

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

S.I. Lukash, M.M. Budnik

MODEL OF INFLUENCE OF PHYSICAL ACTIVITY ON CHANGE OF THE HUMAN FUNCTIONAL STATE

The simulation model of reaction of the systems of human organism is offered under the action of loading for realization of diagnostics of human on the method of Ruffier-Dickson. The state of the cardiovascular system is determined.

Key words: simulation model, diagnostic, method of Ruffier-Dickson.

Предлагается имитационная модель реакции систем организма человека под действием нагрузки для диагностики ФС по методу Руфье.

Ключевые слова: имитационная модель, диагностика, тест Руфье.

Пропонується імітаційна модель реакції систем організму людини під дією навантаження для реалізації діагностики ФС людини по методу Руф'є, в якому визначається стан серцево-судинної системи.

Ключові слова: імітаційна модель, діагностика, тест Руф'є.

© С.І. Лукаш, М.М. Будник, 2014

УДК 612.166

С.І. ЛУКАШ, М.М. БУДНИК

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ФІЗИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЗМІНУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ

Вступ. Уявлення про роботу організму людини як системи дає змогу лікарю більш точно і достовірно встановити діагноз захворювання. Побудова математичної моделі дозволяє встановити зв'язки різних органів та систем організму, вплив навантажень на гомеостаз, що характеризується наявністю ряду параметрів, які відображають нормальний стан організму: температура, частота серцевих скорочень (ЧСС), тиск крові, концентрація певних речовин у крові [1].

Функціональний стан (ФС) людини – це комплекс властивостей, визначальний рівень життєдіяльності організму, системна відповідь організму на фізичне навантаження, в якому відбивається міра інтеграції і адекватності функцій виконуваних робіт. При дослідженні ФС організму людини, яка займається фізичними вправами, найбільш важливі зміни у системах кровообігу і дихання тому, що саме вони мають основне значення для вирішення питання про допуск до зайняття спортом і про "дозу" фізичного навантаження, від них багато в чому залежить рівень фізичної працездатності.

З іншого боку, концепція моніторингу і оцінки стану здоров'я набуває все більшого значення в охороні здоров'я, що потребує як апаратного, так і програмного забезпечення праці лікаря. Згідно спільної постанови МОЗ та МОН України є обов'язковою оцінка стану здоров'я школярів. Це сприяє виробництву сучасних портативних інтелектуальних вимірювальних приладів і засобів безпрудного зв'язку, дає змогу опера-

тивно, більш повно і точно оцінювати стан здоров'я людини, виявляти зміни і прогнозувати їх, проводити моніторинг протягом значного часу.

У процесі вимірів фізіологічних параметрів ФС організму людини в статичних умовах та при тестових навантаженнях отримані дані не тільки дають більш точну оцінку стану здоров'я, але й дозволяють прогнозувати рівень функціональної спроможності.

Постановка задачі. Розробити імітаційну модель реакції систем організму людини під дією навантаження для реалізації діагностики ФС людини по методу Руф'є [2], в якому визначається вплив навантаження на зміну ЧСС.

Опис моделі. Пропонований підхід ґрунтується на апроксимації отриманих емпіричних нелінійних залежностей аналітичними функціями, які повинні, з одного боку, досить точно відображати нелінійність досліджуваного параметра на даному інтервалі, а з іншого боку, забезпечувати досить просте інтегрування отриманого диференціального рівняння. Модель передбачає наявність нелінійного ланцюга з одним накопичувачем енергії, що описується диференціальними рівняннями 1-го порядку. Зручність підходу полягає в отриманні виразу для досліджуваної величини в загальному вигляді, що дозволяє провести необхідний аналіз процесів при зміні параметрів еквівалентної схеми.

