Космічна наука і технологія. 1998. Т. 4, № 4. С. 156–165.

УДК 681.513

Моделювання динаміки оперативності космонавта в умовах тривалого перебування в пілотованих системах

Р. М. Камінський

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

Надійшла до редакції 13.04.98

Представлений математичний підхід і моделі для ідентифікації робочого стану та якості діяльності космонавта-оператора в людино-машинному інтерфейсі систем управління складними технологічними процесами. Запропоновано модель динаміки оперативності тривалостей процесів вибору, прийняття і реалізації рішень у формі часового ряду та модель на основі марковських процесів для визначення ймовірності перебування оператора в конкретному стані працездатності. Моделі зорієнтовані на слідкуючі системи ідентифікації діяльності оператора безпосередньо на його робочому місці.

ВСТУП

За останній час у високовідповідальних складних системах прослідковується тенденція зростання рівня автоматизації і комп'ютеризації людино-машинних інтерфейсів підсистем керування складними технологічними процесами. Висока надійність, резервованість та якість технічного оснащення таких інтерфейсів перекладає на людину-оператора фактично всю відповідальність за порушення режимів роботи довіреної йому системи. Це значною мірою зумовлено тим, що сприйняття та аналіз вхідної інформації, процеси вибору, прийняття та реалізації рішень та їх оперативність, загальна результативність роботи визначаються його робочим станом. У зв'язку з цим питання ідентифікації біжучого робочого стану оператора відносно його норми є актуальним і надзвичайно важливим. Одним з можливих способів розв'язку цієї проблеми є розробка індивідуальних математичних моделей динаміки показників якості операторської діяльності. Такі моделі є базовими для систем виявлення відхилень показників якості роботи оператора безпосередньо в його робочому середовищі. Індивідуальні моделі узагальнюють типові для нього робочі характеристики та динаміку їх показників протягом роботи та під впливом різних факторів. Їх також використовують як опорні при ідентифікації біжучого робочого стану оператора. Найбільш адекватними є моделі динаміки показників операторської діяльності та моделі на основі марковських процесів, які дозволяють враховувати різні стани системи. В роботі [12] розглядається поведінка людино-машинної системи на моделі марковського процесу з двома станами. Марковська модель з трьома станами для оцінки надійності оператора представлена в роботі [15]. Однак ці моделі розглядають лише нормальні та критичні стани оператора і не враховують проміжних станів. Це виключає можливість своєчасної підтримки оператора при погіршенні показників його роботи.

Метою даної роботи є відображення ролі часових витрат при аналізі ситуацій, виборі, прийнятті, та реалізації рішень людиною-оператором в узагальнених моделях його діяльності, представлення діяльності цього показника в умовно розділених

© Р. М. КАМІНСЬКИЙ, 1998

просторах працездатності і функціонального стану оператора та створення математичних моделей тенденції його оперативності для систем ідентифікації біжучого робочого стану оператора з індивідуальними моделями для його норми.

1. ФОРМАЛІЗАЦІЯ ДІЯЛЬНОСТІ КОСМОНАВТА В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ СКЛАДНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

Розглянемо деякий замкнутий ізольований фізичний простір, який переміщується в космосі. Таким простором може бути космічний орбітальний комплекс, пілотована космічна станція тощо. Загальною особливістю таких об'єктів є те, що вони гранично наповнені апаратурними засобами життєзабезпечення, навігації, наукових досліджень і зв'язку. Програма дій персоналу є строго визначеною, робоче середовище максимально обмежене, а інтенсивність інформаційних потоків може перевищувати їх нормальне та допустиме сприйняття оператором.

Представимо операторську діяльність на прикладі керування космонавтом-оператором протягом часу $[0, T]$, деяким гіпотетичним технологічним процесом $Z(t)$, наприклад виконанням однієї з програм польоту. Такий процес включає і узагальнює найтиповіші аспекти і компоненти реальної операторської діяльності в людино-машинному інтерфейсі систем управління складними технологічними процесами для різних предметних областей, включаючи і роботу на пілотованій космічній станції. Протягом функціонування станції в регулярні або випадкові моменти часу t_i (відповідні до ситуацій) $t_i \in T$, де $T = \{t_i: t_i \in [0, T], i = 1, 2, ..., N\}$, контролюючими пристроями фіксується характеристичний вектор показників режимних параметрів даної технології. Усі зміни значень цих показників і моменти часу цих змін реєструє головний чи спеціальний бортовий комп'ютер, який також фіксує моменти часу реалізації команд космонавта-оператора. Інформація про стан керованої технології та точуюче середовище представлена операторові на олі уваги пульта керування.

Нехай G^* — множина нормативних та інструктивних значень параметрів, які визначають оптимальну роботу керованої технології $Z(t)$, а G — множина реальних значень цих параметрів, які визначають біжучий стан цієї технології. В довільні моменти часу t_i оператор отримує інформацію про процес $Z(t_i)$. В результаті порушення режиму технології, границь параметрів робочого середовища, впливу різного роду завад Π в каналах передачі і перетворення інформації, ця інформація відображає дійсний стан технології вектором $\mathbf{g}_i = \mathbf{g}(t_i)$ у формі зображення $x_i \in X$, де $X = \{x_i: x_i = x(t_i), t_i \in T, i = 1, 2, ..., N\}$, на інформаційному полі пульта керування. Ці зображення сформовані на основі вектора значень $\mathbf{g}_i = \langle g_1, ..., g_r \rangle$, $\mathbf{g}_i \in G$ і визначають біжучий стан $Z(t_i)$ в момент t_i, де $r = 1, 2, ...$ — кількість параметрів, в загальному різна для різних моментів часу. Вони представлені на полі уваги і використовуються оператором для розпізнавання та прийняття відповідних рішень. Вектори параметрів $\mathbf{g}_i^*$, які відповідають інструкціям і нормативам G^*, для нормальних режимів роботи технології попередньо сформовані в пам'яті оператора у формі зображень $x_i^* \in X^*$.

