптивного методу формування "точок згущення", при якому центри кластерів і ВП визначаються поточною ділянкою БКС і функції  $D(t_i)$  відповідно. У роботі пропонується метод побудови адаптивного значення параметра  $T_d(t)$ , заснованого на визначенні "точок згущення" при аналізі  $D(t_i)$ . Розроблено параметричну й структурну оптимізацію опису еталона й ВП.

Показано адаптацію методу структурної ідентифікації БКС для структурної ідентифікації двовимірних зображень (ідентифікація двовимірних діагностичних структурних елементів). Адаптація зводиться до опису двовимірних еталонів різними типами просторових адаптивних розгортки, при яких виконується перехід з вихідної прямокутної системи координат  $i, j$  ( $X_{ij}$  – значення яскравості зображення в прямокутній системі координат) у простір  $l$  ( $X_l$  – значення яскравості зображення уздовж лінії розгортки). Показано перспективність використання спіральної розгортки, яка забезпечує інваріантність відносно повороту для широкого класу двовимірних структурних елементів. Функція  $X_l$  використовується, як і при аналізі БКС, для формування простору параметрів  $Y(P)$ . На відміну від традиційної схеми структурної ідентифікації двовимірних зображень (фільтрація, оконтурювання, пошук структурних елементів), запропонований підхід забезпечує завдання еталона безпосередньо на напівтоновому зображенні.

У **четвертому розділі** виконується синтез структурованих моделей діагностичних ознак і діагнозів. При цьому реалізуються перетворення  $F1: X \rightarrow S_x^a$ ,  $F2: D \rightarrow S_D^a$ ,  $F3: S_x^a \rightarrow S_y$ ,  $F4: S_y \rightarrow S_z$ . Перетворення  $F1, F2$  – синтез ієрархічних структур ознак і діагнозів на основі ієрархічної кластеризації, а перетворення  $F3, F4$  – реконфігурація структури.

*Ієрархічна кластеризація* ознак (перетворення  $F1$ ) заснована на представленні задачі кластеризації у вигляді потокової моделі. При цьому вихідні ознаки представляються вершинами повнозв'язного графа, а дугам такого графа приписуються деякі чисельні дані (коефіцієнт парної кореляції, хоча можливо застосування інших статистичних мір зв'язку). Тоді задача ієрархічної кластеризації вершин зводиться до послідовної процедури розрізу графа на підграфи таким чином, щоб досягти максимального зв'язку вершин усередині класу (підграфа) при мінімальному зв'язку між класами. При такому формулюванні, задача зводиться до потокової, для рішення якої пропонується адаптація алгоритму "дефекту", що ефективно застосовується для рішення поточкових задач з обмеженнями.

У поточкових задач з обмеженнями, кожна дуга  $V_{ij}$  характеризується наступними параметрами:  $f_{ij}$  – потік по дузі;  $L_{ij}$  – нижня пропускна спроможність дуги;  $U_{ij}$  – верхня пропускна спроможність дуги;  $C_{ij}$  – вартість проходження одиниці потоку з вузла  $i$  у вузол  $j$ .

Для розглянутої задачі кластеризації діагностичних ознак у якості  $L_{ij}$

приймається значення, рівне 0, у якості  $U_{ij}$  – значення критерію автоінформативності (коефіцієнт парної кореляції  $r_{ij}$ ). Значення  $C_{ij}$  при відсутності апріорної інформації приймається рівним 1 для всіх дуг, а при її наявності встановлюються за допомогою експертних оцінок. Значення потоків  $f_{ij}$  визначаються після завершення роботи алгоритму ”дефекту”, спочатку вони можуть бути рівні 0. Для зниження розмірності задачі розглядаються тільки ті дуги, у яких  $r_{ij}$  є значимим відносно критерію Стюдента.

Для роботи алгоритму “дефекту” необхідно завдати початкову  $S$  та кінцеву  $T$  вершини, а результатом його роботи є розрахунок циркуляції потоків, яка мінімізує сумарну вартість потоків по всіх дугах з урахуванням обмежень на пропускні спроможності дуг ( $L_{ij}$  і  $U_{ij}$ ). Завдання  $S$  і  $T$  виконується на основі попередньої кластеризації вершин по методу кореляційних плеяд, при якому вихідна множина вершин  $N_i$  розпадається на дві підмножини  $N_s$  і  $N_t$ , які не пересікаються, і в кожній з них визначається найбільш зв'язана з іншими вершинами ( $s \in N_s$  і  $t \in N_t$ ), що задовольняє умові  $N_i = \max_i \sum_j U_{ij}$ , причому

$s = N_i \forall i, j \in N_s$  та  $t = N_i \forall i, j \in N_t$ . Після визначення потоків на всіх дугах визначається мінімальний розріз графа  $R$ , для якого справедливі співвідношення:

$$f_{ij} = U_{ij} \text{ для } V_{ij} \in (N_s, N_t), \quad (6)$$

$$f_{ij} = 0 \text{ для } V_{ij} \in (N_t, N_s). \quad (7)$$

Мінімальний розріз розділяє всі вершини графа на дві множини, які не пересікаються ( $N_s$ , яка включає початкову вершину  $S$  і  $N_t$ , яка включає кінцеву вершину  $T$ ) таким чином, що потоки насичують всі прямі дуги розрізу (6) і нульові на всіх зворотних дугах розрізу (7). При цьому сума потоків всіх дуг розрізу дорівнює максимальній циркуляції потоку. Запропоновано критерій лінійної кластеризації, заснований на оцінці зміни внутрішньокласової відстані до розбивки  $R^{l-1}$  і після розбивки  $R^l$  на два класи  $R^l / R^{l-1} > P$ , де  $R = \sum_i \sum_j r_{i,j} / M^2$  – зважений коефіцієнт парної кореляції між  $M$  вершинами підграфа,  $P$  – поріг, який визначається експериментально для конкретної предметної області. В якості додаткового критерію рекомендується обмежитися числом кластерів  $K_{max} = 7$ .

Для реалізації ієрархічної кластеризації необхідна розробка інтегрального критерію оптимальності  $K^{opt}$  синтезованої ієрархічної структури, згідно якого міняється значення порогового елемента  $P_m$  на кожному  $m$ -му рівні ієрархії  $P_m = K^{opt} = k^{exp} k^{str} k^p$ , де  $k^{exp}$  – експертна оцінка,  $k^{str}$  – коефіцієнт структурної складності (залежить від рівня ієрархії) і  $k^p$  – граничне значення зміни  $P$  при переході на наступний рівень ієрархії (може бути обчислено, використовуючи

зовнішній критерій інформативності). В результаті ієрархічної кластеризації синтезується ієрархічна структура, на нижньому рівні ієрархії якої можуть бути як окремі діагностичні ознаки (якщо вони інформативні й незалежні), так і кластери корельованих ознак.

Синтез ієрархічної системи діагнозів  $F2: D \rightarrow S_D^a$  виконується за аналогічною схемою представлення задачі в вигляді потокової моделі з обмеженнями й пошуку мінімального розрізу. Однак, є наступні відмінності: у якості  $U_{ij}$  використовується міжкластерна відстань діагнозів  $D_i$  і  $D_j$  у просторі ознак; виконується дихотомічна кластеризація без стиску, тому розглянуті вище критерії лінійної кластеризації й оптимальності в даній процедурі не використовуються.