Найважливішими показниками ФС серцево-судинної системи (ССС) є пульс (ЧСС) та артеріальний тиск, їх зміни. Виконання фізичної вправи викликає активізацію роботи м'язів, тобто їх мобілізацію. В активних м'язів протікають біохімічні реакції, продукти яких виходять у кров і викликають активізацію діяльності ССС і дихальної систем (ДС). Отже, для опису процесу адаптації організму людини до фізичного навантаження необхідно включити в розгляд центральну нервову систему (ЦНС), ССС, ендокринну (ЕС), імунну (ІС), м'язи і ДС.

Порівняльні дослідження діяльності серця за допомогою різних методик у стані спокою і при різних навантаженнях показали, що найбільш точним індикатором ФС серця є швидкість зміни (перша похідна) ЧСС. Під час стану напруги, яка викликає посилення імпульсів в симпатичних нервах, що регулюють роботу серця, найважливіше значення має швидкість та прискорення серцевого викиду крові. Це і є первинна реакція серця на дію симпатичної НС. Навпаки, дія, яка гальмує діяльність серця, викликає зменшення швидкості серцевого викиду і зменшення прискорення крові в шлуночку.

Якщо розглядати спрощену ідеальну модель, яка включає ЦНС, ССС, ЕС, м'язи, то можна описати найбільш загальні реакції організму людини на фізичну активність, наприклад, ЧСС, у вигляді, показаному на рис. 1.

На схемі рис. 1, а нелінійний елемент – це електричний конденсатор з опорами, що моделюють певні системи організму. Діяльність усіх тканин і органів регулюються ЦНС (зворотний зв'язок), вони перебувають під впливом великої кількості чинників за природних умов.

Слід відзначити, що в роботі [3] зустрічається подібний якісний опис зміни ЧСС на стаціонарних тренажерах під дією навантаження. Але автори не надали математичної моделі опису цих змін.

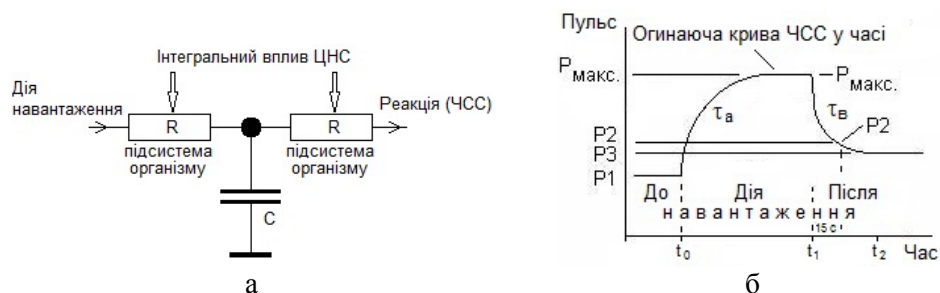


РИС. 1. Імітаційна модель впливу навантаження на ССС людини: а – загальна структура та б – залежність ЧСС від часу

Для характеристики ССС велике значення має оцінка роботи серця і артеріального тиску (рис. 1, б) під дією фізичного навантаження (параметри пульс P_1 , проміжок часу $t_1 - t_0$, пульс P_{\max}) та після нього (параметри $t_2 - t_1$, пульс P_2 , швидкість адаптації $v_a = 1/\tau_a$ під дією навантаження, швидкість відновлення $v_e = 1/\tau_e$ після навантаження та період відновлення T , що визначається проміжком часу $t_2 - t_1$, коли значення пульсу P_T не буде відрізнятися від P_1 більше, ніж на 5%. В моделі прийнято, що через певний час після навантаження пульс відновлюється до початкового значення.

$$P_T \leq 1,05 \cdot P_1 \quad (1)$$

Загальна зміна пульсу в проміжку часу $t_2 - t_0$ описується рівнянням:

$$\frac{dP}{dt} = F(P, t), \quad (2)$$

де P – пульс людини, $F(P, t)$ – енергетична спроможність людини.