На основі результатів аналізу зображень x_i і x_i^* оператор ідентифікує біжучу ситуацію, вибирає або конструює та приймає відповідне рішення $y_j \in Y$, де $Y = \{y_j: y_j = y(t_j), j = 1, 2, ..., N, t_j = t_i + t_i, t_j, t_i \in [0, T]\}$, а t_i — час вибору, прийняття і реалізації рішень. Прийняте рішення у формі набору команд u_h, які утворюють вектор керування $\mathbf{u}_j = \langle u_1, ..., u_h \rangle$, $\mathbf{u}_j \in U$, де U — множина команд керування, $h = 1, 2, ...$ — кількість команд в j-й ситуації, виконуються безпосередньою дією оператора на органи керування.

Постійне нервове і розумове напруження, почуття відповідальності та обов'язку, довготривала робота створюють суттєве психофізичне навантаження на оператора. При цьому сповільнюються когнітивні та моторні функції, погіршується зоровий пошук, знижується оперативність та безпомилковість дій, виникає значне нервово-психічне перенапруження. Незважаючи на великі резервні та адаптаційні можливості людини, такий стан негативно відбивається на якості її роботи. Тому при аналізі діяльності оператора ефективність його роботи характеризують конкретними робочими етапами c_k. Множина $C = \{c_k: c_k = c(\delta t_k), \delta t_k = t_{k+1} - t_k; t_k, t_{k+1} \in [0, T]\}$ цих етапів на практиці розглядається як дискретна, хоча чітку межу між c_k і c_j встановити неможливо.

На основі визначених базових складових операторської діяльності сформулюємо задачу оператора і фактично загальну модель його діяльності в системі управління технологією $Z(t)$ наступним чином:

— розпізнати для даного моменту часу t_i на зображенні $x_i \in X$ відхилення біжучих параметрів $\mathbf{g}_i$ від режимно заданих їх значень $\mathbf{g}_i^*$ і компенсувати ці відхилення вибором відповідного вектора команд $\mathbf{u}_h$, реалізація якого поверне для технології $Z(t)$ заданий режим роботи. Вибір, прийняття і реалізація рішення повинні мати максимальну дос-

товірність $p \to 1$ при мінімальних витратах часу $t \to 0$, тобто

$$X(\mathbf{g}_i - \mathbf{g}_i^*) \xrightarrow[t \to 0]{p \to 1} \mathrm{opt}\, U(x_i, c_i, y_i). \qquad (1)$$

Форма (1) відображає головні аспекти діяльності людини оператора в людино-машинному інтерфейсі щодо оптимізації режимів процесу $Z(t)$ і враховує його індивідуальні робочі стани.

Використовуючи сучасне бачення процесів сприйняття візуальної інформації людиною, модель (1) розгорнемо таким чином.

Інформація про біжучий стан технології $Z(t)$, перетворена в зображення $x_i \in X$, подається операторові на інформаційному полі уваги. Це зображення є моделлю вхідної інформації $M(X(\mathbf{g}_i, t_i))$ на «вході» оператора. Оператор, використовуючи індивідуальні алгоритми розпізнавання, в залежності від ситуації, робочого стану та професійної майстерності крок за кроком будує концептуальну модель даної ситуації $K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$, звертаючись до збереженої в його пам'яті еталонної моделі $E(X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$. В процесі розпізнавання ефективність взаємодії інформаційної $M(X(\mathbf{g}_i, t_i))$ та еталонної $E(X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$ моделей, їх інформаційна повнота, чіткість та строга відповідність даній ситуації визначають ефективність створення концептуальної моделі $K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$. Цей процес залежить не лише від якості зображення x та стану середовища, але і від робочого стану оператора, який повною мірою визначає характер і оперативність когнітивних та моторних складових роботи зорового аналізатора, пам'яті, мозку. Аналізуючи біжучу ситуацію в процесі побудови для неї концептуальної моделі $K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$, оператор в своїй уяві переважно звертається до різних аналогів та множини Y варіантів рішень y_j, що зберігаються в його пам'яті, для вибору або створення відповідного рішення та вектора керуючих команд $\mathbf{u}_t$, відповідного даній концептуальній моделі. Крім того, оператор може в уяві програвати та аналізувати можливі наслідки від прийняття вибраного того чи іншого рішення.

Процеси аналізу, вибору та реалізації рішень при високій кваліфікації оператора в якісному аспекті можна вважати безпомилковими, високоефективними або оптимальними, проте в кількісному аспекті вони вимагають відповідних затрат часу, які в кожній ситуації є індивідуальними показниками і визначають швидкодію даного оператора. В цьому випадку такі процеси можна представити на базі моделі [13], яка враховує вплив перешкоджаючих факторів, заданих множиною Π, в трактах перетворення інформації та представлення зображень x_i у формі системи відображень

$$\begin{aligned}
&\alpha: Z(t) \times G^* \times \Pi \times T \to G,\\
&\omega: G \times \Pi \times T \to X,\\
&\mu: X \times \Pi^* \times T \to M(X(\mathbf{g}_i, t_i)), \quad \Pi^* \in \Pi\\
&\kappa: M(X(\mathbf{g}_i, t_i)) \times E(X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i)) \times T \times C(\delta t) \to \qquad (2)\\
&\quad \to K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i)),\\
&\upsilon: K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i)) \times Y \times C(\delta t) \times T \to U,\\
&\rho: U \times T \times \Pi \to G \cup G^*.
\end{aligned}$$

Таким чином, множини моментів часу і станів $\{T\}$, $\{C\}$, пари множин $\{X, X^*\}$, $\{G, G^*\}$, $\{Y, U\}$, моделі $M(X(\mathbf{g}_i, t_i))$, $E(X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$ і $K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$, а також відображення α – апаратурних перетворень; ω — візуалізації параметрів G; μ — сприйняття інформації оператором; κ — створення концептуальної моделі; υ — вибору вектора команд U та ρ — реалізації прийнятого рішення — характеризують загальну структуру роботи людино-машинного інтерфейсу системи управління технологією $Z(t)$.

