

УДК 799.322.2

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ БІОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ «ВЕРШНИК-КІНЬ»

**Половніков Ігор, Виноградський Богдан**

Український науково-дослідний інститут шкіряної промисловості (м. Київ)

Львівський державний університет фізичної культури (м. Львів)

**Анотація.** Здатність ефективно виконувати механічну роботу у кінному спорті під час долаття перешкод є одним із найважливіших критеріїв спортивної майстерності. Встановлено закономірності протікання енергетичних процесів у ході біомеханічних взаємодій вершника з конем під час долаття перешкод. Спортивна техніка проходження перешкод у конкурі визначається ефективністю переходу з одного виду механічної енергії в інший. Виявлено протифазність переходу потенціальної енергії у кінетичну. Виконано розрахунок коефіцієнтів рекуперації енергій.

**Ключові слова:** моделювання, потенціальна і кінетична енергія, біомеханічна система, кінний спорт.

**Актуальність.** Рухові дії спортсменів слід вважати результатом взаємодії енергетично й інформаційно відкритої біомеханічної системи з довкіллям. Їх можна охарактеризувати енергетичними (біокінематичними, біодинамічними) й інформаційними параметрами [3, 6].

Сучасний науковий підхід до вивчення біомеханічних систем у спорті неможливий без використання моделювання як ефективного інструменту пізнання. Моделювання рухів біосистем, зокрема тіла людини, має велике практичне значення для аналізу і вибору раціональних дій. Важливо використати моделювання як засіб вивчення закономірностей витрат енергії і здійснення механічної роботи під час змін положень окремих ланок і ланцюгів, біомеханічної системи тіла людини загалом [4, 5, 10].

**Аналіз останніх наукових досліджень.** На сьогодні накопичено певний науковий матеріал, що визначає закономірності протікання енергетичних процесів в складних біомеханічних системах. Дослідження у зазначеному науковому напрямку проводяться із застосуванням експериментальних і розрахункових методів теоретичної механіки та біомеханіки. До основних енергетичних характеристик біомеханічних систем науковці зараховують: різні види енергії, механічну роботу, потужність, динамічні параметри локомоцій та інших рухів тіла людини. Для визначення енергетичних характеристик рухомих кісткових ланок тіла людини припускають, що їхні моделі відповідають властивостям абсолютно твердих тіл і при цьому нехтують втратами на внутрішнє тертя в них [1, 3].

Біоенергетика рухових дій тіла людини і його ланок характеризує метаболічні процеси організму, підведення і витрати енергії. Джерелами енергії є хімічна енергія, що генерується внаслідок хімічних реакцій, у результаті чого включаються в роботу скорочувальні компоненти м'язів, а їх механічна енергія переходить у потенційну енергію деформації компонентів скелета. Інше джерело енергії — це енергія довкілля, яка безпосередньо взаємодіє з людиною. Під час руху людина витрачає кінетичну енергію на пересування свого тіла, окремих його ланок і зовнішніх тіл. Вона витрачається на виконання рухових завдань і на подолання зовнішнього опору. Значна частина енергії в процесі руху переходить у теплову, яку прийнято вважати неефективними втратами [4—6].

Переважає більшість авторів підкреслюють, що, з огляду на те, що тіло людини з точки зору механіки належить до неконсервативних механічних систем, для яких характерне часткове розсіювання (дисипація) енергії, визначення витрат енергії у подібних системах — важко здійснюване завдання. Тому для спрощення такі системи вважають консервативними. Неврахована при цьому енергія розсіювання оцінюється різними способами [1, 4].

Здатність ефективно виконувати механічну роботу у кінному спорті під час долаття перешкод є одним із найважливіших критеріїв спортивної майстерності [2, 11]. Розподіл і перетворення енергетичних компонентів складної біомеханічної системи «вершник — кінь» відіграють одну із ключових ролей у формуванні та вдосконаленні технічної майстерності [7, 11, 13]. Важливим у техніці кінного спорту є також взаєморозташування біопари «стопа — гомілка», що керує перетворенням механічної енергії системи тіл і ланок [8, 9]. Особливо важ-

ливим це є під час подолання систем перешкод і зв'язок, де найбільш важливим чинником є якраз власне взаємодія вершника з конем [9, 12].

**Мета** роботи полягає у встановленні закономірностей протікання енергетичних процесів під час біомеханічних взаємодій вершника з конем в конкурі.

