

УДК 81.95.53; 34.55

¹О.Ю. Буров, канд. техн. наук
²Б.М. Герасимов, д-р техн. наук**УПРАВЛІННЯ ТА ЧАСОВА ОРГАНІЗАЦІЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОПЕРАТОРА**¹Науково-дослідний інститут проблем військової медицини Збройних сил України
E-mail: burov@ipnet.kiev.ua²Національний університет імені Тараса Шевченка

Розглянуто формування працездатності людини-оператора як динамічного об'єкта, рух якої може бути описаний зміною фазових координат у часі, що супроводжується виникненням біфуркацій. Наведено моделі опису управління працездатністю оператора на різних етапах професійної біографії – професійному відборі, професійному старінні та поточному контролі. Показано часову організацію працездатності з погляду виникнення їх непрогнозованих змін, що пояснює зниження точності прогнозу та шляхи подолання цієї проблеми. Обґрунтовано необхідність урахування динамічних складових працездатності за рахунок елімінації інфрадіанних ритмів для підвищення точності прогнозу працездатності оператора.

Forming of an operator working capacity is discussed as a dynamical object which movement in time can be described with changes of phase coordinates that is accompanied by bifurcation arising. Models of work capacity control are considered for different stages of an operator professional biography – professional selection, professional aging and day-to-day monitoring. Time organization of working capacity is considered from position their changes occurrence that can explain reducing of the prediction accuracy as well as ways to avoid those problems. It is given prove the necessity to account dynamic components of working capacity by way of elimination of infradian rhythms to increase a working capacity prediction's accuracy.

Вступ

Теоретичні положення щодо формування працездатності оператора (ПО) на трьох рівнях психофізіологічного забезпечення діяльності [1] дають можливість визначити показники психофізіологічних параметрів та їх внесок у формування інтегральної працездатності. Вимірювання психофізіологічних показників у процесі діяльності (існування об'єкта діяльності) застосовують в експериментальних дослідженнях в умовах моделювання діяльності для вивчення механізмів формування ПО. Однак перенесення методики, використаної в експериментальних умовах, у виробничі умови потребує ретельного обґрунтування і, як правило, внесення суттєвих змін у методику, що може внести зміни в отримані оцінки. Одним із варіантів оцінювання та вимірювання психофізіологічних параметрів діяльності є оцінка апіорі, наприклад, оцінка зсуву значень відносно до вихідного рівня або суб'єктивна оцінка. Отримана таким чином інформація корисна для вивчення причин виникнення тих чи інших феноменів діяльності, але не придатна для управління станом та ПО.

Психофізіологічну інформацію використовують також для оцінювання функціонального стану (ФС) і ПО в майбутньому.

Інтервал екстраполяції оцінки (прогнозування) залежить від рівня працездатності, що використовується, та від засобів оцінювання–вимірювання, що застосовуються.

Мета роботи – вивчення шляхів і умови надійної та точної оцінки управління ПО.

Управління працездатністю оператора

Управління ПО розглядається в цій роботі лише в аспекті отримання надійної оцінки та передачі користувачеві, прогножуючи її подальше використання на організаційному рівні. Наступна стадія управління – корекція ФС, керовані координати ПО – оцінки працездатності. Завдання управління працездатністю формулюється як завдання оптимального управління.

Об'єкт управління – ПО F описується у фіксований момент часу фазовими векторами загальної $X = (x^1, x^2, \dots, x^k)$,

вікової $Y = (y^1, y^2, \dots, y^l)$

та поточної працездатності

$Z = (z^1, z^2, \dots, z^m)$: $F = \varphi(X, Y, Z, t)$.

Таким чином, рівень реалізованої працездатності визначається точкою N -вимірного евклідового простору R^N , який є фазовим простором ПО.

Рух об'єкта полягає у зміні фазових координат у часі t , тобто фазові вектори є вектор-функціями незалежної координати t , а фазова точка, що описує миттєве положення об'єкта

$F(t) = \varphi(X(t), Y(t), Z(t), t)$,

описує в просторі фазову траєкторію.