В представленні (2) відображення κ і υ включають множину C робочих станів оператора, тобто їх реалізація є виключно прерогативою оператора. Вони визначають ефективність його роботи і при високій надійності і працездатності технічних засобів практично повністю визначають ефективність людино-машинного інтерфейсу системи керування. Тому для високовідповідальних систем врахування людського фактора є дуже актуальним і свідчить про необхідність індивідуального підходу до організації, оптимізації і контролювання якості операторської діяльності.

2. ПОНЯТТЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ, ПРАЦЕЗДАТНОСТІ, ОПЕРАТИВНОСТІ ТА ЗВ'ЯЗОК МІЖ НИМИ

Всі вимоги і обмеження, які накладаються на операторську діяльність і практично визначають її ефективність, можуть бути зведені до двох категорій: достовірності (точності) і своєчасності (оперативності) [7], що саме і враховує модель (1).

Точність операторської діяльності визначається тією повнотою знань і досвіду оператора, які організовані в його пам'яті у формі еталонної моделі $E(X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$ і яка дає конкретні представлення про нормативні показники роботи системи, що повинні бути досягнуті при виконанні окремих дій, а також про ті зміни, які необхідно виконати в системі для отримання потрібного результату. На ос-

Таблиця 1. Типові означення функціональних станів людини-оператора

Фази	Функціональний стан
–	Мобілізація; умовнорефлекторним шляхом підвищується тонус центральної нервової системи і підсилена функціональна активація багатьох психофізіологічних органів і систем; оператор у відмінній формі, внутрішньо зібраний, зосереджений на найкраще виконання роботи, чітко усвідомлює задачу і має сформовану концепцію дій.
I	Первинна реакція; короткочасне зниження багатьох показників психофізіологічних процесів, зумовлене гальмуванням, пов'язаним зі зміною зовнішніх подразників; оператор входить в систему, старається відчути її реакцію на свої дії, «зливається» з системою, утворюючи єдиний з нею організм.
II	Гіперкомпенсація; оптимізація фізіологічних механізмів, поступове підвищення тонусу центральної нервової системи, вироблення чітких динамічних стереотипів; оператор «втягується» в роботу, звикає до особливостей системи, поставлених задач, оптимізує алгоритм своєї діяльності, показники роботи покращуються.
III	Компенсація; встановлення оптимального режиму органів і систем організму, стабілізація показників; нормальна якість роботи, відсутні помилки, затрати часу на операції мінімальні, тривала і високоефективна праця.
IV	Субкомпенсація; зниження високого рівня, підтримка необхідного рівня основних функцій за рахунок послаблення менш важливих; розвивається втома, показники якості роботи знижуються, зростають часові витрати. Відчувається деяке напруження.
V	Декомпенсація; неухильне погіршення психофізіологічних функцій організму, виразні вегетативні порушення; відчувається втома, порушується точність рухів, зростає кількість помилок, робота вимагає щораз більших зусиль на мобілізацію, ефективність праці стрімко падає.
—	Зрив; розлад регулюючих механізмів, неадекватність фізіологічних реакцій на подразники зовнішнього середовища; різкий спад організованості, неможливість продовжувати роботу, значні витрати часу та велика кількість помилок, робота неприпустима.

нові сталонної моделі оператор організовує свою діяльність і підтримує її точність протягом всієї роботи.

Час в трудовій діяльності виступає головним критерієм продуктивності та ефективності. Він є кількісним показником інтеграційних процесів різних функцій організму, мобілізованих на досягнення поставленої мети. Своєчасність прийняття рішення, швидкість реалізації команд, часові витрати при виконанні тих чи інших дій є визначальними характеристиками операторської діяльності. Часові характеристики один з основних складових показників протікання когнітивних процесів, робочого стану оператора, його завантаженості, втоми, напруженості, уважності. Головною особливістю часових витрат є те, що вони, з однієї сторони, характеризують оператора в сенсі його психофізіології, тобто відображаються динамікою функціональних станів його організму, а з другої, — в сенсі динаміки оперативності, що відображає зміну рівня працездатності.

При дослідженнях людино-машинних інтерфейсів поняття функціонального стану та працездатності стосовно людини-оператора дуже взаємопов'язані. Кожній дії оператора відповідає свій комплекс психофізіологічних процесів та певні співвідношення між їх складовими. Перевищення хоча б однією складовою допустимих границь приведе до зниження якості виконання оператором його функцій або до невиконання поставленої перед ним задачі. За результатами діяльності оператора можна визначити рівень його працездатності, проте визначити його функціональний стан практично неможливо. Виникає проблема взаємозв'язку, з однієї сторони, функціональних станів, а з іншої – працездатності та якості роботи.

Найчастіше функціональний стан визначають як фонову активність центральної нервової системи, при якій на даний момент виконується та чи інша робота [2]. З огляду на це під функціональним станом оператора розумітимемо інтегральний прояв своєрідної організації інтенсивностей всього комплексу психічних і фізіологічних процесів, які на даний момент часу визначають загальний рівень функцій організму в даному робочому середовищі при визначеній меті та завданнях. В цьому розгляді прийнято, що функціональний стан оператора зумовлений станом центральної нервової системи та станами різних фізіологічних систем. Означення фаз функціональних станів в психофізіологічній практиці переважно відповідає наведеним в табл. 1.