#### Результати дослідження.

Відповідно до одного з визначень роботи, її величину можна знайти як скалярний добуток вектора сили та переміщення точки її прикладання:  $W = F_{\Delta} S_{\Delta}$ .

Якщо сили, що діють на тіло, невідомі, то величину роботи можна визначити за зміною механічної енергії тіла:  $W = \Delta E$ . Також для розрахунку механічної роботи та її компонентів у біомеханіці застосовуються обидва способи.

Енергія — це здатність виконувати роботу. При цьому її розглядають як міру «ресурсу» для виконання роботи. При аналізі рухів людини особливе значення мають такі види енергії: потенціальна ( $E_p$ ), зумовлена силою тяжіння; кінетична енергія поступального руху ( $E^{k1}$ ); кінетична енергія обертання ( $E^{k2}$ ), потенціальна енергія, зумовлена деформацією ( $U$ ), та енергія, що є результатом енергообмінних процесів.

У біологічних системах не вся перетворювана енергія переходить у роботу. Тільки 25% звільненої внаслідок обмінних процесів енергії використовується для виконання роботи, решта 75% перетворюється на тепло або задіюється під час відновлювальних процесів. Відношення виконаної роботи до зміни кількості енергії характеризує ефективність руху. Ефективність руху має щонайменше два значення.

У спорті вищих досягнень — ефективність руху полягає в тому, щоб повністю використати весь запас механічної енергії для отримання кращих спортивних результатів. Чим тренованіший спортсмен, тим більший запас повної механічної енергії. Ефективність руху залежить від економічності.

Ефективність руху набуває свого іншого змісту в оздоровчому тренуванні, відновленні, фізичній реабілітації. Ефективно рухається та людина, яка найбільше зберігає і повторно використовує повну механічну енергію у визначений момент часу (процес рекуперації — збереження та повторне використання повної механічної енергії під час руху людини).

Сьогодні відомо 3 шляхи збереження або рекуперації механічної енергії під час рухів людини:

- перехід кінетичної енергії у потенціальну енергію гравітації і навпаки;
- перехід механічної енергії від однієї біоланки до іншої;
- перехід кінетичної енергії руху в потенціальну енергію пружної деформації м'язів та сухожилків і навпаки.

У біомеханіці проблематика пов'язана з аналізом механічної роботи, який включає два основних завдання:

- визначення механічної роботи, виконуваної під час локомоцій та переміщень ланок тіла;
- визначення величин рекуперованої механічної енергії як критерію ефективності виконуваних рухів.

Розрахунок роботи під час переміщень є достатньо складною задачею, яка сьогодні розв'язана не повністю. Основна складність пов'язана з тим, що тіло людини є неконсервативною системою, у якій одна частина механічної енергії розсіюється, а інша зберігається і використовується під час наступних дій. З'ясувати, якою мірою рух виконується за рахунок внутрішньої та зовнішньої енергії, можливо тільки експериментальним шляхом із залученням ідей і методів теоретичної механіки та сучасних комп'ютерних технологій.

**Методика.** Для визначення механічної роботи й енергії під час локомоцій та інших переміщень у кінному спорті пропонується такий алгоритм:

- зробити площинне відеознімання фізичної вправи;
- побудувати біокінематичну схему положень біоланок досліджуваної системи під час виконання певної вправи (рис. 1, 2) відносно зовнішньої системи координат, визначити її масштаб та заповнити таблицю;
- виміряти на біокінематичній схемі відстань від кожного центра маси (ЦМ) біоланки до лінії опори, перевести у реальні розміри й зафіксувати;
- виміряти відстань між центрами мас однойменних біоланок на інтервалі між 1-им та 2-им, 2-им та 3-им, 3-им та 4-им;
- визначити тривалість між моментами сусідніх кадрів за формулою  $t = n/f$ , де  $n$  — кількість часових інтервалів між кадрами;  $f$  — частота зйомки;
- обчислити лінійну швидкість центрів мас біоланок за формулою  $V_2 = S_{1-2}/t_{1-2}$ , де  $V_2$  — миттєва швидкість центру мас біоланки у момент часу  $t_2$ ;  $S_{1-2}$  — шлях, пройдений ЦМ біоланки за інтервал часу від 1-го до 2-го кадру;  $t_{1-2}$  — тривалість інтервалу між 1-им та 2-им кадрами;
- визначити моменти інерції біоланок тіла відносно осі обертання, що проходить через ЦМ цих біоланок, за формулою  $I_c = \frac{m_i l_i}{12}$ , де  $I_c$  — момент інерції біоланки відносно осі, що проходить через її ЦМ;  $m_i$  — маса біоланки;  $l_i$  — довжина біоланки;
- виміряти кутові переміщення біоланок. Величини кутів, виміряні у градусах, пере-