Нехай у фазовому просторі R^N задана деяка множина Ω – сукупність усіх фазових станів, в яких об'єкту управління дозволено знаходитися. Тоді під час руху об'єкта його стан

$f = (f_1, f_2, \dots, f_N)$

у кожний момент часу повинен задовольняти умову $f \in \Omega$, яка є обмеженням на фазові координати, професійними обмеженнями або вимогами.

Найбільш важливим є випадок, коли множина Ω замкнена, а фазові траєкторії можуть проходити по його межі, створюючи нестійкий стан працездатності з високим ризиком помилкових дій оператора, який може порушувати обмеження на надійність діяльності.

Припустимо, що положення наявних в об'єкті управління засобів управління описується у фіксований момент часу r управляючими параметрами u^1, u^2, \dots, u^r , тобто вектором управління $u = (u^1, u^2, \dots, u^r)$.

Відповідно з тривірневою моделлю формування працездатності $r = 3$. Управляючі дії означають вибір управління, тобто вектор-функції $u(t)$.

Суттєвим моментом, що характеризує керовану систему, є опис множини припустимих управлінь u , тобто сукупності функцій $u(t)$, які відповідно до реальних обставин задачі дозволяється обирати як управляючі дії і серед яких шукається оптимальне управління. Ця множина визначається потрібними в конкретний момент часу (професійної біографії оператора) вимогами до працездатності. Управляючі дії не можуть набувати будь-яких значень через реальні умови їх використання (обмеженість ресурсів управління, умови експлуатації тощо). Це означає, що в просторі можливих управлінь R^r вказується деяка множина U , область управління, і в будь-який момент часу точка

$$u = (u^1, u^2, \dots, u^r)$$

повинна належати цій множині

$$u \in U. \quad (1)$$

Крім обмеження на значення керуючого вектора в будь-який момент часу, необхідно з'ясувати припустимий характер змін цього вектора з часом. Домовимося розглядати як управління кусково-безперервні вектор-функції $u(t) = (u^1(t), u^2(t), \dots, u^r(t))$, тобто такі, що існують у всіх точках зазначеного інтервалу часу.

Виконується умова (1). Будь-яку таку функцію $u(t)$ можна називати припустимим управлінням. Для того, щоб визначити, як фазова траєкторія буде визначатися вибраним управлінням з урахуванням початкового фазового стану

$$f(t_0) = f_0 = (X_0, Y_0, Z_0, t_0),$$

потрібно знати закон руху об'єкта, що описує динамічні властивості системи.

У загальному випадку описи динаміки професійної ПО протягом його професійної біографії (на інтервалі часу його існування як оператора) невідомі. Зважаючи на гіперкомплексний характер психофізіологічних механізмів формування ПО, більш доцільний пошук не загальної фазової траєкторії, а частково-детермінованих траєкторій на відповідному до оцінювання рівні.

Якщо загальний критерій управління дійсний для всіх рівнів формування ПО, а управління полягає в оцінюванні (прогнозі) ПО, прийнятті рішення щодо оператора (допуск до роботи, коригування працездатності шляхом тренінгу або коригування ФС, недопуск до роботи) і відповідних організаційних або медико-психологічних дій, то окремі критерії якості управління, а також безпосередньо управляючі дії відносно до ПО залежать від рівня управління (оцінювання) ПО.

Часова організація психофізіологічного забезпечення розумової діяльності оператора

Фізіологічні ритми існують на всіх рівнях живої системи – від субклітинного до соціального [2; 3]. Загальноприйнятим є вимірювання фізіологічних величин як функцій часу, для характеристик яких використовуються чотири основні поняття [4]:

- стаціонарні стани;
- коливання;
- хаос;
- шум.

Будь-якої точності вимірювання фізіологічних змінних не дають абсолютно стаціонарної або періодичної послідовності внаслідок дії як екзогенних, так і ендогенних флуктуацій. Тому стаціонарні процеси слід розглядати як періодичні з періодом, який прямує до нескінченності, а періодичні – як такі, в яких період є функцією часу.

У фізіологічних процесах, в яких виникає нерегулярність флуктуацій, використовують поняття шуму (випадкові флуктуації) та хаосу (випадковість або нерегулярність, що виникають в детермінованій системі, які залежать від початкових умов).

