

УДК 004.891.3

Л. Г. Полягушко

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Проспект Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна

Автоматизований аналіз стану пацієнта та оцінка сеансів медичних процедур (гіпокситерапії)

Розглянуто задачу створення системи автоматизованого аналізу результатів проведення медичних сеансів, що є частиною автоматизованого програмно-апаратного комплексу для проведення гіпокситерапії. Описано запропоновану архітектуру динамічної експертної системи та її основні модулі. Розроблено формальну модель представлення бази знань, що основана на продукційних правилах. Дану модель адаптовано під використання алгоритму Rete. Описано механізм виводу через процедуру «співставлення – спрацювання» та алгоритм Rete, що є швидким засобом співставлення з шаблоном. На прикладі оцінки сеансу діагностики розглянуто роботу алгоритму та представлення правил. Розроблена експертна система працює як в комплексі, так і як самостійна система.

Ключові слова: медицина, діагностика, експертна система, формальна модель, продукційні правила, механізм виведення, процедура «співставлення – спрацювання», алгоритм Rete, гіпокситерапія.

Вступ

Збереження здоров'я населення та попередження розвитку захворювань є одними з головних задач соціально-економічного розвитку в кожній країні, оскільки втрата чи суттєве погіршення здоров'я впливає на працездатність і рівень життя населення. На здоров'я населення впливають різні фактори, наприклад, негативний антропогенний вплив на навколишнє середовище, забруднення питної води та продуктів харчування, спосіб життя, небажані побічні ефекти від прийому лікарських препаратів тощо. Тому для підвищення адаптаційної здатності організму, профілактики та лікування захворювань у клінічній, профілактичній і спортивній медицині все частіше віддають перевагу безмедикаментозним методам лікування та підвищення резистентності організму людини. Одним із найбільш ефективних і безпечних методів є гіпокситерапія, зокрема, інтервальні нормобаричні

© Л. Г. Полягушко

гіпоксичні тренування (ІНГТ). Практика проведення сеансів ІНГТ показала, що важливою складовою успішного проведення сеансів є правильна оцінка стану пацієнта до, після, та під час проведення сеансів, а також оцінка ефективності курсу лікування.

На якість оцінки проведення сеансів гіпокситерапії і стану пацієнта впливають різні фактори, але найбільш важливим із них є кваліфікація та досвід лікаря. Лікар може не володіти всіма необхідними навичками та знаннями, які потрібні для того, щоб робити висновки про результати аналізів і подальше лікування пацієнта. Тому для якісної оцінки стану пацієнта необхідно постійно залучати висококваліфікованих фахівців різних напрямків. Це незручно, складно, дорого, займає багато часу та не завжди можливо. Також якісна оцінка стану здоров'я пацієнта потребує обробки великих об'ємів інформації. Тому актуальною задачею є автоматизація процесу прийняття рішень щодо діагностики стану здоров'я пацієнта та оцінки ефективності курсу лікування. Літературний огляд [1–4] показав, що на сьогодні відсутні експертні системи, що застосовуються у сфері гіпокситерапії, відповідають поставленим умовам і можна було б інтегрувати в автоматизований програмно-апаратний комплекс (АПАК) для проведення ІНГТ [5, 6], тому постала задача розробки спеціалізованої експертної системи для проведення автоматизованої оцінки стану пацієнтів і сеансів гіпокситерапії.

Постановка задачі

Розробити систему автоматизованої оцінки стану пацієнта та оцінки проведених сеансів медичних процедур. Запропонувати архітектуру програмного забезпечення, що вписувалася би в загальне програмне забезпечення АПАК для проведення ІНГТ. Розробити формальну модель представлення бази знань. Визначити найбільш ефективний алгоритм логічного виводу для системи, що працює з даними в реальному часі.