Розглянемо поняття працездатності. В літературних джерелах поняття працездатності переважно пов'язують з трудовою діяльністю та функціональними станами [3, 4, 8]; відображенням істинної працездатності, як вважають автори роботи [9], є такий рівень ефективності праці, при якому її максимальний прояв не шкодить здоров'ю; автори роботи [11] трактують працездатність як прогностич-

Таблиця 2. Прийняті означення рівнів працездатності

Рівні	Критерії – знання, досвід, узгодженість
1	Глибокі теоретичні і практичні знання в межах галузевої предметної області, великий досвід роботи на різних технологічних системах даного та аналогічних профілів, інтенсивність основних та допоміжних інформаційних потоків значно нижчі від можливостей сприйняття, ергодизайн відповідає естетичним уподобанням, почуттям зручності і комфорту, оперативне забезпечення різноманітною додатковою і спеціальною інформацією.
2	Повні знання методології і технології в даній предметній області; значний досвід роботи на конкретній та деяких аналогічних технологічних системах; добра узгодженість – інтенсивність основних та допоміжних інформаційних потоків дещо нижчі від можливостей сприйняття, ергодизайн відповідає естетичним уявленням, є відчуття зручності, робочого комфорту, забезпеченість необхідною додатковою і спеціальною інформацією.
3	Достатні знання методів і особливостей даної технології; є практичний досвід роботи на конкретній технологічній системі та різних технологічних процесах; нормальна узгодженість – інтенсивність основних і допоміжних інформаційних потоків та їх аналіз в межах можливостей сприйняття, ергодизайн забезпечує почуття зручності, забезпеченість додатковою і спеціальною інформацією.
4	Необхідні знання, лише для підтримки режимів даної технології; невеликий досвід стосовно конкретного технологічного процесу; слабка узгодженість – основні та допоміжні інформаційні потоки відповідають можливостям сприйняття, проте нестандартні ситуації вимагають мобілізації уваги і спричинюють напруженість, ергодизайн забезпечує певною мірою зручність, але неповним є забезпечення додатковою і спеціальною інформацією.
5	Поверхові знання, лише для підтримки режимів конкретного технологічного процесу; незначний досвід в межах технічного забезпечення та основних методик роботи даного технологічного процесу; низька узгодженість – пред'являються лише найбільш важливі інформаційні потоки даного технологічного процесу, деякі елементи ергодизайну створюють незначний дискомфорт, неоперативне забезпечення додатковою інформацією.
6	Слабкі знання, лише основних характеристик технологічного процесу та призначення елементів пульта керування; малий досвід роботи з пультом керування та практика на тренажерах; дуже низька узгодженість – пред'являються лише найважливіші показники технології, ергодизайн незначний, відсутність забезпечення додатковою інформацією.

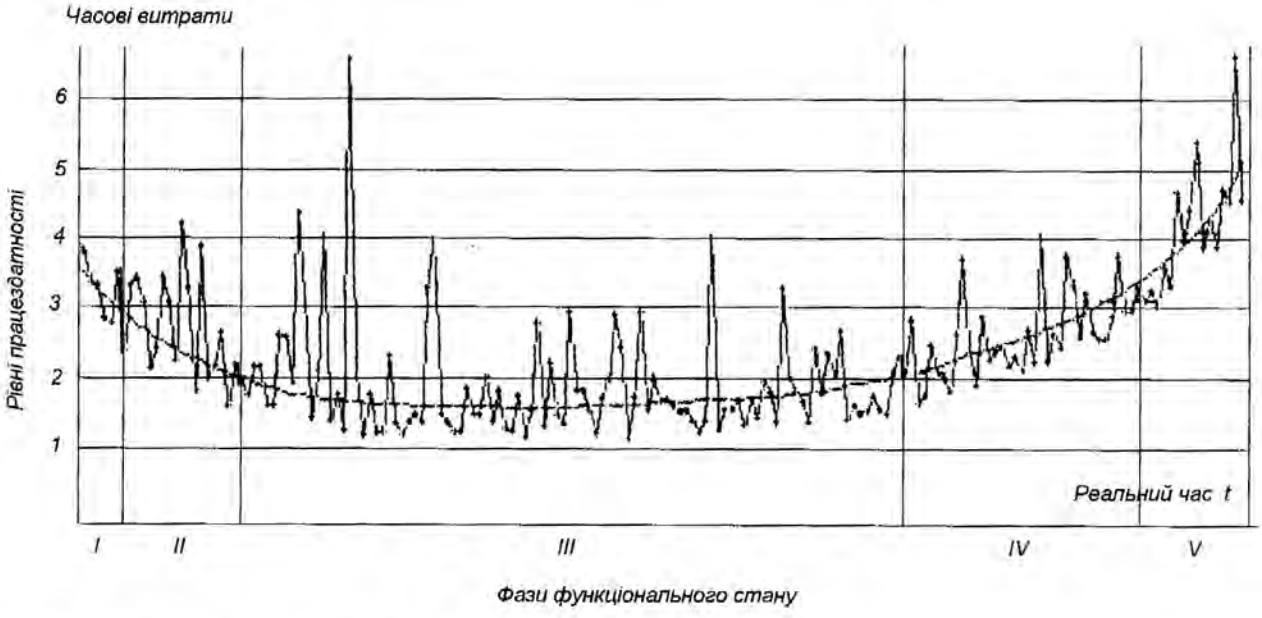
ну категорію, що оцінює трудові можливості людини в часі; в статті [10] на підставі експериментальних даних розглядають шість рівнів працездатності: висока, підвищена, середня, знижена, низька та дуже низька.

