

## СЕКЦІЯ 10 МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 65.015.11

**Левчук К.О.***кандидат економічних наук, доцент,  
Дніпровський державний технічний університет***Трикіло А.І.***кандидат технічних наук, доцент,  
Дніпровський державний технічний університет*

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ОПЕРАТОРА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

**АНОТАЦІЯ**

У статті отримано перехідну функцію процесу проходження сигналу, запропоновано методiku визначення часу затримки його проходження. В результаті проведених досліджень підтверджено, що фізична працездатність є інтегральним показником функціонального стану організму та залежить від морфологічного і функціонального стану більшості основних систем життєзабезпечення. На підставі результатів визначення функціонального стану, отриманих шляхом тестування студентів, визначено межі рівнів функціонального стану ЦНС людини, які дали змогу визначити щільність (густину) розподілу часу реакції на світловий сигнал, апроксимовану розподілом Релея. Крім того, отримано формулу, за допомогою якої можна визначити рівень функціонального стану оператора, готовності його до роботи, ступінь втоми, а в низці випадків і наявність патологічних функціональних порушень або органічних розладів діяльності центральної нервової системи.

**Ключові слова:** оператор, функціональний стан, світловий сигнал, реакція, працездатність.

**АННОТАЦИЯ**

В статье получена переходная функция процесса прохождения сигнала, предложена методика определения времени задержки его прохождения. В результате проведенных исследований подтверждено, что физическая работоспособность является интегральным показателем функционального состояния организма и зависит от морфологического и функционального состояния большинства основных систем жизнеобеспечения. На основе результатов определения функционального состояния, полученных путем тестирования студентов, определены границы уровней функционального состояния ЦНС человека, которые позволили определить плотность (густоту) распределения времени реакции на световой сигнал, аппроксимированную распределением Релея. Кроме того, получена формула, с помощью которой можно определить уровень функционального состояния оператора, готовности его к работе, степень усталости, а в ряде случаев и наличие патологических функциональных нарушений или органических нарушений деятельности центральной нервной системы.

**Ключевые слова:** оператор, функциональное состояние, световой сигнал, реакция, работоспособность.

**ANNOTATION**

In the article a transient function of the process of passing the signal is obtained and a method for determining the delay of its passage is proposed. As a result of the research, it was confirmed that physical capacity is an integral indicator of the functional state of the organism and depends on the morphological and functional state of the most major life-support systems. The result of this research allows determining boundaries of levels of the functional state of the human central nervous system; this allowed us to de-

termine the density of the distribution of the reaction time on the light signal approximated by the Rayleigh distribution. Also authors obtained a formula that can determine the level of the functional state of the operator, his readiness for work, the degree of fatigue and in some cases the presence of pathological functional disorders or organic disorders of the central nervous system.

**Key words:** operator, functional state, light signal, efficiency, reaction.

**Постановка проблеми.** У загальному вигляді діяльність оператора в автоматизованій системі управління (АСУ) визначають так: людина повинна сприйняти й оцінити інформацію, що надходить, та прийняти своєчасне, а головне, правильне рішення, тобто здійснити необхідну оперативну діяльність, оперуючи відповідними органами управління. Оператор позбавлений можливості безпосередньо спостерігати за об'єктами, якими управляє, і змушений користуватися інформацією, що надходить до нього по каналах зв'язку, тобто людина має справу не з реальними об'єктами управління, а з їх відображенням або інформаційними моделями. Особливостями операторської праці є швидкість роботи, опрацювання значних обсягів інформації за короткий проміжок часу, швидкі переходи від періодів очікування до часу напруженої роботи та швидкі й неконтрольовані зміни зовнішнього середовища.

XXI століття переповнює людину потоком інформації. Особливо важко доводиться операторам. В Англії, наприклад, оператор стає непрацездатним у 40–45 років. Тому перед дослідниками стоїть завдання вивчення надійності оператора та підвищення його стійкості під час функціонування в системі «оператор – людина – середовище».

