

**Н.І. Аралова**

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ

## КОМПЛЕКС ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ОПЕРАТОРА СИСТЕМ НЕПЕРЕРВНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ СИТУАЦІЙНОЇ НАПРУГИ



Для дослідження надійності роботи оператора в умовах підвищеної ситуаційної напруги пропонується модель ланцюга зі слабкою ланкою, зокрема програмний комплекс для дослідження надійності роботи водіїв військового транспорту та льотчиків при роботі в умовах підвищеної ситуаційної напруги.

Ключові слова: надійність функціонування організму, математична модель функціональної системи дихання, підвищена ситуаційна напруга, модель ланцюга зі слабкою ланкою.

При оцінці надійності роботи оператора, який функціонує в умовах дефіциту часу, в аварійних ситуаціях, в екстремальних умовах зовнішнього середовища, в першу чергу беруться до уваги природні властивості людини з особливостями її нервової системи, проте недостатньо надається значення здатності організму оператора пристосуватися до різноманітних збурень (різкі температурні коливання, робота в умовах гіпо- або гіпербарії). Людина-оператор — це дуже складна система, що функціонує в іншій складній системі *людина—машина—середовище*, котра, в свою чергу, складається із різних підсистем зі своїми взаємовідносинами та зв'язками. Природні особливості нервової системи, здібності, риси характеру, рівень розвитку когнітивної, емоційно-комунікативної та регулятивної сфер, готовність до діяльності — все це властивості різного порядку і їх необхідно враховувати при вирішенні питань, пов'язаних з надійністю роботи водіїв військового транспорту та льотчиків в умовах

підвищеної ситуаційної напруги, тому що їх помилка може коштувати життя не тільки їм самим [1]. Очевидно, що подібні види робіт вимагають зібраності та витривалості, можливості швидкого відновлення. Наразі при дослідженні операторської праці основна увага приділяється психофізіологічним аспектам. Деякі автори зауважують, що об'єктивізація оцінки та контролю функціонального стану оператора безпосередньо пов'язана з даними, які характеризують ступінь напруженості основних фізіологічних систем організму, в т. ч. кардіореспіраторної системи. У більшості досліджень реєструються ЕЕГ, ЕКГ, КРР та дихання. Ряд авторів вважають, що підвищення емоційної напруженості оператора призводить до збільшення амплітуди високочастотних ритмів, частоти серцевих скорочень та частоти дихання. Зокрема в роботі [2] відмічаються суттєві зсуви таких показників, як пульс, частота дихання, величина шкірної температури, локального потовиділення тощо при виконання контрольних тестів на прийняття рішення. У роботі [3] зауважувалось, що най-

більш інформативними показниками тренованості льотчиків є частота серцевних скорочень, величина резервної уваги, об'єм легеневої вентиляції та зажим ручок управління. У роботі [4] з метою ефективного оцінювання ступеня працездатності оператора було запропоновано комплексні методи, що включають оцінювання:

- ✦ якості здоров'я, включаючи інтегральну оцінку;
- ✦ спеціальних операторських можливостей на певний момент;
- ✦ працездатності в екстремальних умовах середовища;
- ✦ відновлення після стомлення;
- ✦ прихованих функціональних резервів;
- ✦ здатності адаптуватися до нових умов і підвищених навантажень.

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЯЛЬНОСТІ РОБОТИ ОПЕРАТОРА В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ СИТУАЦІЙНОЇ НАПРУГИ**

Застосовуючи системний підхід, інженерна психологія використовує широкий арсенал методів та конкретних методик, розроблених як у психології праці, так і в суміжних галузях знань (фізіології, кібернетиці, математиці тощо). У роботі [1] пропонується класифікація методів досліджень за характером отримання даних про діяльність оператора (рис. 1):

- ✦ *фізіологічні методи* використовуються при вивченні функціонального стану людини, характеру реагування різних систем організму на різні зовнішні та внутрішні збурення, які виникають у процесі діяльності людини-оператора (аналіз даних фізіологічного дослідження дає змогу визначити, як і якою ціною здійснюється поточна та екстремальна діяльність організму оператора);
- ✦ *математичні методи* використовуються для статистичної обробки результатів, пошуку закономірностей, побудови моделей діяльності оператора.

Особливістю методів моделювання є те, що в них розглядаються не реальні процеси, а штучно побудовані об'єкти, які певним чином співвідносяться з реальними явищами.

При фізичному моделюванні вивчається діяльність оператора в лабораторних умовах за допомогою спеціального обладнання — тренажерів, стендів, макетів, експериментальних об'єктів тощо. Це інженерно-психологічний експеримент із відтворення психологічної структури та особливостей реальної діяльності оператора в лабораторних умовах. Математичне моделювання досліджує діяльність оператора за допомогою математичних моделей, які відображають реальний процес. При цьому є певні обмеження щодо застосування отриманих результатів. Імітаційне моделювання здійснюється на математичних моделях, які відтворюють діяльність людини в динаміці її діяльності при різноманітних зовнішніх та внутрішніх збуреннях.