Не вступаючи в полеміку, зауважимо, що логічно стосовно людини-оператора слід визначати категорію працездатності як функцію $P = P(Q, E, F, A)$, де Q – професійні знання, E – досвідченість, F – функціональний стан організму, A – рівень узгодження з індивідуальними можливостями оператора інформаційних потоків та ергодизайну виконавчих пристроїв. Складові Q, E, A є відносними, набутими в процесі навчання і роботи, а F визначає природний стан організму. Рівні працездатності важко розділити на окремі класи, оскільки складові працездатності є незалежними категоріями. Наприклад, добре підготовлений оператор в погано організованому робочому середовищі може працювати гірше, ніж його слабше підготовлений колега в середовищі з високим рівнем організації і ергодизайну. Тому визначення рівнів працездатності певною мірою є ідеалізованим, а відповідність робочих показників конкретного оператора показникам властивим даному рівню є лише прикрий або приємний факт, який вимагає свого аналізу. Іншими словами, існує відповідність реального результату діяльності деякому з ідеалізованих результатів гіпотетичної діяльності, для яких визначені рівні працездатності.

Сформулюємо шкалу працездатності оператора за такими критеріями: знання, досвід та ергономічна узгодженість. Останнє поняття означає ступінь ергономічної узгодженості можливостей оператора при сприйнятті інформації та реалізації прийнятих рішень в даному робочому середовищі. Ця шкала відображена в табл. 2.

В сенсі наведених міркувань працездатність розглядається як потенційні можливості оператора виконувати ним ефективно, якісно і оперативно конкретну операцію або їх сукупність в даному робочому середовищі, спрямовану на досягнення поставленої мети або розв'язку конкретної задачі.

Індивідуальні комплекси поведінкових реакцій, характер взаємодії і протікання фізіологічних і психічних процесів та рівень узгодженості інформаційно-технічного забезпечення визначають функціональний стан, забезпечують енергетичні, моторні (пластичні) і регуляторні умови виконання оператором цілеспрямованої діяльності в певному діапазоні параметрів робочого середовища. Хоча визначення функціонального стану оператора є досить нечітким як в якісному, так і в метрологічному розумінні і надзвичайно тісно пов'язане з працездатністю, спробуємо їх відокремити таким чином. Умовно розділимо характеристики цих кате-



Динаміка часових витрат. Випадкові значення — реальні дані часових витрат

горій, надавши їм наступну інтерпретацію: фази функціонального стану оператора визначають психофізіологічні функції систем організму впродовж часу роботи, а рівні працездатності його потенційні функціональні можливості.

На фоні цих двох суттєвих складових і характеристик ефективності операторської діяльності показник, обернений до часових витрат, визначає оперативність дій в кількісному плані і відображає взаємозв'язок між ними. Форма цього взаємозв'язку пояснена графіком на рисунку. Фазам функціонального стану відповідають інтервали на осі абсцис, рівням працездатності відповідають інтервали ординат. Часові втрати представлені значеннями випадкових величин та неперервним трендом, який моделює їх узагальнену тенденцію. В реальних ситуаціях деяких станів, особливо крайніх, може і не бути.

Специфічну U-подібну форму тренду в дослідженнях розбивають на 3–5 фрагментів, кожний з яких має власну і переважно загальноприйняту інтерпретацію, яка певною мірою пов'язується з фазами функціонального стану оператора. Іншими словами і більш загально ці інтервали можна охарактеризувати наступним чином: I — перехідний період, II — адаптаційний період, III — період підтримання норми, IV — період прогресуючої втоми і V — період різкого погіршення показників різних видів діяльності. Принцип виділення цих інтервалів зображено на рисунку.

Людино-машинний інтерфейс є цілісною відповідно зорієнтованою системою, тому діяльність людини повинна оцінюватись відносно досягнення поставленої мети, в допустимих рамках зміни її працездатності. В сучасних автоматизованих системах задачі переважно є добре структуровані, діяльність оператора здійснюється в умовах досить жорстких часових та інформаційних обмежень і визначена добре відлагодженими алгоритмами, а її ефективність визначається переважно часовими витратами на вибір, прийняття і реалізацію рішень.

Тому врахування часових показників має важливе і вирішальне значення при організації та оптимізації робочих місць та проектування алгоритмів операторської діяльності.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЧАСОВИХ ПОКАЗНИКІВ ОПЕРАТОРА

При моделюванні динаміки операторської діяльності основними даними є витрати часу на виконання окремих елементарних операцій чи на функціонально завершені групи операцій.

Розглянемо роботу оператора в інтервалі часу $[t_{j-}, t_{j+m}]$, де t_j, $t_{j+m} \in [0, T]$. Нехай кожен раз фіксується значення часу, затраченого на конкретний вид операцій, тобто тривалість часу t_j з моменту виникнення ситуації, яка вимагає відповідної операції, до моменту її завершення оператором у

формі реалізації команди на пульті. Очевидно, в кожний момент часу t_j значення часових витрат t_j характеризують оперативність даного оператора. Структурною особливістю цих даних є прив'язка кожного їх значення до конкретного моменту часу: $y(t) = y(t_j)$, $i = 1, \ldots, N$. Їх тренд, як правило, має U-подібну форму, а самі дані є випадковими величинами 2 0з одномодальним, асиметричним і зрізаним зліва законом розподілу. Послідовність в часі таких даних можна представити часовим рядом [14]

$$y(t) = m(t) + h(t) + \varepsilon_t \,, \qquad (3)$$

де $m(t)$ — тренд даних, який характеризує загальну тенденцію динаміки, $h(t)$ — складова, яка враховує сукупність коливальних компонентів даних відносно тренду, а ε_t — випадкові некорельовані величини з $E[\varepsilon_t] = 0$ і $D[\varepsilon_t] = \sigma^2$.

Фактично тренд $m(t) = f(t_i, \Theta_1, \Theta_2, \ldots, \Theta_n)$ є гладкою неперервною функцією, вид якої відповідає тенденції показника. В цьому плані задача елімінації тренду вважається однією з основних задач аналізу часових рядів і є головною при моделюванні динаміки працездатності оператора, а в даній роботі його оперативності.

Одним з варіантів розв'язку цієї задачі є апроксимація тренду, для чого широко використовують степеневі поліноми. При цьому необхідно врахувати такі зауваження.