*Реконфігурація структури діагностичних ознак* (перетворення  $F3$ ). Структура  $S_x$  не може безпосередньо використовуватися в діагностичній процедурі уточнюючого діагнозу, тому що результуюча структура  $S_z$  повинна містити мінімально-необхідний обсяг інформативних діагностичних ознак для заданої задачі діагностики (заданої множини діагнозів), структура повинна бути погоджена зі структурою  $S_D$  і повинна бути розроблена процедура заміни кластерів всіх рівнів ієрархії  $S_x$ . Тому в роботі ставиться задача реконфігурації структури  $S_x - F3: S_x \rightarrow S_y$ , за критерієм  $I_D(x_j)$  – діагностичної цінності ознак  $x_j$  відносно заданої множини станів, що діагностуються  $\{D_i\}$ . Діагностична цінність  $I_D(x_j)$  числової ознаки  $x_j$  за умови розбивки її діапазону зміни на  $m$  інтервалів, що не пересікаються, відносно  $\{D_i\}$  визначається за виразом

$$I_D(x_j) = \sum_{i=1}^n P(D_i) \sum_{k=1}^m P(x_{jk} / D_i) \cdot \log_2 \frac{P(x_{jk} / D_i)}{P(x_{jk})}. \quad (8)$$

Сумарна інформативність системи незалежних ознак  $I_D(X)$  визначається за виразом

$$I_D(X) = \sum_{j=1}^p I_D(x_j). \quad (9)$$

Так як синтез структури  $S_x$  забезпечує слабкий зв'язок між ознаками, то в цьому випадку можна використати в розрахунках вираз (9).

Заміна діапазону зміни числової ознаки  $\Delta = [x_{jmin}, x_{jmax}]$  послідовністю інтервалів, є по суті заміною теоретичного закону розподілу гистограмою, і із цього погляду для одержання прийнятної точності апроксимації закону розподілу, число інтервалів повинне бути достатньо великим, однак при цьому необхідно збільшувати обсяг навчальної вибірки, тому що при незмінному обсязі вибірки й збільшенні числа інтервалів у кожний з них попадає порівняно невелике число точок, що знижує достовірність статистичних оцінок. Таким чином, при обмеженому обсязі навчальної вибірки, задача розбивки  $\Delta$  на

інтервали є оптимізаційною задачею, при якій мінімізується інтегральна помилка  $\varepsilon_k$ , що включає  $\varepsilon_a$  – помилка апроксимації й  $\sigma$  – невизначеність оцінки значень  $P(x_{jk}/D_i)$ ,  $P(x_{jk})$  на інтервалі  $\Delta_k$ .

В роботі отримано формулу оцінки  $\varepsilon_k$  при розбивці  $\Delta$  на  $m$  нерівномірних інтервалів  $\Delta_k$  і побудові відповідних гістограм

$$\varepsilon_k = \frac{\Delta_k}{\sqrt{6N_k}} \sqrt{\left(\frac{G_{k+1} - G_k}{\Delta_{k+1} + \Delta_k}\right)^2 + \left(\frac{G_k - G_{k-1}}{\Delta_k + \Delta_{k-1}}\right)^2}, \quad (10)$$

де  $N_k$  – число точок навчальної вибірки, що потрапили в інтервал  $\Delta_k$ ;  $G_k$  – ордината гістограми на інтервалі  $\Delta_k$ .

Обчислення  $\varepsilon_k$  по (10) вимагає попередньої розбивки  $\Delta$  на  $\Delta_k$  і обчислення значень не тільки в поточному  $k$ -му інтервалі ( $\Delta_k$  і  $G_k$ ) але й у сусідні ( $\Delta_{k-1}$ ,  $G_{k-1}$ ,  $\Delta_{k+1}$ ,  $G_{k+1}$ ). Запропоновано ітераційну процедуру формування  $\Delta_k$ , при якій мінімізується  $\varepsilon_k$ .

Таким чином, у результаті перетворення  $F3$  визначається інформативність вихідного простору ознак  $X$  відносно системи діагнозів  $\{D\}$ , виконується заміна кластерів нижнього рівня ієрархії структури  $S_x$  (підмножини коррельованих ознак) найбільш інформативним і виконується заміна кластерів інших рівнів  $S_x$  інтегральними ознаками. Крім того, при синтезі  $S_y$ , система різнорідних елементів  $S_x$  приводиться до єдиної шкали – кожна вихідна ознака  $x_j$  представляється множиною діагностично-значимих інтервалів, які не пересікаються.

Метою перетворення  $F4$ :  $S_y \rightarrow S_z$  є узгодження топологій  $S_z$  і  $S_D$  для реалізації методу уточнюючого діагнозу й забезпечення оптимального плану діагностичного обстеження конкретного пацієнта. При цьому, кожній парі елементів  $S_D$ , що має загального батька, ставиться у відповідність один елемент структури  $S_z$ . Елементи структури  $S_z$  формуються з елементів структури  $S_y$  з врахуванням їхньої інформаційної повноти  $k_{\text{ин}}(X, D)$  і діагностичної цінності  $k_{\text{дц}}(x_j, D)$  для диференційної діагностики елементів  $S_D$  на кожному рівні ієрархії.

Система діагностичних ознак  $X$  відносно системи діагнозів  $D$  характеризується коефіцієнтом інформаційної повноти  $k_{\text{ин}}(X, D)$ , що визначається по формулі  $k_{\text{ин}}(X, D) = I_D(X)/H(D)$ , де  $H(D)$  – ентропія діагнозів.

Так як процес виміру діагностичних ознак вимагає певного медичного обладнання й ресурсів (часових, матеріальних, фінансових і т.д.), то з урахуванням сумарної складності виміру ознаки, кожна ознака характеризується коефіцієнтом діагностичної цінності  $k_{\text{дц}}(x_j, D) = k_{\text{ин}}(x_j, D)/r_t(x_j)$ , де  $r_t(x_j)$  – сумарна оцінка складності виміру ознаки  $x_j$ . Розроблено процедуру формування елементів структури  $S_z$ , починаючи з елемента верхнього рівня  $S_D$ , у якій розраховується ентропія  $H(D)$ , а для всіх елементів  $S_y$  визначається  $k_{\text{дц}}(x_j, D)$  відносно пари станів що

діагностуються, і елементи структури  $S_y$  упорядковуються відповідно до  $k_{\text{ди}}(y_i) \geq k_{\text{ди}}(y_j) \geq \dots \geq k_{\text{ди}}(y_q)$ . Таким чином, кожний елемент структури  $S_z$  є впорядкованою підмножиною елементів структури  $S_y$ , який забезпечує необхідний рівень інформаційної повноти  $k_{\text{ин}}(X, D)$ , і однозначно задає їхній порядок включення в діагностичну процедуру уточнюючого діагнозу на кожному етапі реалізації.

У п'ятому розділі розглядаються методи синтезу ВП при реалізації розглянутих етапів перетворення інформації.

*Розробка комбінованого ВП при взаємодії ієрархічних структур.* У роботі реалізується метод синтезу уточнюючого діагнозу, що є модифікацією методу послідовного аналізу й заснований на аналізі взаємодії ієрархічних структур діагностичних ознак  $S_z$  і діагнозів  $S_D$ . На кожному  $i$ -му етапі послідовного аналізу, при диференційній діагностиці між двома діагнозами  $D_q$  і  $D_l$ ,

обчислюється відношення правдоподібності  $\Theta = \prod_i \frac{P(x_{ik}/D_q)}{P(x_{ik}/D_l)}$ , яке

порівнюється з порогами  $\Theta > A$ ,  $\Theta < B$ , де  $A$  і  $B$  – верхня й нижня границі невизначеності, необхідні для ухвалення рішення.