Визначимо тривалість адаптації τ_a , та тривалість відновлення τ_e як проміжок часу, що потребує організм людини для стабілізації стану. Тоді з урахуванням пульсу в спокійному стані зміна ЧСС у проміжку $t_0 \div t_1$ має такий вид:

$$P_t = (P_{\max} - P_1) \cdot \exp\left(-\frac{t_1 - t_0}{\tau_a}\right) + P_1, \quad (3)$$

де P_1 – пульс людини в спокійному стані, P_{\max} – максимальне значення ЧСС на максимумі застосованого навантаження, інші параметри описані раніше.

Зміна пульсу в проміжку часу $t_2 \div t_3$ можна представити у вигляді рівняння:

$$P_t = (P_{\max} - P_3) \cdot (1 - \exp\left(-\frac{t_2 - t_1}{\tau_e}\right)) + P_3. \quad (4)$$

На рис. 2 показано залежність зміни ЧСС за час навантаження (рис. 2, а, формула (3)) та при відновленні організму (рис. 2, б, формула (4)) для різних τ . При розрахунках кривих прийнято значення $P_{\max} = 170$ уд/хв. Взагалі, пульс після зняття навантаження P_3 може не дорівнювати пульсу спокою P_1 , що і дозволяє визначити період відновлення за формулою (1).

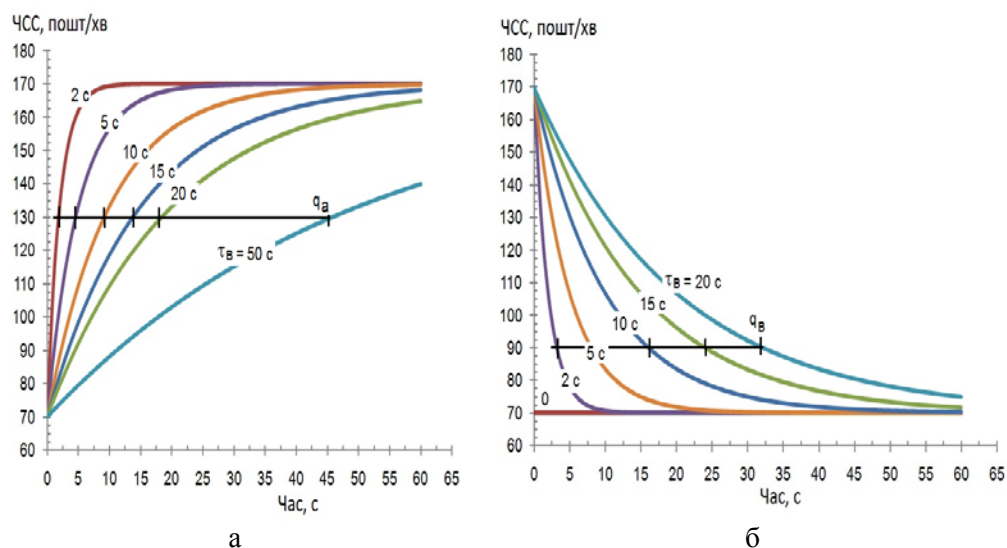


РИС. 2. Зміна ЧСС: а – під дією навантаження та б – після нього: 2, 5, 10, 20, 50 – тривалість в секундах процесів адаптації чи відновлення

Видно, що реакція організму людини на одне і те ж навантаження, його адаптація або відновлення, залежить від ступеня її тренуваності та якості здоров'я.

Для старших вікових груп, враховуючи нижчу межу допустимого зростання пульсу, а також у юних спортсменів застосовують тести PWC130 (physical work capacity, показано на рис. 2, а). Це практикують при виконанні субмаксимального тесту Валунда – Шестранда (PWC170), що рекомендований ВООЗ для визначення фізичної працездатності, при цьому потужність фізичного навантаження, що виражається в кгм/хв або Вт, при якій частота серцевих скорочень після стабілізації встановлюється на рівні 170 уд/хв, тобто PWC170, і є показником фізичної працездатності.

Поправочні коефіцієнти в моделі для людей різного віку, а також коефіцієнти, що враховують медично встановлений стан здоров'я, стать, вид діяльності та заняття, підвищують достовірність і точність параметрів моделі.