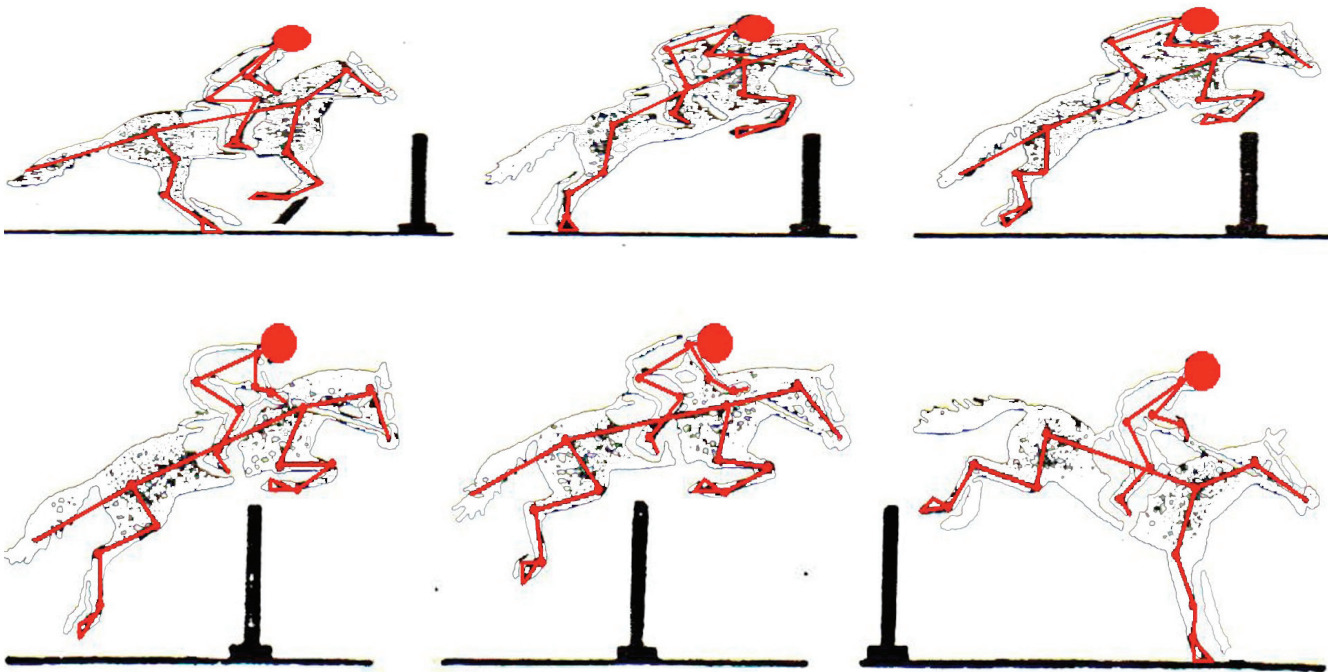


Рис. 1. Біокінематична схема біомеханічної системи «вершник — кінь» під час подолання перешкоди

вести у радіанну міру, враховуючи, що  $I^\circ = 0,0175$  радіан;

- обчислити кутову швидкість біоланок за формулою  $\omega_i = \varphi/t$ , де  $\omega_i$  — кутова швидкість окремої біоланки у момент  $t_2$ ;  $\varphi$  — кутове переміщення біоланки;  $t$  — час повороту біоланки;
- обчислити потенціальну енергію окремих біоланок у момент  $t_2$  за формулою  $E_i^n = m_i g h_2$ , де  $m_i$  — маса біоланки;  $g$  — прискорення вільного падіння — 9,81  $m/s^2$ ;  $h_2$  — висота розташування ЦМ біоланки відносно лінії опори у момент  $t_2$ ;
- розрахувати кінетичну енергію біоланки при її поступальному русі у момент  $t_2$ :  $E_i^{k1} = \frac{m_i v_2^2}{2}$ , де  $m$  — маса біоланки;  $v_2$  — лінійна швидкість біоланки у момент  $t_2$ ;
- розрахувати кінетичну енергію біоланки при її обертальному русі:  $E_i^{k2} = \frac{I w_2^2}{2}$ , де  $I$  — момент інерції біоланки;  $w$  — кутова швидкість біоланки у момент  $t_2$ ;
- розрахувати загальну кінетичну енергію біоланки у момент  $t_2$ :  $E_i = E_i^n + E_i^k$ ;
- виконати розрахунки між сусідніми позами впродовж усієї біокінематичної схеми;
- для того, щоби розрахувати коефіцієнт рекуперації, необхідно скласти розрахунко-