1. Реальні ряди, в залежності від моментів початку і кінця збору даних, можуть описувати лише повну U-подібну залежність або її фрагменти, тому слід знайти певний компроміс між степенем полінома та його гнучкістю, оскільки при високому степені полінома екстремуми відображатимуть коливальність і тренд братиме на себе функції коливальної складової $h(t)$.

2. При знаходженні оцінок параметрів полінома можуть виникати різні труднощі в обчисленнях, що може вплинути на точність розрахунків.

3. Коефіцієнти при аргументах непридатні для фізичної інтерпретації і їх складно використати для оцінки чи взаємовідповідності щодо інтервалів фаз функціональних станів.

Якісний аналіз, переважно візуальний, допускає представлення U-подібності тренду зліва гіперболою або експонентою, всередині константою або лінією, а справа — параболою чи деякою показниковою функцією. Тобто модель тренду може бути реалізована в класі сплайнових моделей. Однак вибір сплайнових функцій, критеріїв оптимальності та точок спряження вимагає додаткових попередніх досліджень.

Тому при моделюванні тренду слід з обережністю підходити до вибору класу моделей та вибору їх варіантів.

Постановку задачі при моделюванні тренду часових витрат можна сформулювати як пошук класу моделей, які задовольняють наступні вимоги:

— сімейство моделей просте щодо розрахунку параметрів;
— моделі відповідають характеру фрагментів тренду, а їх параметри допускають фізичну інтерпретацію;
— клас моделей задовольняє принцип вибору і самоорганізації.

Формалізація експериментальних даних на основі принципу самоорганізації використовується для визначення адекватної моделі у відповідності з прийнятими критеріями.

4. МОДЕЛЮВАННЯ ТРЕНДУ ПОЛІНОМАМИ З МІШАНИМИ СТЕПЕНЯМИ

Для розв'язку даної задачі пропонується клас поліномних моделей з мішаними степенями, тобто степінь даного полінома належить множині цілих чисел: $i \in Z$. Ці поліноми мають вид

$$f(t) = \sum_{i=-n}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=1n+1} \Theta_j t^i \,, \qquad (4)$$

де n є порядок полінома.

Тоді для полінома (4) другого степеня матимемо рівняння в такій формі:

$$m(t) = \Theta_1 t^{-2} + \Theta_2 t^{-1} + \Theta_3 + \Theta_4 t + \Theta_5 t^2. \qquad (5)$$

В цьому представленні кожний з коефіцієнтів умовно «відповідає» за конкретний фрагмент зліва направо узагальненого тренду U-подібної залежності. Таку відповідність параметрів Θ_j можна інтерпретувати як характеристику чи оцінку для кожного з виділених на осі абсцис інтервалів на рисунку. Проте ця відповідність не є безпосередньою і її можна прийняти лише після нормування даних для ідентифікації даних аналогічних моделей трендів, що відповідають одному і тому ж виду діяльності.

В переважній більшості моделюють дані, для яких тривалість збору відповідає кільком послідовним інтервалам. Тобто, отриманий в експериментах часовий ряд (3) не охоплює всю U-подібну залежність, а відповідає лише певному її фрагменту. Слід мати на увазі той факт, що навіть у випадку, коли функція тренду є постійною величиною і визначається лише параметром $\Theta_3 = \text{const}$, який має зміст середнього арифметичного, параметри Θ_1, Θ_2, Θ_4 і Θ_5 не будуть рівні нулю, оскільки вони зв'язані через значення часу для кожного моменту

Таблиця 3. Можливі варіанти моделей-претендентів

Номер моделі	Фрагменти інтервалів та відповідні їм параметри				
	I	II	III	IV	V
	t^{-2}	t^{-1}	t^{0}	t^{1}	t^{2}
1	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	Θ_5
2	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	—
3	Θ_1	Θ_2	Θ_3	—	Θ_5
4	Θ_1	Θ_2	—	Θ_4	Θ_5
5	Θ_1	—	Θ_3	Θ_4	Θ_5
6	—	Θ_2	Θ_3	Θ_4	Θ_5
7	Θ_1	Θ_2	Θ_3	—	—
8	Θ_1	Θ_2	—	Θ_4	—
9	Θ_1	Θ_2	—	—	Θ_5
10	Θ_1	—	Θ_3	Θ_4	—
11	Θ_1	—	Θ_3	—	Θ_5
12	Θ_1	—	—	Θ_4	Θ_5
13	—	Θ_2	Θ_3	Θ_4	—
14	—	Θ_2	Θ_3	—	Θ_5
15	—	Θ_2	—	Θ_4	Θ_5
16	—	—	Θ_3	Θ_4	Θ_5
17	Θ_1	Θ_2	—	—	—
18	Θ_1	—	Θ_3	—	—
19	Θ_1	—	—	Θ_4	—
20	Θ_1	—	—	—	Θ_5
21	—	Θ_2	Θ_3	—	—
22	—	Θ_2	—	Θ_4	—
23	—	Θ_2	—	—	Θ_5
24	—	—	Θ_3	Θ_4	—
25	—	—	Θ_3	—	Θ_5
26	—	—	—	Θ_4	Θ_5
27	Θ_1	—	—	—	—
28	—	Θ_2	—	—	—
29	—	—	Θ_3	—	—
30	—	—	—	Θ_4	—
31	—	—	—	—	Θ_5

та процедурою їх обчислення, крім того, вони представляють цілісну функцію. Тому функція $m(t_i, \Theta_j)$ має розглядатися в різних варіантах. Клас поліноміальних степеневих моделей (4) не вище другого порядку ($|n| \le 2$) з від'ємними показниками включає $m = 31$ варіантів, розділених на п'ять підкласів за кількістю параметрів Θ_j в кожному. Ці варіанти представлені в табл. 3, починаючи з повної моделі у формі (5).