Під надійністю оператора слід розуміти його властивості виконувати функції, продиктовані йому в цій системі, без помилок протягом певного часу в заданих умовах. У технічних системах надійність кількісно оцінюють за параметрами (напрацювання, напрацювання до відказу, сумарне напрацювання тощо) та ймо-

вірнісними характеристиками (ймовірність безвідмовної роботи, ймовірність відмов, інтенсивність відмов тощо). Найважливішим у теорії надійності є поняття відмови, тобто повної чи часткової втрати здатності виконувати задані функції. В оператора відмовами є помилки під час сприймання інформації, прийняття рішень, виконання керуючих дій та припинення робіт під впливом стресових дій, а також порушення часових режимів роботи тощо.

Деякі характеристики надійності оператора, як зазначив В.Д. Небиліцин, можуть залежати від витривалості, витривалості до екстреного напруження та перенапруження, завадостійкості, спонтанного відвернення, стійкості до дій різних факторів середовища. Надійність оператора значною мірою залежить від виду та характеру інформаційної моделі системи; вирішення її сенсорного та сенсорного полів; просторово-антропометричної, біофізичної та техніко-естетичної сумісності оператора й машини; стресових навантажень на оператора; наявності негативних або позитивних емоцій; ступеня професійного тренування; взаємодії та психофізіологічної сумісності членів колективу; режимів праці й відпочинку. Необхідно враховувати також вплив мотивації, адже задачі повинні належною мірою мобілізувати увагу оператора, але не викликати в нього різноманітних затримок. Не можна, нарешті, забувати про те, що в діях оператора час від часу бувають помилки, причини яких іноді зовсім не можна пояснити. У зв'язку з цим конструктор повинен створювати машину так, щоб її недоліки та зовнішні умови не були первинними факторами зниження надійності оператора.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Метою статті є визначення критеріїв, за допомогою яких можна визначити рівень працездатності та рівень безпечної діяльності людини; прогнозування її стану на період робочого циклу (чергування) чи виконання певного завдання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Діяльність оператора можна зобразити з позиції розгляду так званого чорного ящика. Це поняття введено в кібернетиці. Воно є абстракцією, що відображає не будь-який об'єкт, а відношення дослідника й об'єкта, причому таке відношення, яке в чистому вигляді ніколи не здійснюється. За такого розгляду дослідника цікавить лише сукупність сигналів на вході та відповідних реакцій на виході у вигляді статистичних або динамічних характеристик «чорного ящика». У цьому разі виникає низка проблем.

Зокрема, треба визначити характеристику оператора шляхом зіставлення сигналів на вході та відповідних реакцій на виході, розробивши алгоритм спостереження [1; 3; 4].

На основі аналізу реакцій та вже відомої характеристики оператора можна відновити сигнал та передбачити реакції за заздалегідь відомої його характеристики.

Людину в технологічній системі можна представити як кібернетичну систему [5; 6; 8], структура якої показана на рис. 1.



Рис. 1. Структура кібернетичної системи

Сенс функціонування системи полягає в здійсненні такого кругообігу інформації та з таким ритмом, які потрібні для нормального функціонування об'єкта: дії, що управляють, видаються на об'єкт управління каналами прямого зв'язку, результати цієї дії сприймаються спеціальною системою датчиків та передаються в систему, що управляє, каналами зворотного зв'язку, передані дані разом з раніше накопиченою інформацією перетворюються системою, що управляє, на нові дії, що управляють, після чого процес обміну інформацією триває. Схема взаємодії «оператор – ЕОМ» показана на рис. 2.

Схема проходження сигналу від ока до голови, а потім до пальців рук в загальному вигляді може бути такою:

- 1) відбулась дія – з'явився світловий сигнал;
- 2) зображення з'явилося на сітківці очей;
- 3) по зорових нервах зображення було передане в мозок для розпізнавання;
- 4) мозок аналізує зображення, розпізнає його, приймає рішення про дію;
- 5) від мозку по нервах передається команда м'язам рук;
- 6) м'язи рук скорочуються, пальці натискають на клавіші.