На рис. 3 показано відновлення стану при $P_{\max} = 96$ уд/хв. Таке значення пульсу є типовим для пацієнтів, що тестуються за методом Руф'є – Діксона. Там же показано періоди відновлення T , визначені відповідно формулі (1). Помітно, що організм з більшим значенням τ_0 має більший період відновлення T .

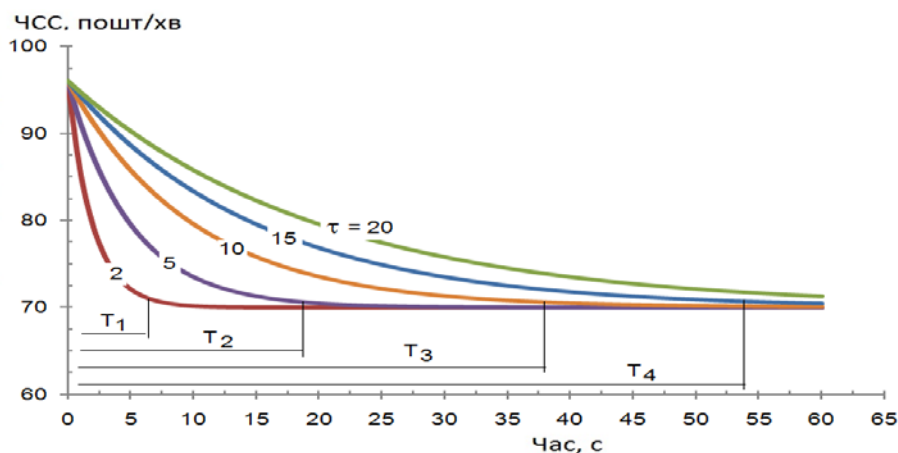


РИС. 3. Динаміка ЧСС в осіб з різною швидкістю відновлення

Для більш точного опису стану організму доцільно використати ще один параметр, який є індикативним і доповнює зазначені вище параметри – це параметр P_{ind} , що розраховується за відомою формулою:

$$P_{ind} = 220 - \sum_i k_i \cdot A, \quad (5)$$

де $\sum k_i$ – коефіцієнти поправки, A – вік у роках. Поправочні коефіцієнти враховують стать, вид діяльності, діагноз захворювання та інше.

Таке представлення дає змогу створити програмне забезпечення для отримання даних, їх автоматичної обробки, проведення аналізу, експертної оцінки і виявлення тенденцій за конкретними параметрами функціонального стану людини та зберегти інформацію в електронній базі даних для порівняння змін у більш тривалому часі.

Застосування моделі до аналізу ЧСС при навантаженні. В роботі [4] досліджувались баскетболісти I розряду в процесі гри за допомогою діагностичного комплексу для оцінки ФС спортсменів. Зміни показника напруги ССС – ЧСС вимірювалися монітором серцевого ритму "Polar Accurex Plusto". Отримані дані обробляли методами математичної статистики. За даними пульсограм визначали апроксимуючі функції. В результаті аналізу було виявлено наступне:

1. Пульс спортсменів під час 20-хвилинної гри у баскетбол мав середньогрупові значення $165,5 \pm 9,43$ уд/хв.

2. Діапазон функціонального навантаження відобразився у збільшенні пульсу від 150 до 180 уд/хв.

На рис. 4 показана апроксимація середньогрупових значень експериментальних даних (позначка 1) за перші 5 хв гри. Пунктирні лінії – апроксимація верхніх та нижніх (позначки 2, а та 2, б відповідно) границь зміни пульсу відповідно

моделі (3) та даних експерименту з параметрами $P_1 = 70$ уд/хв, $P_{\max} = 165,5 \pm \pm 9,43$ уд/хв, $\tau_a = 20$ с.