Інженерна психологія окремо виділяє системи безперервної взаємодії, до яких належать системи типу *водій—автомобіль* [1]. Робота операторів, що керують рухами об'єктів, має характерні особливості, які зумовлені значною швидкістю пересування об'єктів, раптовим виникненням критичних ситуацій, значною ймовірністю зміни параметрів навколишнього середовища тощо. Для операторів, які знаходяться на самому об'єкті, важливе значення має стан емоційної напруженості під час їх діяльності. До того ж вони залежать від таких факторів, як прискорення, зміна тиску, температури, вібрація, коливання, шум і т.п. Крім того, оператори в окремих випадках повинні працювати у спеціальному спорядженні і перебувати у малогабаритних приміщеннях. Зокрема, це стосується льотчиків та водіїв танків та бронемашин. Цілком очевидно, що сама система висуває підвищені вимоги до стану здоров'я та фізичної підготовки операторів.

#### **ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ОПЕРАТОРА СИСТЕМИ НЕПЕРЕРВНОЇ ВЗАЄМОДІЇ**

Аналізуючи задачі теорії надійності складних технічних систем [5] та методи їх розв'язку [6] стосовно об'єктів живої природи, зокрема до організму людини, можна стверджувати, що вони адекватно описують процеси, які від-

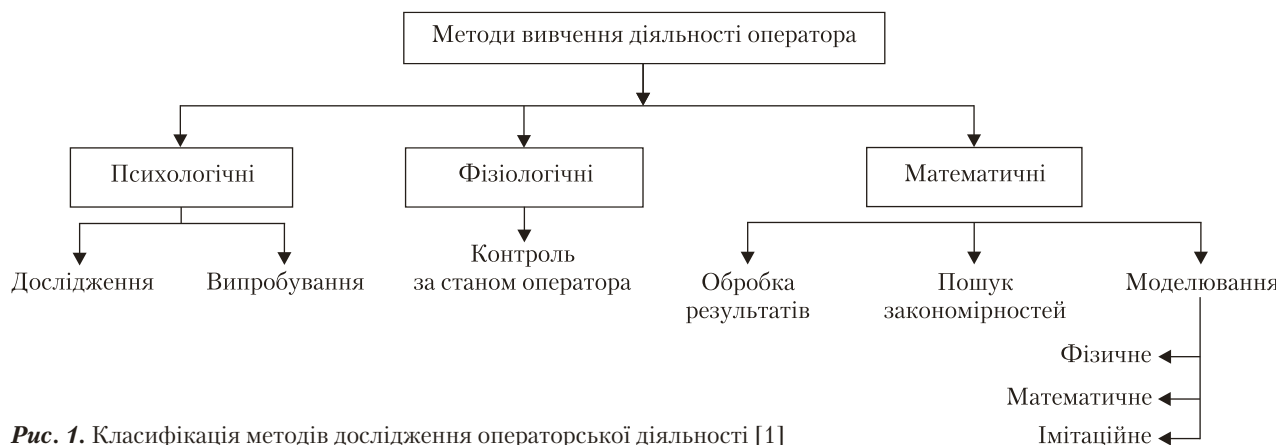


Рис. 1. Класифікація методів дослідження операторської діяльності [1]

бувають у популяції, у суспільстві, для оцінки надійності колективних дій. Що стосується застосування цих методів до оцінки параметрів надійності конкретного індивідуума, особистості, то тут існує ряд застережень. Зокрема, на відміну від об'єктів технічної природи, життєвий цикл яких точно визначений, множина функцій, які має виконати організм людини, розмита та повністю не визначена, тому що еволюція людства та розвиток цивілізації ставлять перед організмом нові, раніше не відомі задачі [7]. При цьому ряд функцій — живлення, дихання, розмноження, захист організму — лишаються незмінними. Сучасний рівень техніки демонструє багато прикладів систем, що самоорганізуються, які демонструють високий рівень надійності функціонування при визначених проєктантом умовах, проте, в непередбачених ситуаціях, апарат буде не в змозі функціонувати. Жива система має функціонувати (і досить надійно) в умовах зовнішнього та внутрішнього середовища, що постійно змінюються, при цьому приймати найбільш оптимальні рішення по забезпеченню високонадійної життєдіяльності. Наприклад, в організмі людини основна функція системи дихання — своєчасне і адекватне забезпечення киснем тканин, що метаболізують, та вивід вуглецю, що утворюється, керується системою, яка складає мережу центральних, локальних та гуморальних механізмів, що тісно взаємодіють

один з одним. Жива система — це система цілеспрямована, вона сама формує цілі життєдіяльності, критерії оптимальності та може пожертвувати або безпекою життя заради досягнення мети, або відмовитися від роботи заради нормальних умов життєдіяльності.