При виконанні однієї з умов приймається рішення про діагноз  $D_q$ , або  $D_l$  відповідно й виконується уточнення діагнозів на більш низькому рівні ієрархії  $S_D$ . При невиконанні жодного умови, додається наступна  $i+1$  ознака й процедура повторюється.

Однак, як показано в розділі 4, "дійсні" умовні ймовірності, які використовуються в відношенні правдоподібності, замінюються їхніми оцінками – ординатами гістограм  $G(x_{ik}/D_q)$  і  $G(x_{ik}/D_l)$ , які мають відповідні невизначеності  $\varepsilon_{ik}^q$  і  $\varepsilon_{ik}^l$ , що обчислюються по (10), (верхній індекс відповідає індексу стану, що діагностується, а нижні індекси –  $k$ -й інтервал  $i$ -ї ознаки, що виміряна у пацієнта). При заданому рівні значимості  $\xi$  (зазвичай  $\xi = 0,95$  або  $\xi = 0,99$ ) з використанням таблиць критичних значень розподілу Стюдента визначаються довірчі інтервали  $G(x_{ik}/D_q)$  і  $G(x_{ik}/D_l)$  ( $\delta_{ik}^q$  і  $\delta_{ik}^l$  відповідно)  $\delta_{ik} = t_{\xi, \lambda} \varepsilon_{ik}$ , де  $t$  – критичне значення розподілу Стюдента при рівні значимості  $\xi$  і числі ступенів свободи  $\lambda$  ( $\lambda = n - 1$ ), що дозволяє визначити верхні й нижні значення  $G(\cdot)$  ( $G_B(\cdot)$  і  $G_H(\cdot)$  відповідно) за допомогою виразів

$$\begin{aligned} G_B(x_{ik}/D_q) &= G(x_{ik}/D_q) + \delta_{ik}^q, & G_H(x_{ik}/D_q) &= G(x_{ik}/D_q) - \delta_{ik}^q, \\ G_B(x_{ik}/D_l) &= G(x_{ik}/D_l) + \delta_{ik}^l, & G_H(x_{ik}/D_l) &= G(x_{ik}/D_l) - \delta_{ik}^l. \end{aligned} \quad (11)$$

Для реалізації комбінованого ВП оцінки умовних ймовірностей зважуються системою експертних оцінок про структуру симптомокомплексів  $E_{ikq}$  і  $E_{ikl}$ . Це приводить до того, що умовні ймовірності тих діагностичних інтервалів  $x_{ik}$  які входять у симптомокомплекс зазначеного діагнозу збільшуються, а тих ознак, які не входять у симптомокомплекс, зменшуються (у граничному випадку, коли вага ознак, які не входять у симптомокомплекс

$e_0 = 0$ , умовні ймовірності зазначених ознак не враховуються). Варіюючи значеннями ваг  $e_i$  можна задавати різний ступінь впливу окремих типів ознак, що входять у симптомокомплекс. В остаточному виді відношення правдоподібності з врахуванням (11) запишеться у вигляді:

$$\Theta_H = \prod_i \frac{E_{ikq} G_H(x_{ik} / D_q)}{E_{ikl} G_B(x_{ik} / D_l)}, \quad (12)$$

$$\Theta_B = \prod_i \frac{E_{ikq} G_B(x_{ik} / D_q)}{E_{ikl} G_H(x_{ik} / D_l)}, \quad (13)$$

а нерівності записуються у вигляді "песимістичних" оцінок

$$\Theta_H > A, \quad \Theta_B < B.$$

*Синтез індивідуальних діагностичних прогнозуючих моделей.* При проведенні моніторингу показників здоров'я кожного пацієнта, можна побудувати прогнозуючу діагностичну модель і виконати прогноз показників здоров'я з метою виявлення негативних тенденцій їхніх змін, функціональних порушень на ранніх стадіях їхнього розвитку, оцінку ефективності проведених лікувально-оздоровчих процедур і ін. У роботі прогнозуюча діагностична регресійна модель будуються на основі методів самоорганізації, які дозволяють визначити оптимальну структуру моделі й оцінити її коефіцієнти по невеликому числу експериментальних даних.

*Оцінка альтернатив при виборі оптимальної методики лікування й реалізації етапів проектування СППРМ.* При реалізації різних етапів перетворення інформації в СППРМ виникає проблема оптимального вибору й обґрунтування альтернатив, які застосовуються (критеріїв, математичних методів і моделей).

Розроблено систему експертної оцінки альтернатив на різних етапах на основі застосування методу аналізу ієрархій (МАІ), який заснований на декомпозиції проблеми й ієрархічному представленні її складових частин для подальшого аналізу суджень експерта, висунутих по парних порівняннях елементів. По складеній ієрархії рішення задачі формуються матриці парних порівнянь (МПП), елементами яких ( $a_{ij}$ ) є результати парних порівняння елементів більш низького рівня (на нижньому рівні – порівняння альтернатив). По отриманим МПП обчислюються локальні пріоритети

$$w_i = \sqrt[N]{\prod_{j=1}^N a_{ij}} / \sum_{l=1}^N \sqrt[N]{\prod_{k=1}^N a_{lk}}, \quad (14)$$

де  $N$  – кількість порівнюваних об'єктів,  $a_{ij}, a_{lk}$  – ступінь переваги параметрів.

Для трьохрівневої ієрархії, при порівнянні  $m$  альтернатив по  $n$  локальних

критеріях, формується матриця локальних пріоритетів нижнього рівня  $W^1$  розмірністю  $m \times n$  елементів і вектор-стовпець верхнього рівня  $W^2$  розмірністю  $n$  елементів. Елементи  $W^1$  і  $W^2$  визначаються по (14) для відповідних МПП. Слід зазначити, що кожний  $j$ -й стовпець матриці  $W^1$  відповідає своєму локальному критерію  $f_j$  (обчислюється по  $j$ -й МПП першого рівня), а кожний  $i$ -й рядок матриці  $W^1$  відповідає  $i$ -й альтернативі.

Вектор глобальних пріоритетів альтернатив  $W^g$  розмірністю  $m$  елементів визначається множенням відповідних локальних пріоритетів різних рівнів ієрархії згідно виразу  $W^g = W^1 \times W^2$ .

Остаточним рішенням є та альтернатива  $A_i$ , для якої елемент вектора глобальних пріоритетів є максимальним  $W_i^g \rightarrow \max$ . Для кожного етапу перетворення інформації розроблений набір альтернатив і критерії їхнього порівняння, що дозволяє застосувати МАІ для розглянутої задачі.

**У шостому розділі** розроблена структура програмного забезпечення й виконана апробація розроблених інформаційних технологій.

*Розробка структурної схеми СППРМ.* Для програмної реалізації розглянутих раніше математичних методів структурної ідентифікації ОД, СППРМ повинна працювати у двох режимах: режим навчання й робочий режим постановки діагнозу. У режимі навчання виконується формування бази знань (БЗ), у процесі якого виконується синтез і налагодження параметрів структурованих моделей структурних елементів БКС і медичних зображень, діагностичних ознак і станів, що діагностуються, комбінованого ВП. У режимі постановки діагнозу виконується аналіз біологічної інформації, отриманої від пацієнта й формування діагностичного висновку. На рис. 6 показана структурна схема СППРМ, у якій суцільними стрілками показані інформаційні потоки в режимі навчання, а пунктирними – у режимі постановки діагнозу.