Система оцінки стану здоров'я пацієнта повинна забезпечувати:

- 1) надання лікарю даних оцінки результатів зібраних аналізів: порівняння з нормами з урахуванням віку та фізіологічних особливостей організму людини;
- 2) формування рекомендацій щодо проведення гіпокситерапії (кількість сеансів, час сеансу та кількість циклів), а також додаткових процедур;
- 3) формування рекомендацій щодо консультування з лікарями інших напрямків;
- 4) формування рекомендацій щодо проведення додаткового дослідження, проведення додаткових діагностичних процедур;
- 5) надання оцінки ефективності проведеного лікування.

Результати досліджень

Створена експертна система є частиною АПАК для проведення гіпокситерапії [5, 6], тому проведення автоматизованої оцінки характеризується необхідністю забезпечення можливості обробки даних у реальному часі, які отримані з мікроконтролера комплексу, та проведення аналізу даних, що зберігаються в базі даних. У зв'язку з цим було розроблено динамічну експертну систему, структуру якої зображено на рис. 1.

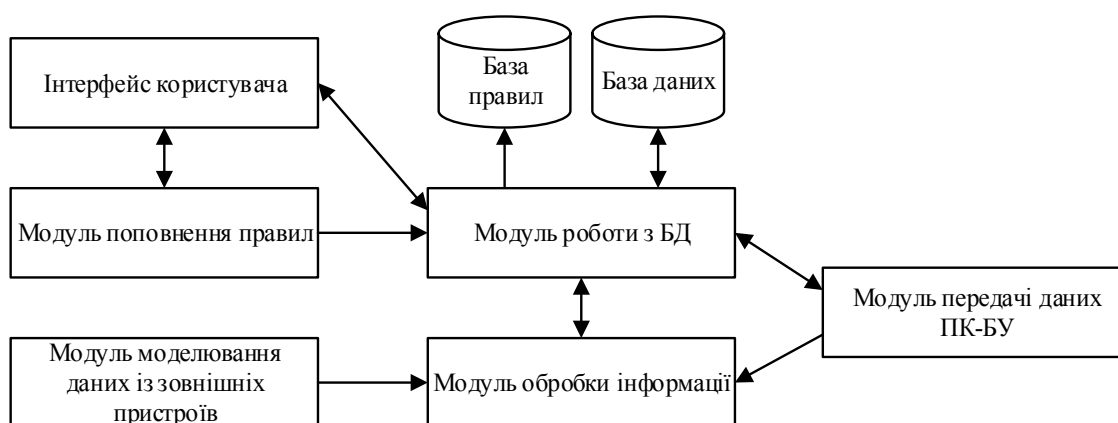


Рис. 1. Структура системи автоматизованої оцінки

Система складається з наступних складових.

Модуль роботи з БД — це менеджер для актуалізації інформації у базі даних і базі правил.

База правил (або база знань), що містить інформацію про правила щодо проведення гіпоксичних тренувань, а саме: показники, за якими буде проводитись аналіз; правила для оцінки сеансів діагностики та надання рекомендацій щодо подальшого лікування; правила для оцінки курсу лікування; правила для визначення, коли потрібно залучати додаткову консультацію фахівця з іншого напрямку; правила для визначення, коли потрібно провести додаткові діагностичні процедури, здати додаткові аналізи.

База даних зберігає дані пацієнтів, на основі яких проводиться аналіз, зібрані значення показників стану пацієнта під час сеансів, отримані значення показників на основі моделювання процесів в організмі людини та інформація про захворювання (симптоми, прояви захворювань).

Модуль поповнення правил — дозволяє експерту ввести критерії і параметри правил.

Модуль обробки інформації — робить перевірку отриманих даних про стан пацієнта на відповідність правилам і формує рекомендації щодо лікування пацієнта.

Інтерфейс користувача — виконує задачі по роботі з пацієнтом, а саме актуалізацію бази пацієнтів, проведення нових сеансів і відображення статистики.

Модуль передачі даних ПК-БУ — це модуль з'єднання з апаратною частиною пристрою та отримання даних про параметри стану пацієнта в реальному часі. На даний час отримуються дані про стан гемодинаміки та вентиляцію легень і стан зовнішнього середовища, а саме газової суміші (концентрації O_2 та CO_2), але можливо додання інших пристроїв до АПАК.