Очевидно, що можна привести ще багато принципових особливостей живих систем, які необхідно враховувати при моделюванні та визначенні надійності їх функціонування з використанням методів теорії надійності. З іншого боку, жива система — це складна динамічна система, отже до неї можуть бути застосовані загальні закономірності поведінки та надійності функціонування складних систем. Справді, в живих системах також можна чітко визначити три стадії змінення функції загрози відмови  $R(t)$ :

- ✦ випадкові (невипадкові) відмови, пов'язані з вимушеними пороками організму, вродженими патологіями;
- ✦ ефективність праці. На цій стадії всі фізіологічні системи організму функціонують нормально, без патологій. Рівень надійності цілісного організму залежить від особливостей психофізіологічної системи організму та поставлених цілей. Середнє значення безвідмовної роботи може суттєво залежати від вартісного значення мети. Може трапитись, що досягнення мети з урахуванням внутрішніх резервів організму неможливе, оскільки це призведе до їх повного виснаження. Тоді системи

організму, відповідальні за прийняття рішень про зупинення роботи, приймуть саме таке рішення. Середній час безвідмовної роботи також залежить від умов, в яких здійснюється життєдіяльність людини. Саме тому важливою є оцінка надійності функціонування живої системи при різноманітних збуреннях;

- ✦ ризик невиконання (відмови) роботи при старінні організму або розвитку патологій.

Таким чином, можна стверджувати, що моделі теорії надійності можуть бути застосовані для оцінки надійності роботи оператора в умовах підвищеної ситуаційної напруги.

Задача моделей надійності — встановити зв'язок між елементами системи та їх впливом на роботу цієї системи. Функціональна структура системи визначає закон взаємодії характеристик елементів, відповідно до якого вони функціонують визначеним чином та у визначеній послідовності.

Якщо систему побудовано таким чином, що для її успішного функціонування необхідна робота всіх елементів, то вона називається *послідовною системою*. Якщо ж у системі при відмові будь-якого елемента знайдеться інший, здатний виконати його функції, то така система називається *паралельною*. Живі системи як складні системи слід відносити до послідовно-паралельних систем [8]. Справді, в живих системах деякі функції, якщо не цілком, то хоча б частково можуть бути заміщені за рахунок більш напруженої роботи інших систем (депонування крові, еритропоез, локальні та центральні механізми регуляції системи дихання тощо).

У роботі [7] запропоновано модель відмов для живої системи. У цій моделі  $S$ -подія, яка полягає в тому, що система працює безвідмовно (підтримує живучість та виконує прописані (задані) функції), а  $S_j$  — подія що полягає у безвідмовному виконанні своїх функцій підсистемами. Припустимо для цієї системи, що  $S$  має місце завжди, якщо має місце  $S_j, j = \overline{1, n}$ , тобто

$$S = S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \dots \cap S_n, \quad (1)$$

звідки

$$P(S) = P(S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \dots \cap S_n),$$

$$P(S) = \left[ \prod_{j=1}^n P(S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \dots \cap S_n) \right] P(S_n). \quad (2)$$

Якщо припустити, що  $S_j$  незалежні у сукупності, то

$$P(S) = \prod_{j=1}^n P(S_j) \quad (3)$$

і функція надійності визначається співвідношенням

$$R = \prod_{j=1}^n R_j. \quad (4)$$

Для залежних послідовних систем також використовується модель «найслабшої ланки».

Розглянемо послідовну систему, в якій відмова настає тоді і тільки тоді, коли відмовляє одна чи більше підсистем:

$$F = F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cup \dots \cup F_n. \quad (5)$$

Також припустимо, що коли система відмовляє, то відмовляє і деяка «відмічена» підсистема. Це припущення можна виразити співвідношенням

$$F \subset F_1. \quad (6)$$

Але оскільки  $F \subset F_1$ , то події  $F$  та  $F_1$  еквівалентні та мають одну й ту ж ймовірність:

$$P(F) = P(F_1). \quad (7)$$

Оскільки будь-яке з  $F_j$  призводить до  $F$ , то

$$F \supset F_j, j = \overline{2, n}. \quad (8)$$

Звідси

$$P(F) = P(F_1) = \max P(F_j) \quad (9)$$

або

$$R = R_j = \max R_j. \quad (10)$$

Якщо «відмічену підсистему» розуміти як «найслабшу ланку» послідовного ланцюга, то механізм відмов у ній має властивості механізму відмов ланцюга. Ланцюг складається із ланок, одна з яких або декілька є найслабшими, тобто їх міцність мінімальна.

Модель «найслабшої ланки» можна застосувати для розрахунку надійності не лише цілісної системи, а й її окремих підсистем.

Припустимо, що міцність окремої ланки ланцюга задається шляхом розподілу ймовірностей. Нехай сукупність міцностей ланок має щільність  $f(x)$  та відповідну функцію розподілення  $F(x)$  такими, що

$$F(b) - F(a) = \int_a^b f(x) dx \quad (11)$$

представляє ймовірність знаходження міцності ланки між  $a$  і  $b$  ( $b > a$ ).

Аналогічно, нехай напруження на ланку характеризується щільністю  $g(y)$  та функцією розподілення  $G(y)$  так, що

$$G(d) - G(c) = \int_c^d g(y) dy. \quad (12)$$

Якщо ввести додатні випадкові величини  $X$  — міцність ланки та  $Y$  — застосовані зусилля (напруження), то

$$\begin{aligned} P(X \leq x) &= F(x), \\ P(Y \leq y) &= G(y). \end{aligned} \quad (13)$$

Надійність ланки визначається як ймовірність того, що ланка не розірветься:

$$\begin{aligned} R &= P(X > Y), \\ R &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(x)g(y) dx dy \end{aligned} \quad (14)$$