Призначення модулів наступне: БД, що зберігає результати обстежень пацієнтів і верифікацію діагностичного висновку. Слід зазначити, що при аналізі БКС і медичних зображень, у БД зберігаються як вихідні сигнали, так і результати їхньої структурної ідентифікації й сформована множина вторинних діагностичних ознак; БЗ, що зберігає параметри відзначених раніше структурованих моделей ОД; модуль введення переліку діагностичних ознак, станів, що діагностуються і експертних оцінок структур симптомкомплексів; модуль введення значень первинних діагностичних ознак; модулі введення БКС і медичних зображень (МЗ); модуль синтезу структурованих моделей структурних елементів БКС і МЗ; модуль синтезу структурованої моделі станів що діагностуються; модуль синтезу й реконфігурації структурованої моделі діагностичних ознак; модуль реалізації комбінованого ВП; модуль формування вихідних екранних форм і документів, а також реалізації інтерактивного інтерфейсу із ОПР.

*Апробація розроблених інформаційних технологій і результати*

експериментів. Тестова перевірка методу структурної ідентифікації БКС виконувалася на прикладі виділення кардіологічних зубців і комплексів ЕКГ.

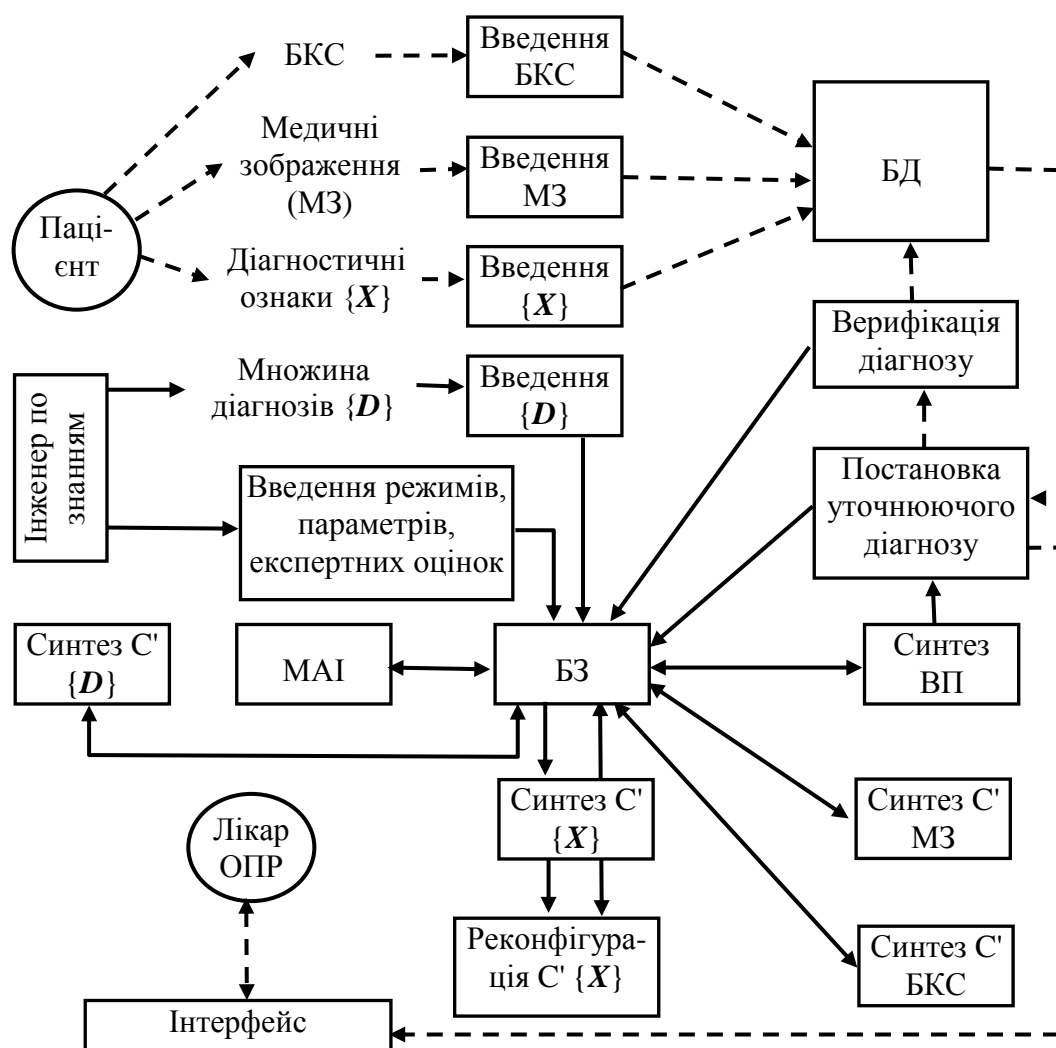


Рис. 6. Структурна схема СППРМ

Здійснювалася перевірка впливу точності дискретизації простору параметрів при використанні перетворення Хока, точності завдання границь еталону структурного елемента на результат структурної ідентифікації, оцінка якості структурної ідентифікації при використанні різних видів графічних примітивів, а також розглянуті особливості структурної ідентифікації різних відведень ЕКГ. При дослідженні впливу кроку квантування простору параметрів на якість структурної ідентифікації БКС, показано, що при застосуванні перетворення Хока для структурної ідентифікації БКС доцільно проводити квантування простору параметрів із кроком, значення якого лежить у межах від 50 до 200, при діапазоні зміни значень координат  $[-500, 500]$ .

Для перевірки впливу точності завдання граничних точок еталона  $\omega^3$  на якість класифікації був проведений ряд експериментів по виділенню інформативних фрагментів грудного відведення V4 ЕКГ. При цьому розставлені опорні точки еталонів кардіологічних зубців  $P$  і  $T$ , а також



комплексу *QRS* зрушувалися по часовій осі на 10-15% від ширини відповідного еталона. Результати експериментів показали, що типові помилки оператора (до 10-15%) при завданні еталонного об'єкту істотно не впливають на якість структурної ідентифікації БКС.

Для перевірки ефективності методу структурної ідентифікації БКС був проведений порівняльний аналіз виділення інформативних фрагментів стандартних відведень ЕКГ за допомогою розробленого методу й за допомогою евристичного алгоритму, реалізованого в медичній комп'ютерній діагностичній системі «DX-Systems». При цьому, середня помилка класифікації об'єктів за допомогою розглянутого методу склала близько 3%, тоді як, за допомогою евристичного алгоритму – близько 10%.