Формальна модель бази знань

Прийняття рішень в автоматизованій системі відбувається на основі правил, що вводить експерт у систему.

Формальна модель бази знань має вигляд [7–9]:

$$(i); Q; A \rightarrow B,$$

де i — ім'я правила; Q — елемент, що характеризує сферу застосування правила; A — передумови (умови) правила; B — висновок (наслідок, дія) правила.

Ім'ям правила виступає порядковий номер.

Сфера застосувань визначає, для яких випадків може бути використане правило, що дозволяє заощадити час на пошук потрібних правил у базі правил. Наприклад, для сфери застосувань — правила для діагностики, правила для лікування, правила загальні, правила для хворих на ХОЗЛ тощо.

Представимо параметр A наступним чином:

$$A = (Al, R, Ar),$$

де Al, Ar — лівий і правий вузли умови правила відповідно, що описуються наступним чином:

$$Al = FAl \parallel Null \parallel A, Ar = FAr \parallel Null \parallel A,$$

де FAl, FAr — ліва та права кінцеві трійки умови правила, що описуються:

$$FAl = (P, Z_A, W), FAr = (P, Z_A, W),$$

де P — змінна; Z_A — знак умови, $Z_A = \{<, >, \leq, \geq, =\}$; W — значення умови, що може бути або константою, або діапазоном; R — відношення між вузлами правил. R може приймати наступні значення: $R = \{\wedge, Null\}$.

Аналогічно параметру A визначається параметр B — наслідок правила, крім тієї різниці, що знак умови Z_B приймає тільки значення $Z_B = \{=\}$.

На модель представлення бази правил накладаються такі обмеження. Для обраного i -го піддерева умови або наслідку елемента правила повинні виконуватися наступні умови:

- 1) якщо $(R_i = Null)$, то $(Al_i \neq Null)$ та $(Ar_i = Null)$;
- 2) якщо $(R_i = \wedge)$, то $(Al_i \neq Null)$ та $(Ar_i \neq Null)$.

Формування індексу вузла формальної моделі полягає в наступному. Верхній індекс відповідає номеру правила в базі правил. Нижній індекс ведеться по порядку для кожної нової вершини одного рівня. Нижній індекс є складовим і відображає глибину вкладеності умов у правилі. При створенні нової вершини типу A, B, FAl, FAr, FBl, FBr додається новий нижній індекс, що починається з одиниці.

Розглянемо приклад представлення правил з номерами i з бази правил у вигляді формальної моделі дерева рішень:

$$\begin{aligned} & \text{ЯКЩО («стійкість до гіпоксії» = «висока»),} \\ & \quad \text{ТО («проводити ІНГТ» = «так»),} \end{aligned}$$

де «стійкість до гіпоксії», «проводити ІНГТ» — змінні, а «висока» і «так» — значення.

Представлення правила буде виглядати, як показано на рис. 2.

Таке представлення правил дозволяє забезпечити подання правил з різним рівнем вкладеності умов і наслідків, а також зберігати правила за допомогою системи керування базами даних MySQL.