або

$$R = \int_0^{\infty} g(y) [1 - F(y)] dy. \quad (15)$$

Якщо тепер розглянути ланцюг, який складається із  $n$  ланок, то можна вважати, що його міцність дорівнює міцності найслабшої ланки, тобто міцність  $Y_n$  ланцюга із  $n$  ланок дорівнює мінімуму із  $X_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

У теорії надійності показано [6], що для будь-якого значення напруження  $Y_n$ , прикладеного до ланцюга з щільністю ймовірності  $g(y)$ , ймовірність того, що міцність  $Y_n$  переважатимуть зусилля (напруження)  $Y$  буде складати

$$R_n = P(Y_n \supset Y) = \int_0^{\infty} g(x) [1 - F(x)] dx$$

або

$$R_n = \int_0^{\infty} g(x) [1 - F(x)] dx. \quad (16)$$

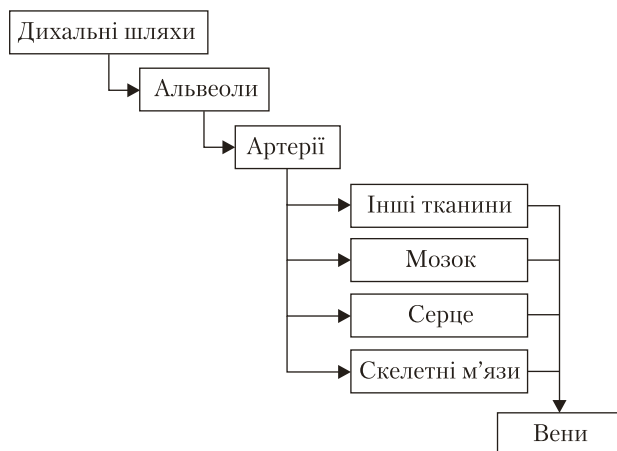
Отже, надійність ланцюга із  $n$  ланок дорівнює  $R$ . Розглядаючи модель надійності цілісного організму як модель ланцюга, можна вважати, що «найслабшою ланкою» в ній є підсистема дихання і кровообігу та система психофізіологічних функцій. Оскільки працездатність організму багато в чому залежить від того, наскільки надійно і при цьому ефективно виконується основна функція системи дихання та кровообігу (слабка ланка), то в подальшому будемо розглядати саме цю систему. Вихідні характеристики системи дихання та кровообігу будемо визначати кількісно, виходячи із основної функції системи дихання — своєчасна і адекватна доставка кисню органам, що метаболізують, та виведення відпрацьованого вуглецю.

Можна вважати, що свою функцію система виконує успішно, якщо напруження кисню та вуглекислого газу в артеріальній крові ( $p_a O_2$  та  $p_a CO_2$ ) в тканинах ( $p_t O_2$  та  $p_t CO_2$ ) знаходяться в заданих границях.:

$$\begin{aligned} p_a^{min} O_2 &< p_a O_2 < p_a^{max} O_2, \\ p_a^{min} CO_2 &< p_a CO_2 < p_a^{max} CO_2, \\ p_t^{min} O_2 &< p_t O_2 < p_t^{max} O_2, \\ p_t^{min} CO_2 &< p_t CO_2 < p_t^{max} CO_2. \end{aligned} \quad (17)$$

Мінімальні значення напружень кисню та вуглекислого газу в крові та тканинах визначають діапазон порогових значень. Якщо ці значення менші — це призводить до патології в системі крові та тканинного обміну, якщо більші — це показники, які приймають в умовах основного обміну, тобто це значення, за яких відбувається відмова від роботи. Функціональна схема процесу здійснення основної функції системи дихання наведена на рис. 2

У роботі [7] обґрунтовано, що структурно-функціональну схему системи дихання для визначення надійності її функціонування слід представити у вигляді послідовної схеми, де як окремі елементи можна розглядати підсистеми зовнішнього дихання, легеневого кровообігу, серцевої діяльності та судинної системи, систему регуляції та систему крові.



**Рис. 2.** Функціональна схема здійснення основної функції системи дихання.

Як відомо, однією із головних задач теорії надійності складних систем [6] є розробка методів встановлення режимів та вибору характеристик, що забезпечують оптимальну надійність, розробка оптимальних методів виявлення порушень, встановлення причин їх виникнення тощо. Для розв'язання цих задач теорія надійності використовує результати фізичних і хімічних процесів, що лежать в основі явищ, пов'язаних з втратою якості. Ці ж самі задачі вважаються основними у фізіології праці, спорту та відпочинку. З'ясуванню природи механізмів організму, що забезпечують досить високий рівень надійності всіх його функціональних систем та організму в цілому і сприяють дослідження на математичних моделях функціональної системи дихання, для створення яких сучасна фізіологія має достатньо знань про процеси дихання та кровообігу [9–12]. Аналіз цих моделей дозволяє визначити основні закономірності перебігу процесів дихання та кровообігу, роль регуляторних механізмів у забезпеченні та підтримці основної функції системи дихання при різноманітних умовах життєдіяльності людини та найважливіші властивості процесу, який вивчається. Зокрема, давно відомо про стійкість організму людини, в т. ч. і системи дихання до збурень зовнішнього та внутрішнього середовища. Математичне моделю-

вання основної функції системи дихання не тільки підтвердило цю властивість, а й розкрило механізми його проявлення.