Пункти 2–6 прямо впливають на швидкість реакції. При цьому у різних людей час реакції може коливатись від 0,11 до 0,3 секунди й більше. Різниця буває досить великою, при вимірі вона досягає 200 мілісекунд і залежить від ступеня втоми оператора, що характеризує його працездатність. Австралійський лікар К. Мар-



Рис. 2. Схема взаємодії «оператор – ЕОМ»

бе вважав однією з основних причин схильності до нещасних випадків спроможність до так званого переключення, яка різниться у людей та є природженою якістю. Переключення – це швидка оцінка обставин та пристосовність до їх раптової зміни. Можуть бути переключення пам'яті, уваги, з розумової праці на фізичну тощо. Вважається, що до травм схильні люди з повільним переключенням.

Під працездатністю людини необхідно розуміти здатність організму витримувати навантаження в процесі праці.

На різних рівнях працездатність проявляється по-різному:

- на зовнішньому вона проявляється як процес перетворення предметів праці, виконання дій з обслуговування, оброблення інформації;

- на нейрофізіологічному рівні – як процес збудження, що забезпечує зв'язок рецепторів, нервових центрів, синапсів та м'язів керуючих органів;

- на молекулярному рівні – як процес перетворення енергії хімічних речовин, що забезпечує процес збудження.

Чим більше навантаження у вигляді збудження здатні витримати функціональні одиниці, тим вище працездатність людини.

На думку більшості дослідників, фізична працездатність є інтегральним показником функціонального стану організму та залежить від морфологічного й функціонального стану основних систем життєзабезпечення, перш за все від стану серцево-судинної та дихальної систем.

На рівні фізіології людини можна виділити такі основні блоки (рис. 3), як зоровий аналізатор (ЗА), слуховий аналізатор (СА), тактильний аналізатор (ТА) та комутатор (К).

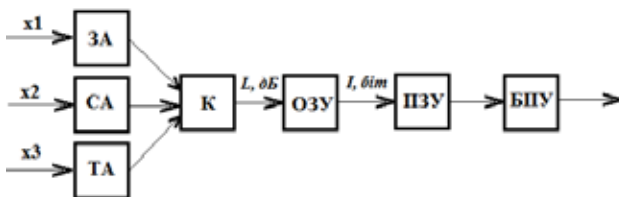


Рис. 3. Інформаційна модель людини

Через них здійснюються прийом та перетворення вхідних сигналів на внутрішні відчуття людини. Цей рівень вирішує тактичні завдання забезпечення безпеки життєдіяльності, орієнтування та переміщення людини в навколишньому просторі [1; 8].

Як основна фізіологічна характеристика людини розглядаються його відчуття, які перетворюють сигнали докільця на кількісні та якісні показники процесу прийому і часткової переробки інформації нею, а також рухи, що управляють, забезпечують взаємодію людини з докільцям.

На рівні інформаційної моделі людини можна виділити такі блоки (рис. 3), як оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗУ), постійний

запам'ятовуючий пристрій (ПЗУ) та блок ухвалення рішення (БПР).

Через них здійснюються прийом та перетворення вхідних сигналів на внутрішні відчуття людини.

Наближена модель взаємодії людини-оператора з ЕОМ може бути представлена спрощеною структурною схемою, яка наведена на рис. 4.



Рис. 4. Структурна схема «оператор – машина»

Для такої схеми виявилось можливим характеризувати діяльність оператора структурною блок-схемою розімкненої системи управління (рис. 5).

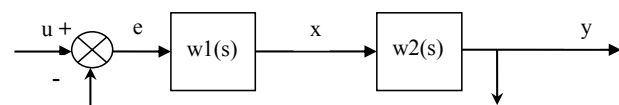


Рис. 5. Блок-схема розімкненої системи управління

Примітка:  $w_1(s)$  – передатна функція ланки, що характеризує інертність нервового тракту оператора та проходження імпульсу по нервовому зоровому тракту;  $w_2(s)$  – передатна функція ланки, що характеризує інертність м'язового тракту оператора

Розглянемо порядок визначення перехідного процесу наведеної системи. Визначаємо передатні функції з періодичною ланкою першого порядку:

$$w_i(s) = \frac{k_i}{1 + T_i \cdot s},$$

де  $k_i$  – коефіцієнт підсилення;

$T_i$  – постійна часу;

$i = 1, 2$ .