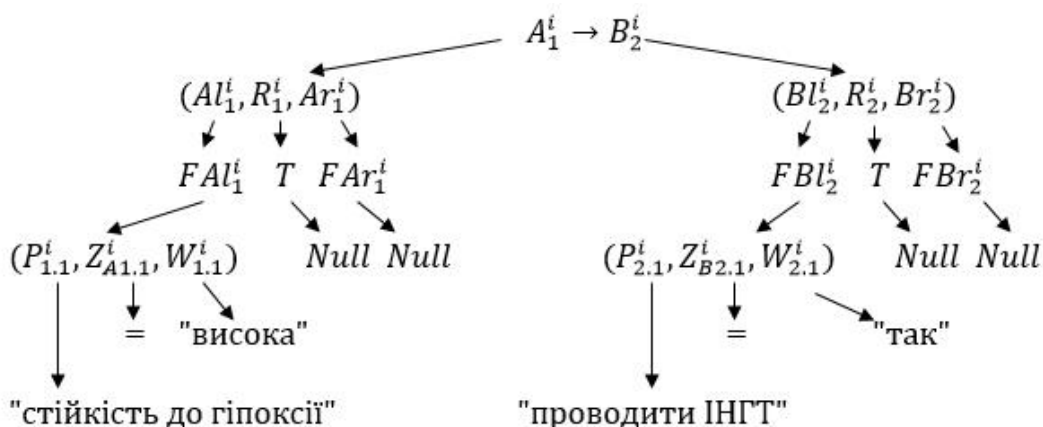


Рис. 2. Представлення правила

Алгоритм логічного виводу

Основним механізмом виводу в системах, що засновані на правилах, є механізм виведення через процедуру «співставлення – спрацювання» (рис. 3) [10]. Механізм виводу зіставляє кожне правило, що зберігається в базі правил, з фактами, які надходять із зовнішніх пристроїв або містяться в базі даних. Якщо умова підходить факту, правило спрацьовує, і його частина наслідків виконується. На рис. 3 показано цикл механізму виводу через процедуру «співставлення – спрацювання».

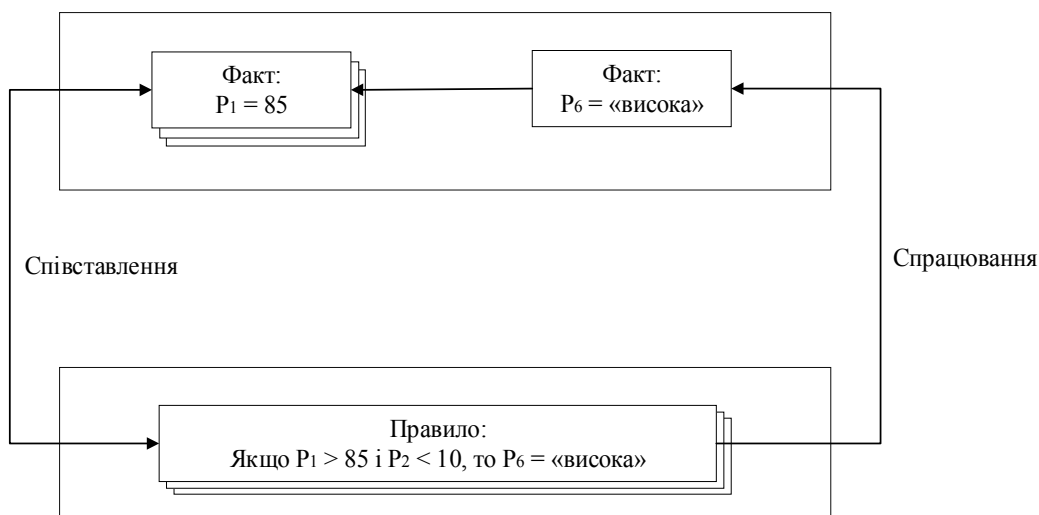


Рис. 3. Цикл механізму виводу через процедуру «співставлення – спрацювання»

При простій схемі перегляду правил в експертній системі відбувається перегляд усіх правил із бази даних правил, до тих пір поки не буде знайдено правило, що містить умови, які підходять під значення вхідних параметрів. У цьому випадку правило спрацьовує, і пошук завершується. Однак при такому підході необхідно виконувати достатньо великий об'єм розрахунків, що приводить до збільшення

часу, необхідного на обробку вхідної інформації. Особливо даний факт актуальний для систем реального часу [11, 12].

Тому для прискореного пошуку використовується алгоритм Rete, який розробив Чарльз Л. Форги [13]. Алгоритм Rete є швидким засобом співставлення із шаблоном, висока швидкодія якого досягається завдяки зберіганню в оперативній пам'яті інформації про правила. Цей алгоритм призначений для підвищення швидкодії систем з прямим логічним висновком, заснованих на правилах, завдяки обмеженню обсягу роботи, що необхідна для повторного обчислення конфліктної безлічі варіантів після запуску одного із правил. Недоліком цього алгоритму є його високі потреби в пам'яті, але на даний час, коли мікросхеми пам'яті стали такими дешевими, цей недолік не має великого значення.