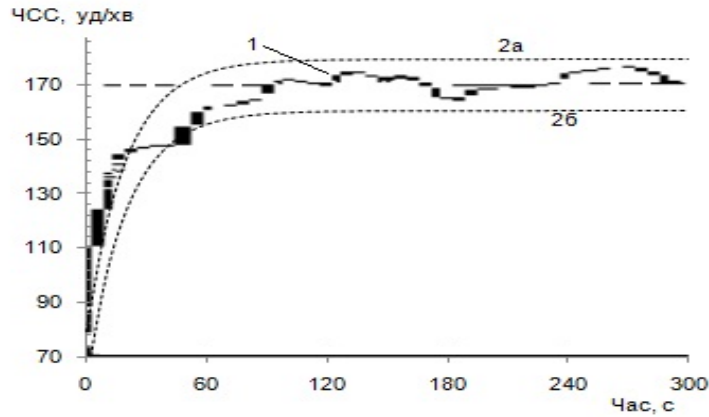


РИС. 4. Апроксимація експериментальних даних за перші 5 хв гри

3. Динаміка відновлення при пасивному відпочинку після гри у баскетбол в усіх спортсменів мала два, по уявленням авторів роботи [4], яскраво виражених періоди інтенсивності відновлення ССС (рис. 5). Перший період характеризувався різким зниженням пульсу в середньому до $P_{1c} = 120 \pm 5,2$ уд/хв (проміжок часу А – Б), другий період мав тенденцію до стабілізації пульсу на рівні $P_{2c} = 110 \pm 7,1$ уд/хв (проміжок часу Б – В).

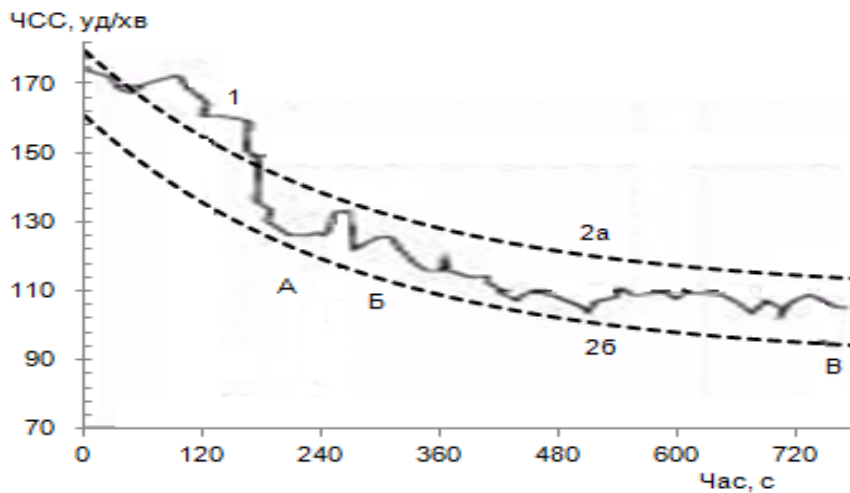


РИС. 5. Апроксимація ЧСС протягом 12 хв після закінчення гри

Зважаючи на методику вимірів та існуючу похибку, на малий час від кінця гри до моменту, позначеного літерою А (всього лише 120 с), ми більш схильні вважати такий феномен особливостями гри та існуючим у кожного із спортсменів своїм діапазоном працездатності, тим паче, що навіть через 12 хв частота пульсу ще далека від початкового і відновлення не відбулося. Це підкреслює перевагу не усереднення по групі, а визначення індивідуальних параметрів стану людини за допомогою сучасних можливостей, моделей та приладів.

На рис. 5 показана апроксимація середньогрупових значень експериментальних даних (позначка 1) за 12 хв після закінчення гри. Пунктирні лінії – апроксимація верхніх та нижніх (позначки 2, а та 2, б відповідно) границь зміни пульсу відповідно моделі (4) з параметрами $P_1 = 70$ уд/хв, $P_3 = 100$ уд/хв, $P_{\max} = 165,5$ уд/хв, $\tau_s = 270$ с. Помітно, що за 12 хв у спортсменів повного відновлення не відбулося. Про це свідчить значення пульсу $P_3 = 100$ уд/хв, що більше пульсу в спокійному стані на 20 %.