Для апробація методу синтезу структурованих моделей діагностичних ознак і діагнозів й реалізації ВП на цих моделях, узята вибірка з 434 чоловік, у яких діагностувалося 10 діагнозів:  $D_1$  – здорові (243),  $D_2$  – анемія неуточнена (29),  $D_3$  – кардіоміопатія (10),  $D_4$  – хронічна ішемічна хвороба серця неуточнена (17),  $D_5$  – неуточнені геморагічні стани (алергійний геморагічний васкуліт) (24),  $D_6$  – хронічний холецистит (21),  $D_7$  – пневмонія неуточнена (16),  $D_8$  – інфекційний мононуклеоз неуточнений (28),  $D_9$  – хронічний лімфоїдний лейкоз (26),  $D_{10}$  – ниркова недостатність неуточнена (20). Аналізувалися 9 показників клінічного аналізу крові: Eritr – еритроцити, Hb – гемоглобін, Leic – лейкоцити, Lmf – лімфоцити, Eozin – еозинофіли, Pal – нейтрофіли палочкоядерні, Seg – нейтрофіли сегментоядерні, Mon – моноцити, Сое – швидкість осідання еритроцитів. Отримані показники якості класифікації наведені в підсумковій табл. 1.

Таблиця 1

### Показники якості класифікації

	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$D_7$	$D_8$	$D_9$	$D_{10}$	Середнє
$\Psi$ класт. %	97,53	75,86	40,00	29,41	91,67	85,71	62,50	85,71	88,46	95,0	88,48
$\Psi$ %	97	63	52	69	98,4	97,3	77	98,4	89	90	89,9
$\Psi^*$ %	98,5	67	62	69	98,4	97,3	79	98,4	93	95	92,8
$M_{Di}$ кіл.	2,2	6,68	7,82	6,42	5,39	3,67	4,58	5,39	5,75	3,73	3,61

У табл. 1 у першому рядку зазначена вірогідність класифікації ( $\Psi$  класт.) методом кластерного аналізу, а в другому й третьому рядках – пропонованим методом уточнюючого діагнозу ( $\Psi$  – з використанням основного дерева,  $\Psi^*$  – з використанням основного й альтернативного дерева). У четвертому рядку –  $M_{Di}$  – середнє число аналізованих ознак.

З табл. 1 слідує, що середнє значення вірогідності розпізнавання пропонованим методом з використанням основного дерева практично не відрізняється від вірогідності кластерного аналізу, однак істотно підвищилася вірогідність тих діагнозів, у яких у навчальній вибірці є недостатньо об'єктів ( $D_3$ ,  $D_4$ ,  $D_7$ , ...) за рахунок незначного зниження вірогідності діагнозу з

найбільшою вибіркою –  $D_1$ . Це свідчить про ефективність застосування пропонованого методу на навчальних вибірках з істотною нерівномірністю кількості об'єктів в аналізованих класах. Використання альтернативного дерева рішень підвищує вірогідність практично всіх класів у порівнянні зі стандартним методом, крім того, у пропонованому методі середнє число аналізованих ознак дорівнює 3,61, що в 2,5 рази менше вихідних 9 ознак.

У **Додатках** наведено документи, що підтверджують практичне значення і впровадження результатів дисертаційної роботи, UML-діаграми, результати тестових перевірок розробленого програмного забезпечення.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена науково-практична проблема розвитку теоретичних основ і інформаційних технологій перспективного класу систем підтримки прийняття рішень у медичній діагностиці на основі синтезу структурованих моделей складно організованих взаємозалежних підсистем організму, що є об'єктами діагностики, і синтезу уточнюючого комбінованого діагностичного вирішального правила на цих моделях, в якому враховується різномірна діагностична й експертна інформація й невизначеності статистичних оцінок, що в остаточному підсумку підвищує ефективність функціонування систем.

Основні наукові й практичні результати дисертаційної роботи:

1. На підставі проведеного системного аналізу існуючих інформаційних технологій підтримки прийняття рішень у медичній діагностиці, обґрунтовано застосування структурованих моделей об'єктів діагностики і синтезу комбінованого вирішального правила на зазначених моделях, що дозволило сформулювати мету роботи й завдання дослідження.

2. Розроблена концептуальна модель об'єкту діагностики – багаторівневої системи зв'язків підсистем організму людини кожної з кожною та факторами навколишнього середовища, і на її основі розроблена розширена структурована модель об'єкту діагностики, що враховує не тільки функціональний і структурний базис, але й експертні оцінки й невизначеності статистичних оцінок функціонального базису, а також формалізовані етапи перетворення інформації при побудові СППРМ.

3. Обґрунтовано застосування та розроблені структуровані моделі об'єктів діагностики на етапах структурної ідентифікації БКС і медичних зображень при синтезі ієрархічних структур діагностичних ознак і діагнозів.

4. Формалізована задача структурної ідентифікації БКС, на основі синтезу структурованої моделі еталона структурного елемента формальними методами при структурній ідентифікації БКС різних типів, у якій розроблений метод формування інформативного простору параметрів на основі адаптації методу непараметричного перетворення Хока.

5. Запропоновано параметричну та структурну оптимізацію в методі структурної ідентифікації БКС, що дозволяє в режимі навчання одержати оптимальну структуру й параметри при описі еталона й реалізації ВП. Показано адаптацію розробленого методу структурної ідентифікації БКС для структурної ідентифікації сигналів при спектральному аналізі (обробка електроенцефалограм і в спектрометрії) та для синтезу структурованої моделі двовимірного структурного елемента при обробці медичних зображень.

6. Виконана формалізація задачі ієрархічної кластеризації діагностичних ознак і діагнозів шляхом формулювання задачі в термінах потокової моделі й приведення задачі кластеризації до пошуку мінімального розрізу в мережах з обмеженою пропускнуою здатністю. Обґрунтовано застосування алгоритму "дефекту" і розглянуто особливості його реалізації для задачі кластеризації діагностичних ознак і діагнозів, який, на відміну від традиційних методів кластерного аналізу, дозволяє одержати оптимальне рішення задачі кластеризації за критерієм мінімуму міжкластерного зв'язку, і не критичний до розмірності задачі.

7. Виконана реконфігурація структури діагностичних ознак, в результаті якої одержана структура задовольняє критерію мінімуму кореляційного зв'язку між елементами, максимуму інформативності й відповідає топології структури діагнозів, що забезпечує оптимальну схему обстеження пацієнтів при постановці уточнюючого діагнозу.

8. Виконана оцінка інформативності системи різнорідних ознак, а при аналізі інформативності числових ознак отримано вираз інтегральної помилки, обумовленої заміною теоретичного закону розподілу гистограмою і обмеженістю навчальної вибірки, і на основі мінімізації інтегральної помилки розроблено метод формування діагностично-значимих інтервалів числових ознак, що дозволило привести систему різнорідних ознак до єдиної шкали – множини інтервалів, що не пересікаються.

9. Розроблено метод синтезу комбінованого ВП із розщепленням недостовірних рішень при взаємодії ієрархічних структур діагностичних ознак і діагнозів. Запропоноване ВП дозволяє виконувати послідовний аналіз діагностичних ознак до досягнення заданого рівня вірогідності діагнозу, при цьому виконується "песимістичний" прогноз, обумовлений невизначеністю апіорних умовних ймовірностей при врахуванні експертних оцінок структур симптомокомплексів.

10. Розроблено метод синтезу індивідуальних діагностичних прогнозуючих моделей на основі методів самоорганізації при проведенні моніторингу показників здоров'я кожного пацієнта, який виконує прогноз показників здоров'я з метою виявлення негативних тенденцій їхніх змін, функціональних порушень на ранніх стадіях їхнього розвитку, оцінку ефективності проведених лікувально-оздоровчих процедур та ін.

11. Запропоновано метод оцінки альтернатив на основі методу аналізу

ієрархій при реалізації етапів перетворення інформації в СППРМ. Для кожного етапу сформовані альтернативи й локальні критерії порівняння альтернатив, що дозволяє адаптувати узагальнену схему перетворення інформації до конкретної предметної області.