Властивості стійкості процесів дихання та кровообігу є дуже важливим фактором при забезпеченні надійності функціональної системи. Процес забезпечення тканин киснем та виведення відпрацьованого вуглецю, які мають властивість при короткостроковому чи постійно діючому збуренні внутрішнього середовища входить в область відносної рівноваги, при якій швидкість доставки кисню (виведення вуглецю) дорівнює швидкості його споживання (утворення). Тобто відбувається короткотермінова або середньотермінова адаптація організму до збурення [7]. Надійність функціональної системи при цьому зберігається на високому рівні. Але це відбувається тоді, коли збурюючий вплив не призводить до зниження напруження кисню в тканинах нижче критичних (якщо ми застосовуємо модель ланцюга — збурюючі зусилля не перевищують міцність ланки ланцюга). Модель демонструє, що процес стійкий для досить широкого діапазону збурень і може підтримуватися пасивними механізмами саморегуляції (еритропоезом, оксигемоглобіном, міоглобіном тощо). Проте стійкість процесу є лише необхідною, а не достатньою умовою властивості системи підтримувати надійність виконання своєї функції.

Встановлено, що для надійної роботи окремих органів та тканин необхідно мати високий рівень середнього напруження кисню в цьому органі. Зокрема, для мізкової тканини цей показник складає 33 мм рт. ст. Механізми підтримання стійкості процесу дихання за рахунок лише біохімічних регуляторів не при всіх збуреннях може підтримувати такий рівень. Високий рівень кисневого гомеостазу в тканинах забезпечується активними механізмами регуляції — вибором адекватних до збурення вентиляції, кровообігу, розподілення кровообігу серед тканинних регіонів у відповідності до їх потреби у кисні. Ці механізми не стільки підтримують стійкість процесу дихання та кровообігу,

скільки створюють умови для нормального виконання функцій системою дихання при зміні умов життєдіяльності, тобто сприяють підтримці надійності на досить високому рівні.

Таким чином, механізми активної регуляції процесу дихання та кровообігу є механізмами короткотермінової та середньотермінової адаптації до умов внутрішнього та зовнішнього середовища, що змінюються [7]. Як короткотермінова, так і середньотермінова адаптації та їх сумісний вплив не за всіх умов життєдіяльності можуть гарантувати високу надійність функціонування організму при різних видах діяльності. Причина може полягати в психофізіологічних та структурно-морфологічних особливостях окремого індивідуума. Зазначимо, що не менш важливою є здатність організму людини до довготермінової адаптації. На цьому етапі відбуваються зміни в структурах підсистем, окремих органах і тканинах, змінюються коефіцієнти чутливості організму до гіпоксії та гіперкапнії.

Отже, характеризуючи механізми організму, що сприяють підвищенню рівня надійності роботи функціональної системи дихання та надійності цілісного організму при виконанні їм визначених дій для досягнення мети, слід виділити механізми, які підтримують стійкість процесів короткотермінової, середньотермінової та довготермінової адаптації: механізми центральної, локальної та гуморальної регуляції стійкості психофізіологічних функцій.

Очевидно, що висока надійність функціонування організму оператора в цілому може підтримуватися лише за умови надійності функціонування всіх систем організму — дихання та кровообігу, терморегуляції, імунної, центральної та периферичної нервової системи [8]. Якщо припустити, що всі системи організму функціонують нормально, то надійність у значній мірі залежить від стану психофізіологічних функцій і можливостей системи дихання та кровообігу забезпечити відповідний рівень метаболізму у тканинах. Зазвичай [4] для оцінювання психофізіологічного стану операторів ви-

користувалися різноманітні функціональні проби, фізичні навантаження, визначаючи при цьому індивідуально-типологічні властивості вищої нервової діяльності (ВНД), функціональну рухливість нервової системи, працездатність головного мозку, функціональний стан вегетативної, кардіореспіраторної, кровотворної, імунної, гормональної систем. Що стосується ступеня напруженості механізмів регуляції систем зовнішнього дихання та кровообігу, об'єктивна складність отримання експериментальних даних щодо механізмів регуляції функціональною системою дихання може бути в деякій мірі компенсована за рахунок проведення обчислювальних експериментів з математичними моделями, які описують поведінку функціональної системи дихання при збуреннях внутрішнього та зовнішнього середовища.

#### **КОМПЛЕКС ПРОГРАМНОЇ ПІДТРИМКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАТОРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ СИТУАЦІЙНОЇ НАПРУГИ**

У цьому розділі представимо можливості застосування методів імітаційного моделювання для визначення надійності функціональної системи дихання у життєзабезпеченні організму при операторській діяльності при збуренні у вигляді умов підвищеної ситуаційної напруги

Функціональна система дихання (ФСД) розглядається як самоорганізована динамічна система, в якій об'єктом є процес масопереносу та масообміну респіраторних газів, а саморегуляція здійснюється системою фізіологічних механізмів, що включає центральні, локальні та гуморальні ланки [9]. Мета такої саморегуляції — підтримка газового гомеостазу при різноманітних збуреннях зовнішнього та внутрішнього середовища. Основними параметрами, по яких судять про стан ФСД, є парціальні тиски (напруження) кисню  $pO_2$  та вуглекислого газу  $pCO_2$  в альвеолярному просторі, крові та тканинах. Функціонально ці ланки об'єднані в системи — зовнішнього дихання, серцево-судинну та крові.