4. При аналізі експерименту, де було застосоване ступінчасто-зростаюче навантаження на велоергометрі (три послідовні зміни на 100 Вт через кожні 2 хв) помітно, що початкове навантаження у досліджуваній групі не викликало перевантаження ССС, тоді як після третього додаткового навантаження стан ССС не стабілізувався і пульс продовжував зростати, що може свідчити про перевтому організму. Для математичного опису також можна використати аналогічну апроксимацію з додатковими членами подібного виду, але з іншими значеннями параметрів.

Експериментальне порівняння моделі з параметрами тесту Руф'є. Оцінимо індекс Руф'є (ІР) по методиці, що застосовують при визначенні цього індексу, і порівняємо його результати з параметрами ФС, оціненими в рамках пропонованої моделі. Методика тесту полягає у наступному [5]:

- 5 хвилин відпочинку в положенні сидячи;
- виміряти пульс P_1' протягом 15 с;
- виконати 30 присідань за 45 с;
- виміряти пульс P_2' у положенні стоячи протягом перших 15 с;
- 1 хвилина відпочинку в положенні сидячи;
- виміряти пульс P_3' у перші 15 с після 1 хвилини відпочинку;
- провести розрахунок індексу за формулою:

$$IP = (4 \cdot (P_1' + P_2' + P_3') - 200) / 10. \quad (6)$$

Оцінка ФС ССС людини згідно відомого правила: 1) **відмінний стан** серця, високий рівень – якщо Індекс Руф'є менше 3; 2) **нормальний стан** серця, рівень вище середнього – 4–6; середній рівень – 7–9; **серцева недостатність** середнього ступеню, **задовільний стан** – 10–14; **низький рівень**, **сильна серцева недостатність** – 15 і більше.

Слід підкреслити, що виміри $P_1' = 0,25 \cdot P_0$, P_2' , P_3' виконуються перші 15 с. Для вже згадуваної роботи [4] маємо: $P_1' = 17,5$, $P_2' = 23,5$, $P_3' = 20$. Підрахунок за формулою (6) дає значення $IP = 4,4$, що відповідає нормальному стану серця, рівень вище середнього.

На основі даної моделі отримаємо набір параметрів, поданий у таблиці.

Додатково нами були протестовані три особи різного віку за тестом Руф'є. Дані цих вимірів занесені у таблицю, в якій також наведено параметри моделювання спортивної групи по роботі [4].

ТАБЛИЦЯ. Інформативні параметри для опису адаптації ФС людини до навантаження

№	Тип навантаження	Вік, роки	P_{ind} , уд/хв	P_o , уд/хв	P_{max} , уд/хв	τ_a , с	v_a , 1/с	τ_b , с	v_b , 1/с	T , хв	IP
1.	Спортивна гра, 20 хв	20	100	70	165,5	20	0,05	270	0,004	>12	4,4
2.	Пацієнт 1, ТР	35	195	70	193	63	0,016	20	0,05	–	10
3.	Пацієнт 2, ТР	50	170	68	156	320	0,003	10	0,1	–	6,3
4.	Пацієнт 3, ТР	70	150	67	178	320	0,003	10	0,1	–	9

Примітка: ТР – тест Руф'є, IP – індекс Руф'є.

Обговорення. Приведена в таблиці оцінка трьох пацієнтів за тестом в цілому відповідає існуючим у них медичним діагнозам. Згідно тесту Руф'є певному стану ССС відповідає досить широкий інтервал значень індексу. Це відображає фізіологічний розкид параметрів ФС у людей, але недоліком такого методу оцінки ФС є застосування лише одного індексу. Перевагою пропонованої моделі є застосування 6-ти параметрів, перелічених в таблиці. Ці параметри мають різний фізіологічний смисл, а тому забезпечують більш детальну діагностику стану ССС та реакцію організму людини на навантаження. В пропонованій моделі важливими інформативними параметрами є швидкості адаптації v_a та відновлення v_b .