12. Створена структура та програмне забезпечення СППРМ. Виконана перевірка адекватності розроблених інформаційних технологій при обробці реальних біомедичних даних, яка показала підвищення ефективності: при структурній ідентифікації елементів ЕКГ помилка класифікації розробленим методом склала 3%, а при використанні евристичних алгоритмів – 10%; при синтезі комбінованого ВП середня вірогідність діагнозів підвищилася з 88,48%, отриманих стандартним методом при аналізі 9-ти вихідних ознак, до 92,8%, при цьому із загального числа негативних відповідей (31 відповідь із 434) отримана диференціація 25 негативних відповідей про неможливість постановки діагнозу на попередні діагнози різного рівня. Середнє число аналізованих ознак у кожного пацієнта дорівнює 3,61, що в 2,5 рази менше 9-ти вихідних ознак.

13. Результати дисертаційної роботи впроваджені у вигляді моделей, алгоритмів та пакетів прикладних програм для рішення задач підтримки прийняття рішень у медицині в організаціях: Інститут неврології, психіатрії й наркології Академії медичних наук України, Харківський національний університет ім. Каразіна В.Н., Державне підприємство «НДІ гігієни праці й профзахворювань», відділ комп'ютерної томографії Харківської медичної академії післядипломної освіти, лабораторія імунології Українського НДІ дерматології й венерології, кафедра «Обчислювальна техніка й програмування» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

## СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Поворознюк А.И. Об одном методе выделения структурных элементов квазипериодических сигналов / А.И. Поворознюк, А.Е. Фоменко // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1997. – Вып. 2, № 21. – С. 69-71.

*Здобувач запропонував метод виділення структурних елементів на основі перетворення простору ознак.*

2. Поворознюк А.И. Оптимизация пространства признаков при структурной идентификации квазипериодических сигналов / А.И. Поворознюк, А.Е. Филатова // Збірник наукових праць Харківського військового університету. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1998. – Вип. 1(9). – С. 112-115.

*Здобувач запропонував критерії оптимальності.*

3. Поворознюк А.И. Метод преобразования пространства признаков при идентификации структурных элементов квазипериодических сигналов / А.И. Поворознюк, А.Е. Филатова // Сб. научн. тр. ХГПУ. – Харьков: ХГПУ,

1998. – Вып. 6, Ч. 4. – С. 526-530.

*Здобувач розробив множину опорних функцій та метрику простору ознак.*

4. Поворознюк А.И. Структурная декомпозиция биологических объектов на основании потоковых моделей / А.И. Поворознюк // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 99. – С. 134-137.

5. Поворознюк А.И. Классификация веществ по характеристикам их спектров / А.В. Белогуб, В.В. Белогуб, А.И. Поворознюк // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ"ХПІ", 2001. – Вип. 114. – С. 3-6.

*Здобувач запропонував методу класифікації речовин по характеристикам спектра при порівнянні з еталоном.*

6. Поворознюк А.І. Перевірка ефективності методу структурної ідентифікації на прикладі виділення інформативних фрагментів електрокардіограми / А.І. Поворознюк, Г.Е. Філатова // Системи обробки інформації. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2001. – Вип. 6(16) – С. 94-97.

*Здобувач розробив методу експериментальної перевірки та інтерпретацію результатів структурної ідентифікації ЕКГ.*

7. Поворознюк А.И. Адаптация метода структурной идентификации для обработки двумерных изображений / А.И. Поворознюк, А.Е. Филатова // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ"ХПІ", 2002. – №18 – С. 97-100.

*Здобувач запропонував адаптацію методу структурної ідентифікації сигналів для обробки двовимірних зображень на основі просторової розгортки.*

8. Поворознюк А.И. Формализация диагностических признаков в компьютерных системах медицинской диагностики / А.И. Поворознюк, Н.И. Поворознюк // Системи обробки інформації. – Харків: ХВУ. 2002. – Вип. 6(22). – С. 13-17.

*Здобувачу належить структурна схема формалізації діагностичних ознак.*

9. Поворознюк А.И. Применение дискретного преобразования Фурье в задаче структурной идентификации изображений / А.И. Поворознюк, В.В. Филатов // Системи обробки інформації. – Харків: ХВУ. 2003. – Вип. 2. – С. 219-223.

*Здобувач запропонував опис двовимірного еталону, інваріантний відносно перетворень масштабу та повороту.*

10. Поворознюк А.И. Применение преобразования Хока для структурной идентификации физиологических сигналов / А.И. Поворознюк // Моделювання та інформаційні технології. – К.: ІПМЕ, 2003. – Вип. 22. – С.143-149.

11. Поворознюк А.И. Определение адаптивного порога при структурной идентификации биомедицинских сигналов / А.И. Поворознюк, А.Е. Филатова // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний

інститут". – Харків: НТУ"ХПІ", 2003. – №19. – С. 125-128.

*Здобувач запропонував метод визначення адаптивного порогу в вирішальному правилі класифікації структурних елементів.*

12. Поворознюк А.И. Структурная идентификация диагностических признаков на основе алгоритма «дефекта» / Э.Н. Будянская, Н.В. Максютя, А.И. Поворознюк // Системи обробки інформації. – Харків: ХВУ, 2003. – Вип. 3. – С. 159-164.

*Здобувач запропонував процедуру адаптації алгоритму «дефекта» для задачі ієрархічної кластеризації діагностичних ознак.*

13. Поворознюк А.И. Синтез иерархической структуры диагностических признаков в компьютерных системах медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ"ХПІ", 2003. – №7, т.2. – С. 39-44.

14. Поворознюк А.И. Распознавание спектров  $\gamma$  излучения при композитном выходном сигнале детектора / А.В. Белогуб, А.И. Поворознюк // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ"ХПІ", 2003. – №26. – С. 136-140.

*Здобувач запропонував процедуру класифікації радіоактивних сумішей при композитному вихідному сигналі.*

15. Поворознюк А.И. Синтез иерархической структуры решающих правил в компьютерных системах медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Моделювання та інформаційні технології. – К.: ІПМЕ, 2004. – Вип. 25. – С. 170-174.

16. Поворознюк А.И. Формальная модель преобразования информации в компьютерных системах медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Моделювання та інформаційні технології. – К.: ІПМЕ, 2004. – Вип. 26. – С. 155-160.

17. Поворознюк А.И. Применение экспертных оценок при проектировании компьютерных систем медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харків: ХАІ, 2004 – №4(8). – С.79-83.

18. Поворознюк А.И. Реконструктивная обработка ультразвуковых изображений сдвиговых деформаций в неоднородных тканях / М.С. Гирнык, А.И. Поворознюк // Системи обробки інформації. – Харків: ХВУ, 2004. – Вип. 1. – С. 101-105.

*Здобувач запропонував процедуру обробки ультразвукових зображень, одержаних SWEI-методом.*

19. Поворознюк А.И. Разработка метода нелинейной фильтрации ультразвуковых изображений с использованием вейвлет-преобразований / М.С. Гирнык, А.И. Поворознюк // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ"ХПІ", 2004. – №34. – С. 33-36.