ву таблицю, до якої внести значення  $E_i^n$ ,  $E_i^k$ ,  $E_i$  для усіх біоланок у кожний досліджуваний момент часу, враховуючи протифазну зміну кінетичної і потенціальної енергії.

- побудувати графіки зміни кінетичної, потенціальної та повної механічної енергії при русі сегмента.
- зробити практичні висновки.

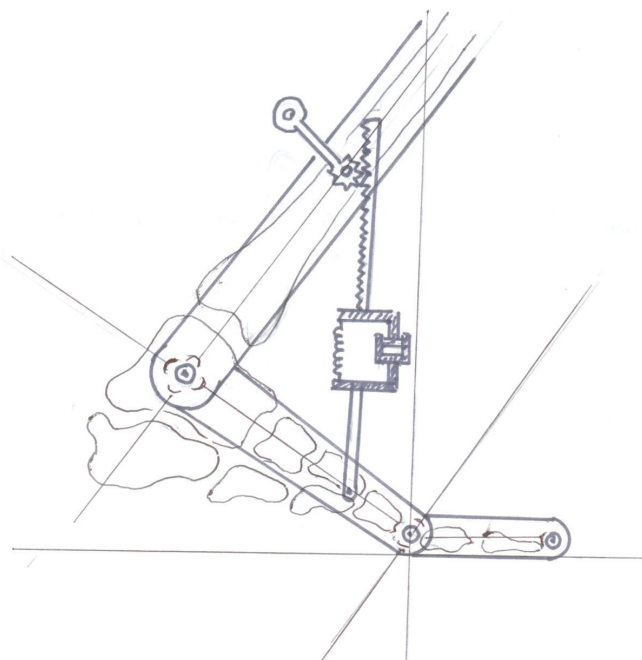
Ці види енергії можуть змінюватися як у результаті роботи сил негравітаційної природи, які діють на біоланку, так і в результаті переходу кінетичної енергії в потенціальну і навпаки під дією сили тяжіння.

Необхідною умовою переходу кінетичної «енергії швидкості» в потенціальну «енергію положення» і навпаки є їх протифазна зміна у часі.

Унаслідок протифазної зміни кінетичної і потенціальної енергій біоланки тіла їх сума, яка дорівнює повній механічній енергії, змінюється в циклі набагато менше, ніж кожна з її компонентів (рис.3).

Вважають, якщо існує можливість переходу енергії, то такий перехід відбувається для виконання визначеної дії. Можливість переходу розуміємо як взаємопротилежну зміну величин кінетичної і потенціальної енергії, коли збільшенню кількості одного виду енергії відповідає зменшення іншого ( $\Delta E_{i1}$  і  $\Delta E_{i2}$  мають протилежні знаки).

Найбільшу величину механічної роботи (якщо припустити цілковиту відсутність переходу



**Рис. 2.** Біомеханічна модель нижньої кінцівки гомілковостопного суглоба стопи вершника

$$\kappa = \frac{\omega_i^{KM} - \Delta E_i}{\omega_i^{KM}}$$

Коефіцієнт рекуперації може змінюватися від 0 до 1, набуваючи значення 0 за відсутності протифазної зміни, а 1 — при збереженні повної енергії біоланки постійною.