У деяких випадках для приблизного опису процесів достатнім математичним апаратом є використання варіаційних статистик, а коефіцієнт варіації є другою після середньої величиною, за допомогою яких досліджуються функціональні стани людини.

Ці параметри базуються на щільності розподілу функції та використовуються для аналізу динаміки процесу.

Однак на підставі однієї лише щільності розподілу неможливо судити про динаміку часових послідовностей [4].

Більш продуктивний підхід для аналізу психофізіологічних параметрів діяльності оператора – використання спектра потужності процесу. Як показують дослідження, інформативність такого підходу набагато вища і дозволяє проводити більш глибокий аналіз та прогноз діяльності [5–7].

Спектри потужності в біологічних системах відомі для широкого кола фізіологічних параметрів [8–11]:

- частота пульсу;
- дихальна ритміка;
- артеріальний тиск;
- електроенцефалографічні параметри.

Типовий спектр має 1–3 піки, що відповідають головним частотам, наявним у сигналі. Крім того, можуть бути наявні піки з меншими амплітудами, а потужність часто буває розподілена за широкою смугою частот. Широкопasmові спектри потужності з піками, що накладаються один на одний, часто пов'язані з хаотичною динамікою, тому їх відокремлення від шуму потребує аналізу вихідних умов.

Оцінка піків спектра часу переробки інформації дозволяє з високою точністю оцінювати та прогнозувати поточну ПО [7]. Проте використання не тільки піків як джерел інформації, а і смуги частот може бути корисним при застосуванні в моделях прогнозування ПО.

У загальному випадку для опису біологічних процесів найкраще підходять методи нелінійної динаміки, започатковані А. Пуанкаре, та розвинуті за останні три десятиріччя методи теорії катастроф [12]. В основі такого підходу лежать поняття стійкого граничного циклу – СГЦ (коливання, які відновлюються після малого збудження в будь-якій фазі коливання) та біфуркації (момент або точка процесу, при якій змінюється кількість та/або стійкість стаціонарних станів і циклів).

З математичного погляду ініціювання та припинення коливань у фізіологічній системі може бути описане біфуркаціями у відповідних моделях. Такі біфуркації простежуються, насамперед, через зміну часової структури психофізіологічних показників, яка відбиває зміну активації окремих фізіологічних систем.

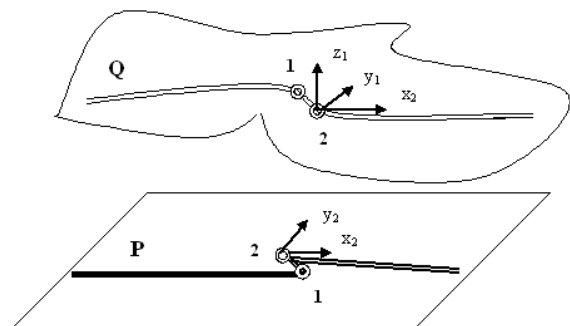
Якщо зникнення кореляції між показниками операторської діяльності та серцевим ритмом може якісно свідчити про зміну ФС [13], то зміни в часовій структурі швидкості виконання когнітивних задач дають більше інформації щодо можливих механізмів процесів психофізіологічної регуляції діяльності оператора [7].

Динамічні моделі ПО поблизу таких точок втрачають структурну стійкість, тобто справедливість моделі може бути тільки на коротких стаціонарних інтервалах розумової діяльності (стаціонарних у середньому рівні, а не в біоритмічній структурі, де справедливніше говорити про СГЦ). Коливання в системах психофізіологічного забезпечення існують завжди, але на підпорогових рівнях.

Однак за деяких умов вони стають надпороговими, що призводить до періодичних на певних інтервалах часу осциляцій, які можна реєструвати.

Стійкий граничний цикл – аналог стаціонарного стану. Підінтервал автоматизації діяльності [7; 14] можна інтерпретувати як підінтервал із СГЦ, оскільки малі збудження безумовно існують, але коливання з періодами 2,5' і 4' зберігаються. Їх зникнення відбувається в точках біфуркації.