*Здобувач запропонував метод фільтрації спектр-шумів ультразвукових*

*зображень за допомогою вейвлет-перетворення.*

20. Поворознюк А.И. Оценка информативности диагностических показателей в компьютерных системах медицинской диагностики / Т.В. Гуторова, А.И. Поворознюк // Системи обробки інформації. – Харків: ХВУ, 2004. – Вип. 7(35). – С. 162-168.

*Здобувач запропонував метод оцінки інформативності різнорідної системи діагностичних ознак.*

21. Поворознюк А.И. Оценка альтернатив при проектировании компьютерных систем медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Системи обробки інформації. – Харків: ХВУ, 2004. – Вип. 8(36). – С. 78-84.

22. Поворознюк А.И. Формализация этапов проектирования интеллектуальных компьютерных систем медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Электронное моделирование – К.: ПМЕ, 2006. – Т. 28. №1 – С. 85-97.

23. Поворознюк А.И. Метод постановки уточняющего диагноза в компьютерных системах медицинской диагностики при иерархической структуре диагностических признаков / А.И. Поворознюк // Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил. – Харків: ХУПС, 2006. – Вип. 3(9). – С. 125-130.

24. Поворознюк А.И. Исследование влияния шага квантования пространства признаков на качество структурной идентификации квазипериодических сигналов / А.И. Поворознюк, А.В. Дашкина // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ"ХПІ", 2006. – №23. – С. 170-173.

*Здобувачу належить методика проведення чисельних експериментів та інтерпретація результатів структурної ідентифікації квазіперіодичних сигналів.*

25. Поворознюк А.И. Реконфигурация структуры диагностических признаков при синтезе компьютерного диагноза / А.И. Поворознюк // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2007. – Вип. 2(60). – С. 135-139.

26. Поворознюк А.И. Концептуальная модель объекта диагностики в компьютерных системах медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2007. – Вип. 9(67) – С.133-136.

27. Поворознюк А.И. Формирование диагностических интервалов численных признаков при дифференциальной диагностике / А.И. Поворознюк // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький: ХНУ, 2007. – №3, Т.1. – С.106-109.

28. Поворознюк А.И. Система поддержки принятия решений в медицине на основе структурной идентификации объектов диагностики / А.И. Поворознюк // Сборник научных трудов СНУЯЕиП. – Севастополь: СНУЯЕиП, 2008. – № 1 (25) – С. 234-245.

29. Povoroznjuk A. Synthesis of structured models of computer systems in medical diagnosis / Anatoliy Povoroznjuk, Natalija Bilous. Ilga Kozina // International Book Series "Information Science and Computing". – Intelligent information and Engineering System. – ITHEA, Rzeszow-Sofia, 2009. – №13 – P. 203-210.

*Здобувач запропонував розширену структуровану модель об'єкта діагностики та її використання на різних етапах обробки інформації.*

30. Поворознюк А.И. Система поддержки принятия решения в медицине на основе синтеза структурированных моделей объектов диагностики / А.И. Поворознюк // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – Белгород, БелГУ, 2009. – Вып. 12/1. – №15(70) – С. 170-176.

31. Поворознюк А.И. Синтез структурированной модели диагностических признаков в задаче медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Кибернетика и вычислительная техника. – К.: ИК им. В.М. Глушкова НАНУ, МНУЦИТиС, 2009. – Вып. 158. – С. 70-80.

32. Поворознюк А.И. Расщепление недостоверных решений в системах медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця, ВНТУ, 2009. – №3. – С.137-144.

33. Поворознюк А.И. Синтез комбінованого вирішального правила (ВП) у комп'ютерних системах медичної діагностики / А.И. Поворознюк // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2010. – №3. – С. 72-83.

34. Поворознюк А.И. Преобразование пространства признаков при идентификации квазипериодических физиологических сигналов / А.И. Поворознюк, А.Е. Фоменко // Труды междунар. научн.-техн. конф. «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье». – Харьков, Мишкольц, Магдебург: Харьк. гос. политехн. ун-т, Мишкольц. ун-т, Магдебург. ун-т, 1997. – Ч. 5. – С. 332-335.

*Здобувач запропонував адаптивний алгоритм перетворення простору ознак при розпізнаванні структурних елементів квазіперіодичних сигналів.*

35. Поворознюк А.И. Самообучение автоматизированной системы идентификации квазипериодических сигналов на основе проверки статистических гипотез / А.И. Поворознюк, А.Е. Филатова // Сб. научн. тр. ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 7, Ч. 3. – С. 421-423.

*Здобувач запропонував метод визначення порогу в вирішальному правилі структурної ідентифікації на основі аналізу статистичних характеристик.*

36. Поворознюк А.И. Синтез иерархической структуры диагностических признаков и решающих правил в компьютерных системах медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – №4, 5 (48, 49) – 2004. – С. 99.

37. Поворознюк А.И. Формализованная процедура проектирования компьютерных систем медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ 2004. Тези доп.



міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: ХАІ, 2004 – С. 342.

38. Поворознюк А.И. Структурная идентификация диагностических признаков в интеллектуальных системах медицинской диагностики / Н.В. Максюта А.И. Поворознюк // Контрольно измерительные приборы и автоматика. – Харьков: ООО "Эргос", 2005. – №10. – С. 4-14.

*Здобувач запропонував використання потокової моделі для ієрархічної кластеризації діагностичних ознак та методу проведення чисельних експериментів.*

39. Поворознюк А.И. Интеллектуальная система поддержки принятия решений в медицине / А.И. Поворознюк // Материалы XIII международной конференции с автоматического управления (Автоматика 2006), г. Винница 25-28 сентября 2006 г. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 2007. – С. 364-368.

40. Поворознюк А.И. Система поддержки принятия решений в медицине на основе структурной идентификации объектов диагностики / А.И. Поворознюк // Материалы XIV международной конференции с автоматического управления (Автоматика 2007), г. Севастополь 10-14 сентября 2007 г. – Ч.2 – Севастополь: СНУЯЕиП, 2007. – С. 58-61.

41. Поворознюк А.И. Диагностическая процедура уточняющего диагноза с расщеплением недостоверных решений / А.И. Поворознюк // Четверта наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 16-17 квітня 2008 р. Матеріали конференції. – Харків: ХУПС, 2008. – С. 173.

42. Поворознюк А.И. Система медицинской диагностики с расщеплением слабых решений / А.И. Поворознюк // Автоматика-2008: доклады XV международной конференции по автоматическому управлению, 23 – 26 сентября 2008 г. – Одесса: ОНМА, 2008. – С. 436-439.

43. Поворознюк А.И. Синтез структурированных моделей в системах поддержки принятия решений в медицине / А.И. Поворознюк // Труды 10-й международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии», 18–22 мая 2009 г. – Одесса: ОНПУ, 2009. – С. 82.

44. Поворознюк А.И. Інформаційні технології підтримки прийняття рішень в медицині на основі синтезу структурованих моделей / А.И. Поворознюк //16 міжнародна конференція з автоматичного управління “Автоматика 2009” 22-25 вересня 2009, м. Чернівці. Тези доповідей. – Чернівці: Книги-XXI, 2009. – С. 87-89.

45. Поворознюк А.И. Система поддержки принятия решения в медицине на основе синтеза структурированных моделей объектов диагностики / А.И. Поворознюк // Компьютерные науки и технологии. Ч.1: Сборник трудов первой Международной научно-технической конференции 8-10 октября 2009. – Белгород: ГиК, 2009. – С. 244-247.