В основу алгоритму покладено префіксальне дерево, вузлами якого є умови правила. У кожному вузлі префіксального дерева створюється перелік фактів із бази знань, які задовольняють умовам правил. Коли факти додаються в робочу пам'ять (РП), створюються елементи робочої пам'яті (ЕРП). Кожен ЕРП може містити один кортеж, чи кожен факт може бути представлений набором ЕРП, де кожен елемент містить кортеж фіксованої довжини, зазвичай триплет. Мережа Rete складається з альфа- і бета-підсистем. Ліва сторона (альфа) формує дискримінаційну мережу, відповідальну за відбір ЕРП (альфа-пам'яті). Цей процес є простим порівнянням атрибутів з фактами. Якщо ЕРП успішно зіставлено з умовами правил, він передається на наступний вузол мережі. Отже, всі ЕРП, відображаючи одну сутність, перетинають дану галузь вузлів дискримінаційної мережі. Права (бета) сторона графа виконує об'єднання різних ЕРП і записує результат в бета-пам'ять. На практиці відбувається багаторазове дублювання фактів (РП) в області правил (операційній пам'яті). При переміщенні від кореня префіксального дерева до листа перелік фактів піддається операції перетину, і в листі знаходяться лише факти, необхідні та достатні для резолюції правила. Переміщення від кореня до листа і означає резолюцію правила. Таким чином, для кожного правила заздалегідь формується перелік фактів, що задовольняє его умовам.

Алгоритм Rete має наступні характеристики [13]:

- 1) зменшує або виключає надмірність умов за рахунок об'єднання вузлів;
- 2) зберігає часткові відповідності між фактами при злитті різних типів фактів. Це дозволяє уникнути повного обчислення всіх фактів за будь-якої зміни в робочій пам'яті виробничої системи. Система працює тільки із самими змінами;
- 3) дозволяє ефективно вивільняти пам'ять при видаленні фактів.

Розглянемо роботу алгоритму Rete на прикладі оцінки сеансу діагностики. В оцінку діагностики входять такі задачі: визначити стійкість до гіпоксії організму людини та реакцію дихальної системи й гемодинаміки на гіпоксичний вплив. Запис правил на природній мові: «Якщо при закінченні сеансу діагностики сатурація крові вище 85 %, концентрація кисню у вдихуваному повітрі дорівнює або нижче 10 %, то стійкість до гіпоксії у пацієнта висока. Якщо показники гемодинаміки та дихання не перевищують 30 % від вихідних значень, то реакція цих систем — нормальна. Отже надається рекомендація проводити курс ІНГТ з рівнем гіпоксії 10 % кисню».

Для формального запису правил введемо такі означення:

$P_1 =$ «сатурація крові при закінченні діагностики»: $W_1 \in [75; 100]$;

- P_2 = «концентрація кисню в ГГС при закінченні діагностики»: $W_2 \in [0; 21]$;
 P_3 = «частота серцевих скорочень»: $W_3 \in [0; 120]$;
 P_4 = «артеріальний тиск»: $W_4 \in [0; 200]$;
 P_5 = «хвилинний об'єм дихання»: $W_5 \in [0; 200]$;
 P_6 = «стійкість до гіпоксії»: $W_6 = \{\text{«висока», «нормальна», «помірно знижена», «знижена», «різко знижена»}\}$;
 P_7 = «реакція гемодинаміки»: $W_7 = \{\text{«нормальна», «підвищена»}\}$;
 P_8 = «реакція дихання»: $W_8 = \{\text{«нормальна», «підвищена»}\}$;
 P_9 = «проводити ІНГТ»: $W_9 = \{\text{«так», «так з обмеженням», «ні»}\}$;
 P_{10} = «тренуючий рівень»: $W_{10} \in [0; 21]$;
 P_{11} = «додаткові рекомендації»: $W_{11} = \{\text{«спірометрія», «консультація пульмонолога», «-»}\}$.