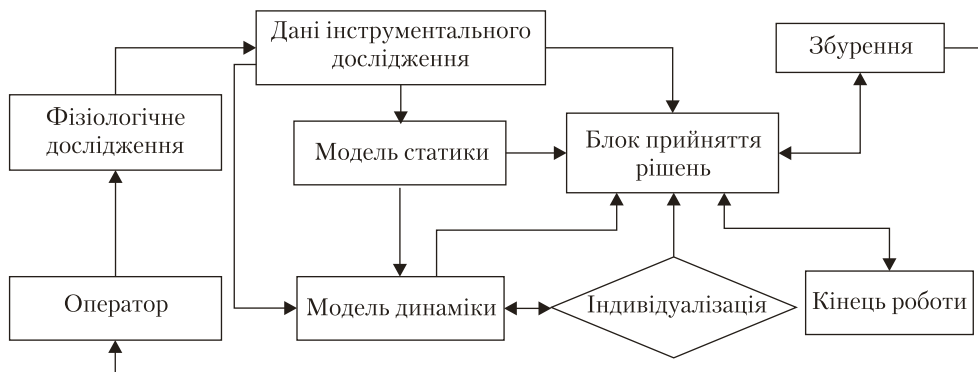


Рис. 3. Структура комплексу математичного забезпечення дослідження

Напружена операторська діяльність пов'язана з інтенсифікацією метаболічних процесів, що протікають насамперед у головному мозку. Зміну інтенсивності такої діяльності без сумніву можна пов'язати зі змінням споживання кисню  $q_t O_2$  тканинами мозку, дихального коефіцієнта  $RQ$  та швидкості виділення вуглекислого газу  $q_t CO_2$ . Параметрами, що характеризують стан досліджуваного об'єкту, можуть бути напруження кисню  $p_{t_i} O_2$  та вуглекислого газу  $p_{t_i} CO_2$  в тканинах організму та крові, що їх омиває:  $p_{ct_i} O_2$ ,  $p_{ct_i} CO_2$ . Проте поточний рівень  $p_{t_i} O_2$ ,  $p_{t_i} CO_2$ ,  $p_{ct_i} O_2$ ,  $p_{ct_i} CO_2$  буде суттєво залежати від величини об'ємної швидкості локального кровотоку  $Q_{t_i}$ , легеневої та альвеолярної вентиляції  $\dot{V}$  та тонуусу гладеньких м'язів судин. Для оцінки стану функціональної системи дихання будемо використовувати математичну модель транспорту респіраторних газів та регуляції основної функції системи дихання та кровообігу [9].

Структуру комплексу математичного забезпечення дослідження операторської діяльності в умовах підвищеної ситуаційної напруги наведено на рис. 3.

Ітераційна процедура використання запропонованого математичного забезпечення має такий вигляд: на основі інструментального дослідження одержуємо експериментальні дані, необхідні для розрахунку кисневих режимів організму на моделі статики [11].

У результаті розрахунків отримуємо дані про економічність, ефективність, інтенсивність кис-

невих режимів організму, деякі дані про кислотно-основний та гіпоксичний стани людини, кисень крові та серцеву діяльність. На вхід моделі динаміки подається інформація, отримана в результаті експериментального дослідження та роботи моделі статики (напруження респіраторних газів в артеріальній крові, вміст гемоглобіну, швидкість споживання кисню організмом, швидкість системного кровотоку, регіонарні кровотоки тощо). На моделі розраховуються напруження респіраторних газів у тканинах працюючих органів. Ці дані дозволяють зробити висновки про адаптацію організму до тих чи інших збурюючих впливів. Оцінка регуляторних реакцій виконавчих органів керування — серцевого та дихальних м'язів, глибина гіпоксії — дозволяє судити про резерви організму людини на збурюючі впливи.

Були проведені теоретичні дослідження на моделі з чотирма тканинами — мозку, серця, скелетних м'язів та ін. (рис. 2). Моделювання проводилося для режиму середньостатистичної людини масою 75 кг, для якої відомі показники функціонального стану в спокої — напруження кисню в артеріальній крові складає 95 мм рт. ст., в тканинах мозку — 38, в серцевому м'язі — 30. Швидкість споживання кисню тканинами мозку складала 0,62 мл/с, серцевим м'язом — 0,33 мл/с, організм в цілому споживав 4,3 мл/с кисню. Вміст гемоглобіну в крові складав 140 ммоль/л, концентрація буферних основ — 0,479 г/л. Мета обчислювальних экс-



периментів полягала у визначенні регуляторних параметрів, що забезпечують напруження кисню в тканинах мозку на рівні не нижче 33 мм рт. ст. У обчислювальному експерименті зростання інтенсивності операторської діяльності імітувалося за допомогою зростання швидкості споживання кисню тканинами мозку на 10; 20; 30 і більше %. При цьому дихальний коефіцієнт у спокої приймався рівним 0,8, а при навантаженні — 1,2. Розрахунки показали, що підтримання заданого рівня  $pO_2$  в тканинах мозку при зростанні швидкості споживання кисню мозком до 20 % від рівня спокою можливе і без підключення компенсаторних реакцій з боку системи дихання та кровообігу. Зауважимо, що в стані спокою об'ємна швидкість системного кровотоку складала 95 мл/с, а об'ємна швидкість кровотоку в мозку — 14,88 мл/с.