Виникнення біфуркацій та катастрофічних переходів у загальному випадку є наслідком того, що простір психофізіологічних параметрів є багатовимірною немонотонною поверхнею, на якій можуть утворюватися збірки Уїтні [12]. Розвиток професійно важливих якостей (ПВЯ), що описується функцією Q , у часі являє собою гладку майже постійну функцію, на поверхні дії внутрішніх та зовнішніх відносно до організму людини факторів (див. рисунок).



Збірка Уїтні для функції зміни професійної придатності у часі:
1, 2 – точки обернення

Ураховуючи дію гомеостазу, функція Q може бути задана в координатах загальної x_2 , вікової y_1 та поточної z_1 працездатності, варіація якої з точки зору управління повинна бути мінімальною: $var Q \rightarrow 0$. Поверхня існування функції Q задається формулою

$$Q = f(x_2, y_1, z_1, y_1 z_1).$$

За умови проведення вимірювання ПВЯ відбувається зниження розмірності простору параметрів через обмеження можливостей оцінки нелінійної системи (живої) шляхом відображення проєкції поверхні на площину оцінки параметрів P .

У цьому разі точка функції Q в просторі з координатами x_2, y_1, z_1 проєктується на горизонтальну площину з координатами x_2, y_2 , а функція оцінки ПВЯ набуває вигляду:

$$P = \begin{cases} y_2, & x_i \leq t_1; \\ y_2 - kx_2, & t_1 \leq x_i \leq t_2; \\ y_2 + c, & x_i \geq t_2. \end{cases}$$

У точках обернення 1 та 2 функція оцінки P втрачає стійкість та однозначність, через що оцінка ПВЯ стає ненадійною, якщо обстеження проводиться одноразово в районі відрізка $1-2$. На цьому інтервалі точки проєкції $[1; 2] \in P$ мають по три прообрази (в них проєктується три точки з множини ПВЯ), точки $(-\infty, 1] \in P$ та $[2, \infty) \in P$ мають по одному прообразу, точки кривої – по два прообрази.

Оцінки ПО підпадають під зазначені особливості Уїтні в точках зміни функціональних станів як на рівні загальної (принципової) працездатності, так і на рівні поточної.

У першому випадку ПВЯ, які зазнають флуктуацій під впливом циркадних або інфрадіанних ритмів, поблизу точок обернення можуть давати похибку більшу за граничнодопустиму

$$|U - \hat{U}| > U_{lim}$$

Для динамічних показників (наприклад, рухливість нервових процесів демонструє певну залежність від ФС, така залежність може набувати ще більшого значення при застосуванні абсолютних рівневих показників.

Для оцінки поточної працездатності, коли динамічні психофізіологічні характеристики набувають ще більшої вагомості [15], точки обернення можуть перетворюватися в точки біфуркації, що не реєструються як зміни рівнів показника, але змінюється часова структура і стійкі коливання (характерні для СГЦ) зі стану нестійкої рівноваги переходять у стан розпаду СГЦ. Відповідно зміна функціонального стану може реєструватися чи ні, а зміна працездатності не може бути зафіксована, що призводить до помилки під час оцінювання та прогнозування ПО.

Отже, оцінювання лише рівнів психофізіологічних параметрів не дозволяє отримувати надійних прогнозів, якщо не враховується еволюція процесу діяльності. Проведення обстеження (вимірювання та оцінювання) з певним інтервалом у часі елімінує ефект біоритмів (тижневих, двотижневих, інфрадіанних) або дозволяє оцінити стійкість динаміки діяльності оператора.

Оскільки вплив зовнішніх факторів на ті чи інші біологічні та психологічні параметри може відрізнятися, але природа впливу відносно стала (визначена генетичними програмами) і перехід від абсолютних шкал значень до відносних дозволяє використати оцінки, менш критичні порівняно з абсолютними.

Періодичний контроль спрямований на повільні зміни ПВЯ (сезонні, викликані перервами у роботі, відпустками, лікуванням, підвищенням кваліфікації, біологічним старінням тощо).