Узагальнена передатна функція еквівалентної системи має такий вигляд:

$$w(s) = \left( \frac{k_1}{1 + T_1 \cdot s} \right) \cdot \left( \frac{k_2}{1 + T_2 \cdot s} \right) = \frac{k_1 \cdot k_2}{1 + (T_1 + T_2) \cdot s + (T_1 \cdot T_2) \cdot s^2} = \frac{k_0}{1 + T_{01} \cdot s + T_{02} \cdot 2 \cdot s^2}.$$

Передатна функція еквівалентної системи є керовальною ланкою вже другого порядку.

Перехідний процес цієї передатної функції описується таким виразом:

$$h(t) = b_0 \cdot (e^{-b_1 \cdot t} \cdot e^{-b_2 \cdot t}) \cong b_1 \cdot t \cdot e^{-b_2 \cdot t},$$

З огляду на затримку часу ( $\tau_i$ ) проходження сигналу, обумовлену рівнем функціонального стану ЦНС людини, рівняння матиме такий вигляд:

$$\Phi C_i = b l_i \cdot (t - \tau_i) \cdot e^{-b_2 \cdot (t - \tau_i)},$$

На підставі значень  $\Phi C$ , отриманих в результаті тестування студентів, що виконували практичні роботи на ЕОМ, визначені межі рівнів функціонального стану ЦНС людини. Значення коефіцієнтів рівняння наведені в табл. 1.

Таблиця 1  
Значення коефіцієнтів рівняння

РФС ЦНС	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	τ
ΦС <sub>1</sub>	400	144	0,12
ΦС <sub>2</sub>	200	89	0,15
ΦС <sub>3</sub>	100	55	0,17
ΦС <sub>4</sub>	50	34	0,19
ΦС <sub>5</sub>	25	21	0,20
ΦС <sub>i</sub>	=800·e <sup>-0,693·ΦС</sup>	=233·e <sup>-0,481·ΦС</sup>	=0,12·ΦС <sup>0,322</sup>

Діагностика функціонального стану центральної нервової системи (ЦНС) людини та прогнозування її працездатності заснована на аналізі показників варіаційної хронорефлексометрії, тобто динамічних характеристик часу простої зорово-моторної реакції [2; 9].

Методика, що була розроблена М.П. Мороз, була реалізована у вигляді комп'ютерної програми, в якій процес збирання, оброблення та інтерпретації даних повністю автоматизований. Процес тестування займає не більше 5 хвилин, методика може проводитись багаторазово, оскільки не викликає ефекту звикання.

На екрані монітора з'являється у випадковому порядку зоровий подразник у вигляді засвічення частини екрану. Фіксується час від

появи подразника до моменту його погашення за допомогою натиснення відповідних клавіш на клавіатурі ЕОМ пальцями правої та лівої рук. Процедуру повторюють не менше 10 разів упродовж години. На основі вимірних значень часу зорово-моторної реакції побудовано розподіл вірогідності часу реакції на світловий сигнал (рис. 6), апроксимований розподілом Релея

$$f(x; s) = \frac{x}{s^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2s^2}\right), x \geq 0, s > 0,$$

отриманих значень по розрядах з інтервалом в 50 мс.

За параметрами аналізу розподілу часу реакції людини визначають мінімальну затримку часу (τ<sub>0</sub>), значення часу затримки за якого має максимальне значення, та параметр масштабу розподілу Релея, які наведені в табл. 2.