Зростання навантаження на мозок на 30 % потребує включення регуляторних механізмів. Якби реакція регуляторних механізмів була відсутня, то  $pO_2$  в мозку мало б знизитися до 31,77 мм рт. ст. Розрахунки показали, що збільшення в тканинах мозку кровотоку на 10 % призвело б до напруження кисню в тканинах мозку до 33 мм рт. ст. При цьому відмітимо, що збільшення кровотоку в тканинах мозку можливе або за рахунок збільшення об'ємної швидкості системного кровотоку, а це приведе в свою чергу до збільшення навантаження на серцевий м'яз, або за рахунок перерозподілу системного кровотоку в інших тканинах і органах, що приведе до виникнення гіпоксії в інших тканинах [8].

Розрахунки показали, що підтримання середнього рівня  $pO_2$  в тканинах мозку (33 мм рт. ст.) про зростанні інтенсивності навантаження на мозок на рівні 30–70 % порівняно зі станом спокою можливе за рахунок збільшення об'ємної швидкості мозкового кровотоку відповідно на 10–50 %, причому приріст відбувається лінійно. Подальше напруження операторської діяльності (на 80–150 %) вже потребує нелінійного зростання кровотоку для забезпечення кисневого гомеостазу структур мозку. Так, зростання швидкості споживання кисню структурами мозку

на 90 % потребує підвищення локального кровотоку на 90 %, зростання інтенсивності операторської праці на 130 % може бути компенсоване збільшенням об'ємної швидкості кровотоку в мозку на 150 %, а 2,5-кратне зростання  $qO_2$  в мозку (на 150 %) вимагає триразового зростання  $Q_t$  в тканинах мозку. Далі покажемо, що компенсація гіпоксичних станів, що виникають у структурах мозку, повинна здійснюватися не лише за рахунок серцево-судинної, але й респіраторної системи. Результати обчислень показали, що якщо збільшувати лише об'ємну швидкість кровотоку в тканинах мозку для підтримання  $pO_2$  на рівні 33 мм рт. ст, то це призведе до розвитку артеріальної гіпоксемії. Так, збільшення кровотоку для компенсації гіпоксії в тканинах мозку при зростанні діяльності мозку в 2,5 рази приведе до зниження  $pO_2$  в артеріальній крові з 95 до 75,05 мм рт. ст. Усунення артеріальної гіпоксемії при напруженій операторській діяльності здійснюється за рахунок підключення механізмів регуляції системи зовнішнього дихання.

Отже, для підтримання  $pO_2$  в тканинах мозку на рівні 33 мм рт. ст. при збільшенні інтенсивності операторської праці на 30 % досить одночасно збільшити хвилинний об'єм дихання на 10 % у порівнянні зі станом спокою, а об'ємну швидкість мозкового кровотоку — на 5 %. При цьому забезпечується підтримання  $pO_2$  в артеріальній крові на рівні 95 мм рт. ст. Цей приклад показує, що поєднане включення механізмів регуляції знижує навантаження з виконавчих органів регуляції та не порушує умов забезпечення киснем інших тканин та органів.

## ВИСНОВКИ

Для дослідження надійності роботи оператора запропоновано математичну модель ланцюга зі слабкою ланкою.

Показано, що надійність функціональної системи дихання як однієї з таких, що регламентує працездатність системи, забезпечується механізмами стійкості та адаптації до умов життєдіяльності, які змінюються.

Розраховані результати, наведені вище, є теоретичними і демонструють компенсаторні можливості лише механізмів регуляції функціональної системи дихання. Але запропонований підхід дозволяє виявити основні тенденції роботи кардіореспіраторної системи і, в разі фізіологічного обстеження конкретних осіб та застосування індивідуальних вхідних даних для роботи моделі динаміки, може дати відповідні практичні рекомендації.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Трофімов Ю.Л. Инженерна психологія. — К.: Либідь, 2002. — 294 с.
2. Психофизиология оператора в системах человек — машина / Под ред. К.А. Иванова-Муромского. — К.: Наук. думка, 1980. — 344 с.
3. Жевчина А.И., Кузнецов В.Г. О методах оценки психофизиологических возможностей летчика // Проблемы инженерной психологии и эргономики. — 1974. — Вып 2. — С. 59—60.
4. Білошицький П.В., Ключко О.М., Онопчук Ю.М., Колчинська А.З. Результати вивчення вищої нервової діяльності українськими вченими в Приельбруссі // Вісник НАУ. — 2009. — № 2. — С. 105—115.
5. Ллойд Д.К., Литов М. Надежность: организация исследований, методы, математический аппарат. — М.: Сов. радио, 1964. — 699 с.
6. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965. — 524 с.
7. Онопчук Ю.Н., Белошицкий П.В., Аралова Н.И. К вопросу о надежности функциональных систем организма // Кибернетика и вычислительная техника. — 1999. — Вып. 122. — С. 72—82.
8. Білошицький П.В., Онопчук Ю.М., Марченко Д.І., Аралова Н.І. Математичні методи дослідження проблеми надійності функціонування організму за екстремальних умов високогір'я // Фізіологічний журнал. — 2003. — 49, №3. — С. 139—143.
9. Онопчук Ю.Н. Гомеостаз функциональной системы дыхания как результат внутрисистемного и системно-средового информационного взаимодействия // Биоэкология. Единое информационное пространство. — Киев, 2001. — С. 59—81.
10. Новосельцев В.Н. Теория управления и биосистемы. — М.: Наука, 1978. — 319 с.
11. Аралова А.А., Аралова Н.И., Ковальчук-Химюк Л.А., Онопчук Ю.Н. Автоматизированная информационная система функциональной диагностики спортсменов // Управляющие системы и машины. — 2008. — № 3. — С. 73—78.
12. Dickinson C.J. A computer model of human respiration. Lancaster: Medical and Technical Publishing, 1977. — 294 p.