Реалізація принципу самоорганізації для конкретних даних забезпечує вибір адекватної моделі. Суть цього принципу полягає в переборі моделей-претендентів з одного чи з різних класів, враховуючи наступні кроки аналізу даних, їх фізичну змістовність при причинно-наслідковому дослідженні самого явища. В результаті такого перебору визначаються параметри адекватного варіанта моделі, який відповідає прийнятим критеріям.

Складність вибору самих критеріїв полягає в тому, що необхідно визначити як внутрішні, так і зовнішні критерії адекватності [6]. Внутрішні критерії забезпечують вибір варіантів всередині класу, а зовнішні використовуються для остаточного відбору між представниками всіх класів. Внутрішні критерії використовують інформацію, отриману з даних при визначенні параметрів моделі. Як критерії можуть виступати відстані, суми квадратів відхилень, суми модулів тощо. Зовнішні критерії розраховуються на додатковій інформації, яка не використовувалась при оцінці параметрів моделі. Зовнішніми критеріями є інтерпретованість, кількість параметрів, прогнозні властивості, обчислювальні можливості. Проблема вибору критеріїв достатньо повно висвітлена в роботах [5, 6].

Наведений тут підхід описує одновимірний випадок узагальненої характеристики часових витрат операторської діяльності. На основі цього підходу розробляється математична модель динаміки оперативності конкретного оператора.

Оскільки тренд показника оперативності навіть для досвідченого оператора має U-подібну форму, його модель легко знайти у класі поліномів (3) серед підкласів, які виділені за кількістю параметрів Θ_j в кожному. В процесі перебору методом найменших квадратів розраховують параметри всіх моделей претендентів і на основі внутрішніх критеріїв відбирається адекватний варіант в кожному з підкласів. Для цього за внутрішній критерій можемо прийняти мінімальне значення евклідової відстані [1]

$$d(y_i, y_{mi}, n) = \left(\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - y_{mi})^2 \right)^{1/2}, \qquad (6)$$

де y_i, y_{mi} реальне і змодельоване значення показника відповідно, $i = 1, 2, \ldots, n$.

Вибір конкретного робочого варіанта серед підкласів здійснюють за зовнішнім критерієм, наприклад максимально допустимої простоти — (мінімальної кількості параметрів). Це виправдано тим, що в слідкуючих системах контролю, особливо в тих, в яких слідкування здійснюється відносно узагальненої індивідуальної моделі оператора, біжучу модель можна ідентифікувати за окремими її фрагментами, описуючи їх більш елементарними моделями з невеликою кількістю параметрів, використовуючи при розрахунку і відборі ті ж самі критерії — евклідову відстань та допустиму простоту.

Загальними характерними особливостями кожного з підкласів є наступні. Модель першого підкласу, яка відповідає повній моделі (5), найточніше описує дані, проте вона здатна перебирати на себе коливальність тренду, а в обчисленнях є найбільш громіздкою. Моделі другого підкласу мають дещо послаблені характеристики і є ефективними у випадку довгих рядів. Моделі третього підкласу є трикомпонентними, вони достатньо гнучкі і по відношенню до коливної складової $h(t)$ здатні відтворювати лише фрагменти дуже низькочастотних складових, співмірних з характером самої тенденції. Моделі четвертого підкласу є досить простими і виражають лінійні або нелінійні фрагменти тренду; моделі п'ятого вважаємо примітивними, які слід використовувати для опису коротких монотонних фрагментів тенденції.

5. МАРКОВСЬКА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОПЕРАТОРА

Зв'язок поведінки моделі $y(t)$ з рівнями працездатності оператора в загальному має випадковий характер. В процесі реєстрації даних окремі їх значення чи група значень можуть в силу тих чи інших причин виявитися надто великими, що спричинить різке зниження працездатності оператора. Таку зміну характеру даних можна розглядати як випадковий марковський процес на множині рівнів працездатності на підставі властивості

$$p\{m(t_k) = c_k\colon m(t_{k-1}) = c_{k-1}\ ,\ m(t_{k-2}) = c_{k-2}\ ,\ \ldots,$$

$$m(t_{k-s}) = c_{k-s}\} = p\{m(t_k) = c_k\colon m(t_{k-1}) = c_{k-1}\}, \qquad (7)$$

тобто біжучий стан c_k практично залежить лише від попереднього. Вимогу дискретності визначимо як відображення розмаху тренду $[\min(m(t), \max(m(t)]$ на множині інтервалів $c_k = c(\delta t_k)$, де $\delta t_k \in [t_{k+1}, t_k]$, фаз функціонального стану без першої і останньої фази. В межах границь інтервалів, тобто в коридорах, паралельних абсцисі, усереднюємо значення $m^*(t) = 0.5|m(t_{i+1}) - m(t_i)|$ і приймаємо постійним, а функціональний стан оператора протягом часу $t_{i+1} - t_i$ таким, що відповідає даній фазі.

Ймовірності p_i локалізації тренду $m(t)$ у вказаних коридорах визначимо з диференціального рівняння

$$\frac{dp_i}{dt} = -\mu_i p_i(t) + \mu_{i-1} p_{i-1}(t), \qquad (8)$$

де $\mu_r = 0$ при $r \le 1$ — усереднена інтенсивність переходу з даного коридору в сусідній.