Система правил, що відповідає рекомендації проводити ІНГТ з тренуючим рівнем гіпоксії 10 % кисню наступна:

- 1) $(P_1 > 85) \wedge (P_1 = 85) \wedge (P_2 < 10) \wedge (P_2 = 10) \rightarrow (P_6 = \text{«висока»})$;
- 2) $(P_1 > 80) \wedge (P_1 = 80) \wedge (P_1 < 85) \wedge (P_2 < 10) \wedge (P_2 = 10) \rightarrow (P_6 = \text{«нормальна»})$;
- 3) $(P_1 > 75) \wedge (P_1 < 80) \wedge (P_2 < 10) \wedge (P_2 = 10) \rightarrow (P_6 = \text{«знижена»})$;
- 4) $(P_3 > 30) \wedge (P_4 > 30) \rightarrow (P_7 = \text{«нормальна»})$;
- 5) $(P_5 > 30) \rightarrow (P_8 = \text{«нормальна»})$;
- 6) $(P_6 = \text{«висока»}) \rightarrow (P_9 = \text{«так»})$;
- 7) $(P_9 = \text{«так»}) \wedge (P_6 = \text{«висока»}) \wedge (P_7 = \text{«нормальна»}) \wedge (P_8 = \text{«нормальна»}) \rightarrow (P_{10} = \text{«так»}) \wedge (P_{11} = \text{«-»})$.

На рис. 4 зображено алгоритм роботи Rete для визначення стійкості до гіпоксії.

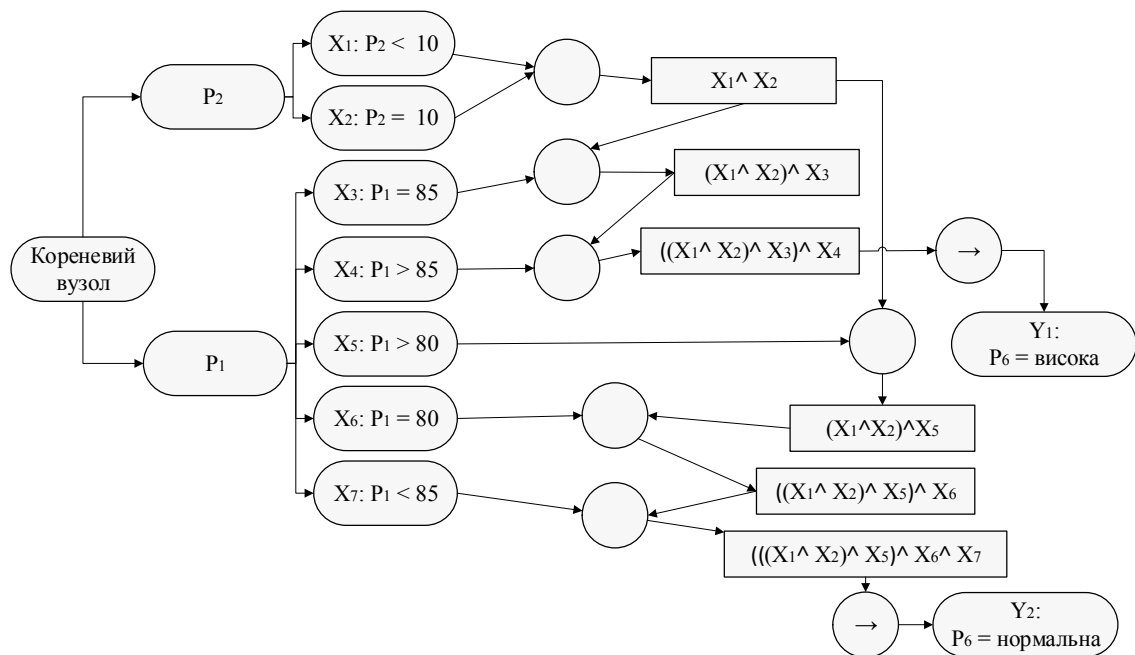


Рис. 4. Алгоритм Rete для визначення стійкості до гіпоксії

Для реалізації системи були використані наступні програмні засоби: мова програмування C#, середовище розробки Visual Studio, система керування базою даних MySQL.