Для правильного застосування моделі потрібно відслідковувати стан конкретної людини і фіксувати зміни ССС періодично у часі. Проте за допомогою існуючих приладів у процесі моніторингу досить складно здійснити постійний контроль ЧСС. Тому пропонований підхід потребує застосування приладу із дещо іншою методикою обчислення пульсу, а також застосування сучасної мікроелектронної бази з безпроводним зв'язком та спеціалізованим програмним забезпеченням.

Крім того, для різних галузей діяльності людини та медицини важливим є знання про параметри, що відповідають стану ССС при навантаженні. Так для сімейної медицини, на нашу думку, потрібен моніторинг і порівняння динаміки параметрів ССС у конкретної людини протягом тривалого часу. При цьому, для спортивної медицини та медицини праці більш актуальним є контроль процесу

адаптації та відновлення при навантаженні безпосередньо при тренуванні чи функціональних обов'язків [6, 7].

Середньоквадратичне відхилення даних та значень апроксимації не перевищував 5 %, що свідчить про високу достовірність моделювання. Встановлення точності обчислення коефіцієнтів нелінійного рівняння регресії та визначення довірчих інтервалів для параметрів буде виконано після виготовлення приладу, який би дозволяв у реальному часі реєструвати ЧСС, та отримання за його допомогою масиву експериментальних даних для групи пацієнтів.

Висновки. Наведено просту імітаційну модель зміни ЧСС в організмі людини під дією навантаження на основі ряду диференціальних рівнянь з параметрами, що характеризують ФС ССС людини. Проведені модельні розрахунки та визначені основні інформативні параметри моделі.

На основі обробки емпіричних даних динаміки ЧСС у спортсменів виявлена кореляція ФС ССС спортсменів з параметрами моделі. Проведене моделювання підтверджує, що для формування оптимального тренувального процесу та виявлення толерантності людини до фізичного навантаження більш зручним і достатньо інформативним є вимірювання серцевого ритму та артеріального тиску. Ці параметри дають змогу безпосередньо визначати ФС серця.

Таким чином, шляхом моделювання стану ССС та обробки експериментальних даних змін ЧСС підтверджена адекватність моделі щодо опису реакції організму людини на процес фізичного навантаження та відновлення після нього.

1. *Вікіпедія*. http://uk.wikipedia.org/wiki/Імітаційне_моделювання.
2. *Основные функциональные пробы с физическими нагрузками. Часть 1*. <http://lifein hockey.ru/metodiki/metodicheskie-materialy/sportivnaya-medsina/608-osnovnye-funktsionalnye-proby-s-fizicheskimi-nagruzkami-chast-1>
3. *Ландырь А.П., Ачкасов Е.Е.* Мониторинг сердечной деятельности в управлении тренировочным процессом в физической культуре и спорте. – М.: Триада – Х, 2011. – 176 с.
4. *Планида Е.В., Бондарь А.Н.* Журнал «Вестник спортивной науки», вып. 2 (7) 2005, 30 июня 2005. – С. 50 – 54, <http://bmsi.ru/doc/d42051a8-bf68-4913-94b6-b77963cbd55c>.
5. *Краснов Е.А.* Основы организации самостоятельных занятий физическими упражнениями и самоконтроль. Методические рекомендации. <http://dvo.sut.ru/libr/fizra/i162kras/index.htm>.
6. *Будник М., Чайковський І.* Спосіб оцінки фізіологічної ціни психоемоційного чи фізичного навантаження. Патент UA 54185U, заявл. 21.05.2010, опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20, 2010 р.
7. *Будник М.М., Чайковський І.А.* Спосіб визначення механізму адаптації серцево-судинної системи до фізичного чи психоемоційного навантаження. Пат. UA 98187, опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8, 2012 р.

Одержано 18.05.2014