#### REFERENCES

1. Trofimov Ju.L. *Inzhenerna psihologija*. Kyiv: Lybid', 2002 [in Ukrainian].
2. *Psihofiziologija operatora v sistemah chelovek — mashina*. Pod red. K.A. Ivanova-Muromskogo. Kyiv: Nauk. dumka, 1980 [in Russian].
3. Zhevchina A.I., Kuznecov V.G. O metodah ocenki psihofiziologicheskikh vozmozhnostej letchika. *Problemy inzhenernoj psihologii i jergonomiki*. 1974. Vyp 2: 59—60 [in Russian].
4. Biloshyc'kyj P.V., Kljuchko O.M., Onopchuk Ju.M., Kolchyns'ka A.Z. Rezul'taty vyvchennja vyshhoi' nervovoi' dijaln'osti ukrai'nsk'ymy vchenymy v Pryel'brussi. *Visnyk NAU*. 2009. no 2: 105—115 [in Ukrainian].
5. Llojd D.K., Lipov M. *Nadezhnost': organizacija issledovaniy, metody, matematicheskij apparat*. Moskva: Sov. radio, 1964 [in Russian].
6. Gnedenko B.V., Beljaev Ju.K., Solov'ev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti*. Moskva: Nauka, 1965 [in Russian].
7. Onopchuk Ju.N., Beloshickij P.V., Aralova N.I. K voprosu o nadezhnosti funkcional'nyh sistem organizma. *Kibernetika i vychislitel'naja tehnik*. 1999. Vyp. 122: 72—82 [in Russian].
8. Biloshyc'kyj P.V., Onopchuk Ju.M., Marchenko D.I., Aralova N.I. Matematychni metody doslidzhennja problemy nadijnosti funkcionuvannja organizmu za ekstremal'nyh umov vysokogir'ja. *Fiziologichnyj zhurnal*. 2003. 49(3): 139—143 [in Ukrainian].
9. Onopchuk Ju.N. Gomeostaz funkcional'noj sistemy dyhanija kak rezul'tat vnutrisistemnogo i sistemno-sredovogo informacionnogo vzaimodejstvija. *Biojekomedicina. Edinoe informacionnoe prostranstvo*. 2001: 59—81 [in Russian].
10. Novosel'cev V.N. *Teorija upravlenija i biosistemy*. Moskva: Nauka, 1978 [in Russian].
11. Aralova A.A., Aralova N.I., Koval'chuk-Himjuk L.A., Onopchuk Ju.N. Avtomatizirovannaja informacionnaja sistema funkcional'noj diagnostiki sportsmenov. *Upravljajushhie sistemy i mashiny*. 2008. no 3: 73—78 [in Russian].
12. Dickinson C.J. *A computer model of human respiration*. Lancaster: Medical and Technical Publishing, 1977.

*Н.И. Аралова*

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова  
НАН Украины, Киев

КОМПЛЕКС ИНФОРМАЦИОННОЙ  
ПОДДЕРЖКИ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
РАБОТЫ ОПЕРАТОРА СИСТЕМ  
НЕПРЕРЫВНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО  
СИТУАЦИОННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для исследования надежности работы оператора в условиях повышенного ситуационного напряжения предлагается модель цепи со слабым звеном, в частности программный комплекс для исследования надежности работы водителей военного транспорта и летчиков при работе в условиях повышенного ситуационного напряжения.

*Ключевые слова:* надежность функционирования организма, математическая модель функциональной системы дыхания, повышенное ситуационное напряжение, модель цепи со слабым звеном.

*N.I. Aralova*

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics,  
the NAS of Ukraine, Kyiv

INFORMATION SUPPORT COMPLEX  
OF THE RESEARCH OF CONTINUOUS  
COOPERATION SYSTEMS'  
OPERATOR WORK RELIABILITY  
IN THE CONDITIONS OF INCREASED  
SITUATIONAL STRESS

To research the reliability of operator work in the conditions of an increased situational stress the model of chain with a weak link is offered. Program complex is offered to study the work reliability of military transport drivers and pilots in the conditions of increased situational stress.

*Keywords:* reliability of organism functioning, mathematical model of function respiratory system, increased situational stress, model of chain with a weak link.

Стаття надійшла до редакції 28.10.15