Таблиця 2  
Параметри розподілу Релея

ΦС	τ <sub>0</sub>	max	S
ΦС <sub>1</sub>	25	105	80
ΦС <sub>2</sub>	50	170	120
ΦС <sub>3</sub>	75	235	160
ΦС <sub>4</sub>	100	300	200
ΦС <sub>5</sub>	125	365	240
ΦС <sub>i</sub>	t/25	(max-40)/65	(s-40)/40

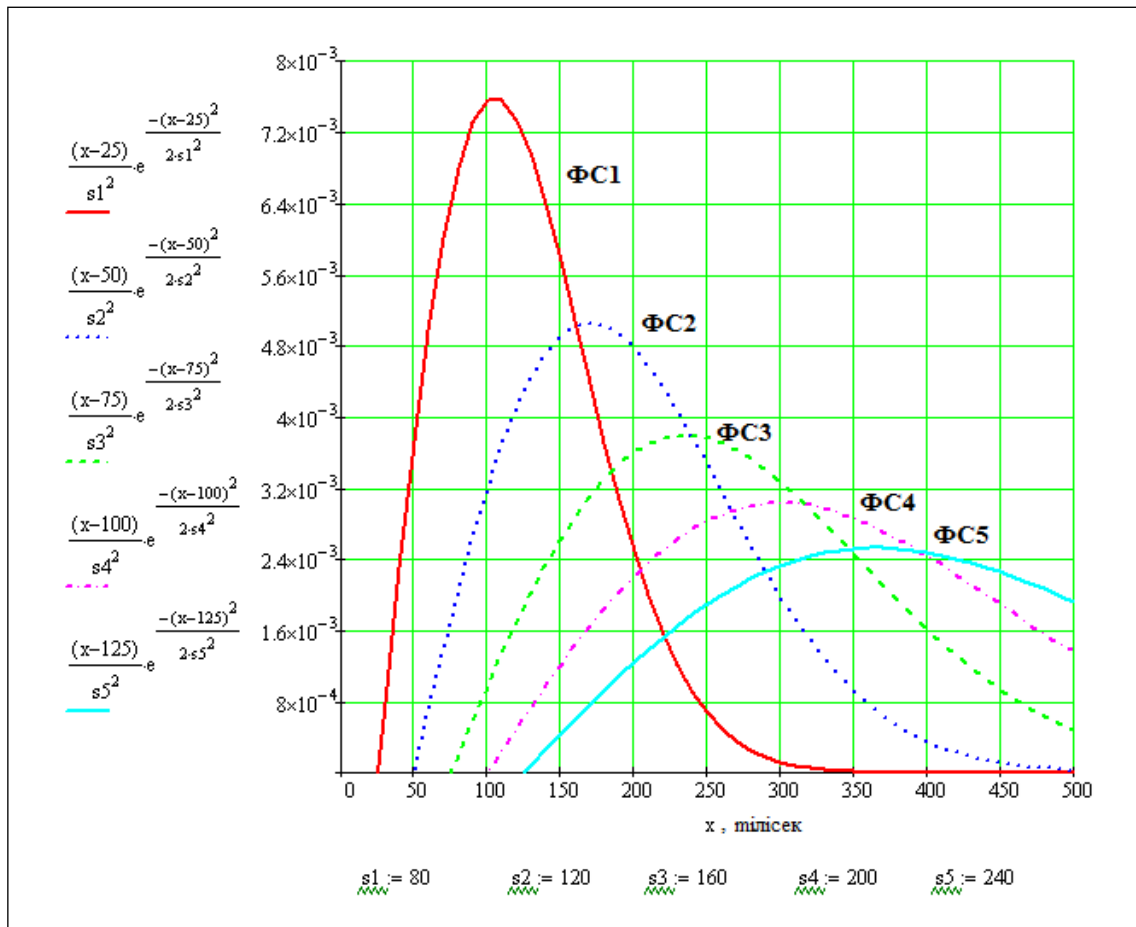


Рис. 6. Щільність (густина) розподілу часу реакції на світловий сигнал, апроксимована розподілом Релея