Тому він частково також залежить від дня обстеження, але похибка вимірювання не усувається повторним обстеженням через кілька днів і більш чутлива до змін ФС. Причина біфуркацій змінює характер, який стає більш складним і потребує більш глибокого вивчення [16].

Висновки

1. Визначення прогнозу є окремою складовою загальної системи управління ПО, що базується на відповідних моделях.
2. Механізм зміни ФС та ПО полягає в зміні часової структури темпів психофізіологічних показників та виникненні біфуркацій в точках її зміни, що може викликати неоднозначність оцінки ФС та ПО.
3. Обґрунтовано рекомендації з підвищення точності прогнозу ПО шляхом урахування динамічної складової працездатності, у т. ч. за рахунок елімінації інфрадіанних ритмів.

Література

1. Burov O. Operator functional status and the prediction of fitness for duty // Operator Functional State: The Assessment and prediction of human performance degradation in complex tasks / Edited by G. Robert J. Hockey, Anthony W. K. Gaillard and Oleksandr Burov. NATO Science Series 977821, IOS Press. – Amsterdam, Netherlands, 2003. – P. 179–196.
2. Гречин В.Б., Боровикова В.Н. Медленные неэлектрические процессы в оценке функционального состояния мозга человека. – Л.: Наука, 1982. – 176 с.
3. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека / Отв. ред. и авт. предисл. П.Г. Костюк. – К.: Наук. думка, 1990. – 224 с.
4. Гласс Л., Мэки М. От часов к хаосу: Ритмы жизни. Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 248 с.
5. Баевский Р.М., Чернышев М.К. Некоторые аспекты системного подхода к анализу временной организации функций в живом организме // Теоретические и прикладные аспекты анализа временной организации биосистем. – М.: Наука, 1976. – С. 174.
6. Карпенко А.В., Буров А.Ю., Бобко Н.А., Григорусь А.Г. Индивидуальная автоматизированная оценка работоспособности операторов крупных технологических процессов на основе использования вычислительной техники АСУ предприятий // Гигиена труда и профзаболеваний. – 1987. – № 1. – С. 5–8.
7. Буров А.Ю. Оценка функционального состояния операторов по показателям умственной работоспособности // Физиология человека. – 1986. – Т. 12, № 2. – С. 281–288.
8. Psychophysiological approach to working conditions/ G. Mulder, L.J.M. Mulder, T.F. Meijman, a.o. // In R.W. Barks & W. Boucsein (Eds.), Engineering psychophysiology: Issues and Applications. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 2000. – P. 139–160.

9. Буров А.Ю. Биоритмические аспекты эффективности операторской деятельности машинистов энергоблоков // Энергетика и электрификация. – 1989. – № 1. – С. 53–55.
10. Информативность психофизиологических показателей при оценке функционального состояния организма электросварщиков / А.В Карпенко, В.В. Кальниш, А.П. Капшук і др. // Вопр. гигиены труда и профзаболеваний. – К., 1982.
11. Герасимов А.В. Классификационная оценка электроэнцефалограмм при определении пригодности к обучению операторским профессиям // Физиологический журн. – 1991. – Т. 36, № 2. – С. 71–77.
12. Арнольд В.И. Теория катастроф. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 128 с.
13. Hockey, G.R.J. Cognitive-energetical mechanisms in the management of work demands and psychological health // A.D. Badderley & L.Weiskrantz (Eds.). Attention, selection, and control: A tribute to donald Broadbent. Oxford: Oxford Un Press, 1993.
14. Аладжалова Н.А., Леонова Н.А., Русалов В.М. О соотношении особенностей формирования установки при выполнении автоматизированных умственных операций и сверхмедленных потенциалов мозга // Физиология человека. – 1975. – № 5. – С. 739–752.
15. Venda V., Venda Y. Dynamics in ergonomics, psychology and decisions // introduction to ergodynamics. Ablex., Norwood, NJ, 1995. – 36 p.
16. Буров А.Ю., Герасимов Б.М. Методика и модели исследования влияния гелиофизических факторов на работоспособность операторов // Пробл. психологии и эргономики. – 2005. – №3. – С. 67–71.

Стаття надійшла до редакції 01.06.06.