Розв'язки цього рівняння при найбільш загальних умовах $p_i(t = 0) = p_i$, $i = 1, 2, \ldots, k$, запишемо у формі

$$\frac{dp_i}{dt} + \mu_i p_i(t) = \mu_{i-1} p_{i-1}(t)\,. \qquad (9)$$

Рівняння (8) є неоднорідним диференціальним рівнянням першого порядку. Враховуючи початкові умови, його розв'язки можна отримати з допомогою рекурентної формули

$$p_i(t) = \frac{\mu_{i-1}}{\mu_i - \mu_0} p_{i-1}(t) + \left[p_i + p_0 \frac{\prod\limits_{k=0}^{i-1} \mu_k (-1)^i}{\prod\limits_{k=0}^{i-1} (\mu_i - \mu_k)} - \right.$$

$$\left. - \sum_{k=1}^{i-1} p_k(t) \prod_{j=1}^{i-1} \left(\frac{\mu_j}{\mu_i - \mu_j} \right) \right] \exp(-\mu_i t)\,. \qquad (10)$$

Ймовірність знаходження значень тренду $m(t)$ в найвищому коридорі визначимо з умови нормування

$$\sum_{j=1}^{k} p_j(t) = 1\,. \qquad (11)$$

При контролі значень тренду $m(t)$ інтенсивність μ_i переходів може бути знайдена як тангенс кута нахилу спрямленого в межах коридору фрагмента $m(t_{i+1}) - m(t_i)$. Інтенсивність μ_i також є інформативним параметром, оскільки вона характеризує локальну динаміку тренда.

Співвідношення (8) і (9) дозволяють визначити ймовірності

$$p\{c = c_k\} = p\{m(t) = m(t, c_k)\} = p_k(t), \qquad (12)$$

рівня працездатності оператора в конкретній фазі функціонального стану. Значення фаз функціональних станів в основному фігурує як підтвердження реальної працездатності. Іншими словами, ймовірність перебування оператора на рівні зниженої працездатності у фазі III повинна бути меншою, ніж у фазах IV або V.

ВИСНОВОК

На основі аналізу загальних представлень діяльності космонавта-оператора на пілотованих космічних системах та базових узагальнених математичних моделей операторської діяльності в наземних системах виділено оперативність як один з головних показників якості роботи оператора. Цей показник є основним при оцінюванні часових витрат при ви-

борі, прийнятті та реалізації рішень оператором. Інтерпретація цього показника відображена у взаємозв'язку функціонального стану і працездатності. На базі узагальненої математичної моделі діяльності оператора в людино-машинному інтерфейсі запропоновано підхід на основі принципу перебору варіантів моделей, який практично синхронно з ходом роботи оператора забезпечує формалізацію отримуваних даних у вигляді моделі їх тенденції, та уточнити розрахунок ймовірностей рівнів працездатності оператора в конкретних фазах функціонального стану. Наведені математичні моделі можуть бути використані при проектуванні та експлуатації систем біжучого контролю якості операторської діяльності та робочого стану операторів як в наземних системах керування, так і на пілотованих космічних станціях.

Отримані результати дають змогу забезпечити алгоритми біжучого контролю опорними моделями, на основі яких визначаються кількісні характеристики операторської діяльності і приймається рішення про підтримку чи заміну оператора при виході цих показників за встановлені межі. Слід зазначити, що на вид класу моделей та вибір критеріїв адекватності моделей практично не накладається строгих обмежень, крім коректного математичного обгрунтування в даній ситуації та контролюючій системі.

1. Гамбаров Г. Н., Мандель И. Д., Рыбина И. А. О некоторых метриках, возникающих в задачах обработки данных // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 12. – С. 116 – 129.
2. Данилова Н. Н., Крылова А. Л. Физиология высшей нервной деятельности. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 399 с.
3. Зараковский Г. М., Корольов Б. А., Медведев В. И. и др. Введение в эргономику / Под ред. В. П. Зинченко. – М.: Сов. радио, 1974. – 352 с.
4. Зараковский Г. М., Павлов В. В. Закономерности функционирования эргатических систем. – М.: Радио и связь, 1987. – 232 с.
5. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – Київ: Наук. думка, 1982. – 296 с.
6. Ивахненко А. Г., Мюллер Й. А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. – Київ: Техніка, 1985. – 223 с.
7. Котик М. А. Курс инженерной психологии. – Таллин: Валгус, 1978. – 364 с.
8. Леонова А. Б. Психодиагностика функциональных состояний человека. – М.: Изд-во Моск. ун-та. 1984. – 200 с.
9. Навакатикян А. О., Крыжановская В. В., Кальниш В. В. Физиология и гигиена умственного труда. – Київ: Здоров'я, 1987. – 152 с.
10. Ставицкий К. Р., Государев Н. А. Методы контроля психической работоспособности и эмоциональной активности // Гигиена и санитария. – 1984. – № 11. – С. 48 – 49.
11. Стрюков Г. А., Грицевский М. А. Работоспособность человека // Гигиена труда и проф. заболевания. – 1973. – № 10. – С. 41 – 43.
12. Jinhua Cao. Stochastic behavior of man-machine system operating under changing environment subjectto a markov process with two states // Microelectron. and Riliab. – 1989. – **29**, N 4. – P. 529 – 531.
13. Kaminsky R. M., Hrytsyk V. V. Generalized system model of man-machine interface for image processing // Pattern Recogn. and Image Analysis. – 1995. – **3**. – P. 53 – 56. – (Proc. of Therd Intern. Conf.)
14. Pham Dinh Tuan. Time series analysis and bioloyg // Lect. Notes Biomath. – 1983. – **49**. – P. 368 – 387.
15. Rahim M. A., Raouf A., Lashkari R. S., A three-state Markovian model for predicting human reliability // Kybernetes. – 1985. – **14**, N 2. – P. 87 – 91.

MODELLING THE ASTRONAUT OPERATIVITY DYNAMICS IN CONDITION DURABLE STAY IN PILOTAGE SYSTEMS

R. M. Kaminskyi

We present a mathematical approach and models for identificating and the working conditions activity quality of an astronaut-operator in the man-machine interface of control systems in complex technological processes. We present a time-series model for the dynamics of the efficiency of choosing, making and realization decisions and marcovian model for determining the probability of concrete working conditions of the operator. The models are oriented to servosystems of operator activity identification immediately at his work station.