Значення рівня функціонального стану визначаємо за допомогою математичної формули:

$$\Phi C = 0,05 \max + 0,08s + 0,013t - 0,538.$$

Рівень функціонального стану ЦНС оцінюється за ймовірнісними статистичними параметрами розподілу показників часу орієнтовної зорово-моторної реакції таким чином:

$$t=25; \max=105; s=80; \\ 0,05 \max + 0,08s + 0,013t - 0,538 = 1;$$

$$t=75; \max=235; s=160; \\ 0,05 \max + 0,08s + 0,013t - 0,538 = 3;$$

$$t=125; \max=365; s=240; \\ 0,05 \max + 0,08s + 0,013t - 0,538 = 5.$$

За величиною  $\Phi C$  можна оцінити рівень функціонального стану ЦНС (оптимальний, понижений або істотно понижений), готовності оператора до роботи, ступінь його втоми, а в низці випадків і наявність патологічних функціональних порушень або органічних розладів діяльності центральної нервової системи.

На підставі середніх значень  $\Phi C$ , отриманих в результаті тестування студентів, що виконували практичні роботи на ЕОМ, визначені межі рівнів функціонального стану ЦНС (рис. 6):

- 1) якщо  $\Phi C$   $\max$  (105 мс), при часі затримки до 25 мс рівень  $\Phi C$  оцінюється як обмежений;
- 2) якщо  $\Phi C$   $\max$  (170 мс), при часі затримки до 50 мс рівень  $\Phi C$  оцінюється як оптимальний;
- 3) якщо  $\Phi C$   $\max$  (235 мс), при часі затримки до 75 мс рівень  $\Phi C$  оцінюється як трохи понижений;
- 4) якщо  $\Phi C$   $\max$  (300 мс), при часі затримки до 100 мс рівень  $\Phi C$  оцінюється як понижений;
- 5) якщо  $\Phi C$   $\max$  (365 мс), при часі затримки більше 125 мс рівень  $\Phi C$  оцінюється як істотно понижений.

**Висновки.** У статті отримано перехідну функція процесу проходження сигналу, запропоновано методику визначення часу затримки його проходження.

В результаті проведених досліджень підтверджено, що фізична працездатність є інтегральним показником функціонального стану організму та залежить від морфологічного й функціонального стану більшості основних систем життєзабезпечення.

В дослідженні використано методику, розроблену М.П. Мороз, яка реалізована у вигляді комп'ютерної програми.

Діагностика функціонального стану центральної нервової системи (ЦНС) людини та прогнозування її працездатності заснована на аналізі показників варіаційної хронорефлексометрії, тобто динамічних характеристик часу простої зорово-моторної реакції, яка була проведена за участю студентів, що виконували практичні роботи на ЕОМ.

На підставі отриманих результатів визначення  $\Phi C$ , отриманих в результаті тестування студентів, визначені межі рівнів функціонального стану ЦНС людини, які дали змогу визначити щільність (густину) розподілу часу

реакції на світловий сигнал, апроксимовану розподілом Релея.

Також отримано формулу, за допомогою якої можна визначити рівень функціонального стану оператора.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Кулаков М.В., Пученков Л.Н. Некоторые вопросы моделирования автоматизированных человеко-машинных систем. Информатика и системы управления в XXI веке. 2004. № 3.
2. Методика экспресс-диагностики работоспособности и функционального состояния человека (разработана М.П. Мороз). URL: [http://showtodaytv.com/play-vip\\_tvaR9IYafRPVE](http://showtodaytv.com/play-vip_tvaR9IYafRPVE).
3. Поплавська О.М. Ергономіка: навчальний посібник. Київ: КНЕУ, 2006. 320 с.
4. Корольчук М.С., Крайнюк В.М. Теорія і практика професійного психологічного відбору: навчальний посібник. Київ: Ніка-Центр, 2006. 536 с.
5. Адамчук В.В., Варна Т.П., Вороникова В.В., Паутинка Т.И. и др. Эргономика: учебное пособие. Москва: Логос, 1999.
6. Іваськевич І.О. Ергономіка: навчальний посібник. Тернопіль: Економічна думка, 2002.
7. Справочник по инженерной психологии / под ред. Б.Ф. Ломова. Москва, 1982.
8. Асеев В.Г. Преодоление монотонности труда в промышленности. Москва: Экономика, 1974.
9. Мунипов В.М., Зинченко В.П. Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды: учебник. Москва: Логос, 2001.
10. Корольчук М.С. Психологія діяльності: підручник. Київ: Ельга; Ніка Центр, 2003.
11. Трофімов Ю.Л. Інженерна психологія: підручник. Київ: Либідь, 2002.