Розроблена підсистема автоматизованої оцінки сеансів діагностики та ефективності курсу лікування за допомогою проведених процедур покращила ефективність і безпечність проведених процедур, що в майбутньому забезпечить використання комплексу не тільки в медичних установах, але і в домашніх умовах. Також дана підсистема з невеликими доопрацюванням може працювати з іншими медичними пристроями чи взагалі як самостійна програма оцінки та надання рекомендацій у медичній сфері. В основному, доопрацювання будуть відноситися до заповнення бази правил відповідними правилами та фактами.

Висновки

Показано важливість розробки медичних експертних систем, що використовуються під час діагностики та лікування пацієнтів, зокрема, проведення медичних процедур — гіпокситерапії. Показано структуру реалізованої динамічної експертної системи для діагностики стану здоров'я пацієнта та оцінки ефективності курсу лікування. Визначено використання алгоритму прискореного пошуку Rete для продукційних експертних систем. Розроблено формальну модель представлення дерева рішень для алгоритму Rete, що дозволяє оптимізувати та скоротити обсяг бази правил експертної системи. Показано на прикладі оцінки сеансу діагностики роботу алгоритму Rete та запропонованої формальної моделі представлення бази знань.

1. Сударев А.М., Исаев И.А., Кантор П.С. и др. Новая аппаратура формирования дыхательных газовых смесей для функционально-нагрузочных проб. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника: научно-прикладной журнал*. 2005. № 11/12. С. 52–58.
2. Lopata V.A., Serebrovskaya T.V. Hypoxicators: review of the operating principles and constructions. *Intermittent Hypoxia and Human Diseases*. Springer. London, 2012. P. 291–302.
3. Bassovitch O. and Serebrovskaya T. Equipment and Regimes for Intermittent Hypoxia Therapy. In: *Intermittent Hypoxia: From Molecular Mechanisms to Clinical Applications*. Editors: Lei Xi & Tatiana V. Serebrovskaya / Nova Science Publishers, 2009, Chapter 30: 539–601.
4. Полягушко Л.Г. Гіпоксикатори та їх класифікація. Гіпоксія як метод підвищення адаптаційної здатності організму; за заг. ред. О.В. Коркушко, В.Г. Сліпченко. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 182–187.
5. Slipchenko V., Poliagushko L., Kotunov V. Development of hardware and software of the complex for hypoxotherapy. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 2/2(40). P. 22–28; DOI: <https://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2018.128802>
6. Автоматизований програмно-апаратний комплекс для проведення гіпоксичних тренувань: пат. 123682 України: МПК А61М 16/00. № u201707302; заявл. 11.07.2017; опубл. 12.03.2018, бюл. № 5/2018.
7. Джарратано Дж., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование, 4-е изд./пер. с англ. Москва: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. 1152 с.
8. Субботін С.О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: навч. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. 341 с.
9. Михайлов И.С., Зо Мин Тайк. Разработка формальной модели процесса поиска решения по модифицированному алгоритму rete для нечетких экспертных систем. *Программные продукты и системы / Software & Systems*. 2015. № 2 (110). С. 44–47. DOI: 10.15827/0236-235X.110.044-047

10. Тема 4. Информационные модели знаний. Библиотека Карагандинского государственного технического университета: веб-сайт. URL: <http://lib.kstu.kz:8300/tb/books/2015/ITB/Expertnye%20i%20intellektual%60nye%20sistemy/teory/4.htm> (дата звернення: 23.09.2018).

11. Вагин В.Н., Еремеев А.П. Некоторые базовые принципы построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени. *Изв. РАН. ТуСУ*. 2001. № 6. С. 114–123.

12. Бояркина О.О., Шкаликова А.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений. *Современные научные исследования и инновации*. 2016. № 12. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/12/75361> (дата звернення: 23.09.2018).

13. Charles L. Forgy. Rete: A Fast Algorithm for the Many PatternIMany Object Pattern Match Problem. *Artificial Intelligence*. 1982. № 19. P. 17–37.

Надійшла до редакції 20.05.2019