46. Поворознюк А.И. Система поддержки принятия решений в медицине на основе синтеза структурированных моделей / А.И. Поворознюк // Труды XII

Международной научно-технической конференции Системный анализ и информационные технологии (SAIT-2010) г. Киев, 25-29 мая 2010 г. / УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ». – К.: УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ», 2010. – С. 34.

## АНОТАЦІЇ

**Поворознюк А. І. Інформаційні технології підтримки прийняття рішень у медичній діагностиці на основі синтезу структурованих моделей.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2011.

У дисертації розглядаються теоретичні основи та інформаційні технології нового класу систем підтримки прийняття рішень у медичній діагностиці на основі синтезу структурованих моделей складно організованих взаємозалежних підсистем організму, що є об'єктами діагностики.

Розроблена концептуальна модель, і на її основі розширена структурована модель об'єкта діагностики, яка враховує функціональний і структурний базис, експертні оцінки і невизначеності статистичних оцінок функціонального базису. Виконана формалізація етапів перетворення інформації при побудові систем підтримки прийняття рішень у медичній діагностиці. Розроблено структуровані моделі об'єктів діагностики на етапах структурної ідентифікації квазіперіодичних біосигналів і медичних зображень, при синтезі ієрархічних структур діагностичних ознак і діагнозів, а також метод синтезу комбінованого вирішального правила з розщепленням недостовірних рішень при взаємодії ієрархічних структур діагностичних ознак і діагнозів, що виконує "песимістичний" прогноз, обумовлений невизначеністю апріорних умовних ймовірностей при врахуванні експертних оцінок структур симптомкомплексів.

Розроблена структура, інформаційне та програмне забезпечення системи, виконана перевірка адекватності інформаційних технологій при обробці реальних біомедичних даних та їх впровадження.

**Ключові слова:** система підтримки прийняття рішень, метод, модель, невизначеність, медична діагностика, біосигнал, діагностична ознака, вирішальне правило, експертна оцінка.

**Поворознюк А. И. Информационные технологии поддержки принятия решений в медицинской диагностике на основе синтеза структурированных моделей.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков,

2011.

В диссертации рассматривается важная научно-практическая проблема обеспечения необходимого уровня достоверности компьютерного диагноза в условиях анализа большого количества зависимых разнородных признаков, включая анализ биологических сигналов и медицинских изображений, при ограниченной обучающей выборке. Эта проблема решается посредством разработанных и исследованных в диссертации теоретических основ и информационных технологий нового класса систем поддержки принятия решений в медицине на основе синтеза структурированных моделей сложно организованных взаимосвязанных подсистем организма, являющихся объектами диагностики, и синтеза уточняющего комбинированного диагностического решающего правила на этих модели в котором учитывается разнородная диагностическая и экспертная информация и неопределенности статистических оценок.

На основании проведенного системного анализа существующих информационных технологий поддержки принятия решений в медицине, разработана концептуальная модель объекта диагностики – многоуровневой системы связей подсистем организма человека друг с другом и факторами окружающей среды и на ее основе разработана расширенная структурированная модель объекта диагностики, которая учитывает не только функциональный и структурный базис, но и экспертные оценки структур симптомокомплексов и неопределенности статистических оценок функционального базиса, а также формализованы этапы преобразования информации при построении систем поддержки принятия решений в медицине. Разработаны структурированные модели объектов диагностики на этапах структурной идентификации квазипериодических биосигналов и медицинских изображений, при синтезе иерархических структур диагностических признаков и диагнозов.

Формализована задача структурной идентификации квазипериодических биосигналов, на основе синтеза структурированной модели эталона структурного элемента формальными методами при структурной идентификации биосигналов различных типов, в которой разработан метод формирования информативного пространства параметров на основе адаптации метода непараметрического преобразования Хока. Разработан метод параметрической и структурной оптимизации модели эталона. Показана адаптация разработанного метода структурной идентификации биосигналов для структурной идентификации сигналов при спектральном анализе и для синтеза структурированной модели двумерного структурного элемента при обработке медицинских изображений.

Выполнена формализация задачи иерархической кластеризации диагностических признаков и диагнозов путем формулировки задачи в

терминах потоковой модели и сведение задачи кластеризации к поиску минимального разреза в сетях с ограниченной пропускной способностью. Обосновано применение алгоритма "дефекта" и рассмотрены особенности его реализации для указанных задач кластеризации. Разработан метод реконфигурации структуры диагностических признаков, при котором результирующая структура удовлетворяет критерию минимума корреляционной связи между элементами, максимуму информативности и соответствует топологии структуры диагнозов, что обеспечивает оптимальную схему обследования пациентов при постановке уточняющего диагноза. Разработан метод оценки информативности разнородной системы признаков, при анализе информативности числовых признаков получено выражение интегральной ошибки, обусловленной заменой теоретического закона распределения гистограммой и ограниченностью обучающей выборки, и на основе минимизации интегральной ошибки разработан метод формирования диагностически-значимых интервалов числовых признаков, что позволило привести систему разнородных признаков к единой шкале – множеству непересекающихся интервалов.

Разработан метод синтеза комбинированного решающего правила с расщеплением недостоверных решений при взаимодействии иерархических структур диагностических признаков и диагнозов. Разработанное решающего правила позволяет выполнять последовательный анализ диагностических признаков до достижения заданного уровня достоверности диагноза, при этом выполняется "пессимистический" прогноз, обусловленный неопределенностью априорных условных вероятностей при учете экспертных оценок структур симптомокомплексов.

Разработана структура и создано программное обеспечение системы. Выполнена проверка адекватности разработанных информационных технологий при обработке реальных биомедицинских данных и их внедрение.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, метод, модель, неопределенность, медицинская диагностика, биосигнал, диагностический признак, решающее правило, экспертная оценка.

**Povoroznyuk A. I. Information technology decision support in medical diagnosis based on the synthesis of structured models.** – Manuscript.

Dissertation for Doctor of Technical Sciences scientific degree, speciality 05.13.06 – Information technologies. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2011.

Theoretical bases and information technologies of new class decision support systems for medical diagnostics based on the synthesis of structured models of complex interrelated subsystems of the organism that are objects of an diagnostics are considered in the thesis.

The structured model for object of diagnostics that considered functional and structural basis, expert estimates and uncertainty of statistical estimates of functional basis, is expanded based on developed conceptual model. Formalization of phases of information transform during the decision support system's construction for medical diagnostics is performed. Structured models of diagnostic objects on the stages of structural identification of quasi-biosignals and medical imaging and in the synthesis of hierarchical structures diagnostic tests and diagnosis as well as the method for synthesis of the combined decision rule with splitting of unreliable decisions at the interaction of hierarchical structures of diagnostic tests and diagnosis which perform "pessimistic" forecast, due to uncertainty of a priori conditional probabilities taking into account expert assessments of symptom structures are completed.

The structure, information and software of the systems are designed, the checking of adequacy of information technology in the processing of real biomedical data is performed and these results are introduced.

**Key words:** decision support system, method, the model, uncertainty, medical diagnostics, biosignals, diagnostic features, decision rule, expert estimates.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Arya', located at the bottom center of the page.

Підписано до друку 26.04.2011 р. Формат 60x90/16.  
Папір офсетн. Друк – ризографія. Умовн. друк. арк. 1,9  
Наклад 100 прим. Зам. № 517345

---

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.  
Свідоцтво №24800170000040432 від 21.03.2001 р.  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16

---