#### REFERENCES:

1. Kulakov M.V. Nekotorye voprosy modelirovaniya avtomatizirovannyh cheloveko-mashinnyh sistem / M.V. Kulakov, L.N. Puchenkov // Informatika i sistemy upravleniya v XXI veke. – M.: MTGU, 2004. – № 3.
2. Metodika jekspress-djagnostiki rabotosposobnosti i funkcional'nogo sostojaniya cheloveka (razrabotana M.P. Moroz) [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: [http://showtodaytv.com/play-vip\\_tvaR9IYafRPVE](http://showtodaytv.com/play-vip_tvaR9IYafRPVE).
3. Poplavskaja O.M. Erhonomika: Navchalnyi posibnyk / O.M. Poplavskaja – K.: KNEU, 2006. – 320 s.
4. Korolchuk M.S. Teoriia i praktyka profesiinoho psykhologichnogo vidboru: Navchalnyi posibnyk / M.S. Korolchuk, V.M. Krainiuk. – K.: Nika-Tsentr, 2006. – 536 s.
5. Adamchuk V.V. Jergonomika: Uchebnoe posobie / V.V. Adamchuk, T.P. Varna, V.V. Vorochnikova, T.I. Pautinka i dr. – M.: Logos, 1999.
6. Ivaskevych I.O. Erhonomika: Navchalnyi posibnyk / I.O. Ivaskevych – Ternopil: Ekonomichna dumka, 2002.
7. Spravochnik po inzhenernoj psihologii / Pod red. B.F. Lomova. – M., 1982.
8. Aseev V.G. Preodolenie monotonnosti truda v promyshlennosti / V.G. Aseev. – M.: Jekonomika, 1974.
9. Munipov V.M. Jergonomika: chelovekoorientirovannoe proektirovanie tehnik, programnyh sredstv i sredy: Uchebnik / V.M. Munipov, V.P. Zinchenko. – M.: Logos, 2001.
10. Korolchuk M.S. Psykhofiziologija dijalnosti: Pidruchnyk / M.S. Korolchuk – K.: Elha; Nika Tsentr, 2003.
11. Trofimov Yu.L. Inzhenerna psykhologija: Pidruchnyk / Yu.L. Trofimov – K.: Lybid, 2002.

**Levchuk K.O.**

*Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,  
Dniprovsk State Technical University*

**Trykilo A.I.**

*Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,  
Dniprovsk State Technical University*

## **MATHEMATICAL MODELLING OF THE FUNCTIONAL STATE OF OPERATOR AND DEFINITION OF HIS EFFICIENCY**

In this article, a transient function of the process of passing the signal is obtained and a method for determining the delay of its passage is proposed.

As a result of the research, it was confirmed that physical capacity is an integral indicator of the functional state of the organism and depends on the morphological and functional state of the most major life-support systems.

In this article, the authors used a technique developed by M.P. Moroz, which is implemented as a computer program in which the process of collecting, processing, and interpreting data is fully automated. The testing process takes no more than 5 minutes and can be repeated many times because it does not cause an addiction.

Diagnosis of the functional state of the central nervous system (CNS) of a person and the prognosis of its performance is based on the analysis of the parameters of variational chronoreflexometry – dynamic characteristics of the time of simple visual-motor reaction, which was conducted with the participation of students who did practical work on a computer.

After that, we can determine boundaries of levels of the functional state of the human central nervous system, which allowed determining the density of the distribution of the reaction time on the light signal approximated by the Rayleigh distribution.

Also, the authors obtained a formula that can determine the level of the functional state of the operator, readiness for work, the degree of fatigue and, in some cases, the presence of pathological functional disorders or organic disorders of the central nervous system.