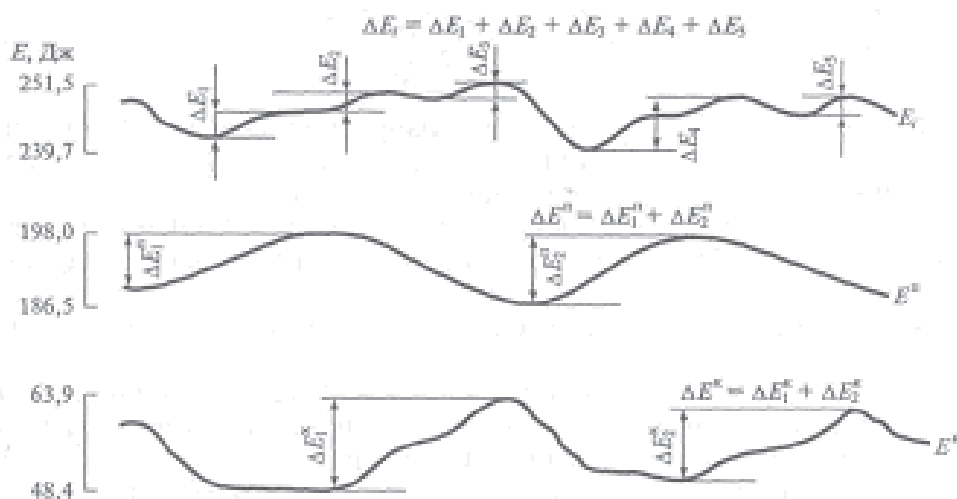
Отже фізичний зміст збереження повної механічної енергії полягає в існуванні переходу одного виду енергії в інший. Зміст поняття «перехід» полягає в протифазній зміні кінетичної енергії у потенціальну. Якщо одна енергія збільшується, а інші зменшуються, тоді енергія зберігається. На рис. 3 і 4 у визначених моментах під час подолання перешкод відбувається протифазна зміна кінетичної і потенціальної енергії. У певних моментах протифазної зміни немає. Під час протифазної зміни відстежується повторне використання енергії, тобто відбувається рекуперація. З цих досліджень випливає, що спортсмен виконав вправу не ефективно. У спорті вищих досягнень спортсмен повинен повністю використати весь запас механічної енергії для досягнення високих результатів.

кінетичної енергії в потенціальну і навпаки через силу тяжіння) можна отримати, додавши прирости потенціальної і кінетичної енергії:  $W_i^{KM} = \Delta E_i^n + \Delta E_i^k$ .

Ця величина називається квазімеханічною роботою. Якщо такий процес відбувається, то величина заощадженої енергії для дії циклічного характеру може бути оцінена за допомогою коефіцієнта рекуперації:

Коефіцієнт рекуперації може змінюватися від 0 до 1. Якщо коефіцієнт дорівнює 0, це означає, що теоретичні розрахунки приблизно дорівнюють «реальній» роботі (тобто енергія в системі не зберігається). Якщо коефіцієнт наближається до 1, це означає, що відбувається протифазна зміна, є збереження та повторне використання енергії, тобто присутня рекуперація.

У цьому випадку коефіцієнти рекуперації дорівнюють 0,32-0,47, що свідчить про рівень



**Рис. 3.** Протифазна зміна кінетичної і потенціальної енергій гомілки вершника

Таблиця 1

Визначення потенціальної, кінетичної та повної механічної енергії правої гомілки на прикладі алгоритму розрахунків (біоланка гомілка — стопа)

№ кадру	Маса	Довжина	Висота від центру маси до опори, h, м	Шлях S, м	Час t, с	Лінійна швидкість біоланки, V, мс <sup>-1</sup>	Момент інерції I, кгм <sup>2</sup>	Кутові переміщення, рад.	Кут. W, рад.с <sup>-1</sup>	E <sub>п</sub> <sup>n</sup> = mgh, Дж.	E <sub>п</sub> <sup>к</sup> = mV <sup>2</sup> /2	E <sub>п</sub> <sup>к</sup> = IW <sup>2</sup> /2	E <sub>п</sub> <sup>к</sup> = E <sub>п</sub> <sup>к1</sup> + E <sub>п</sub> <sup>к</sup>	E <sub>п</sub> <sup>н</sup> = E <sub>п</sub> <sup>н</sup> + E <sub>п</sub> <sup>н</sup>
1	6,2	0,41	0,81	-	0,04	-	0,08	-	-	49,2	-	-	-	49,2
2			0,71	0,44		11		1,01	25,2	43,1	375,1	25,5	400,6	443,7
3			0,89	0,48		12		0,31	7,8	54	446,1	2,4	448,5	502,5
4			0,77	0,52		13		0,29	7,25	46,7	523,9	2,1	526	572,7
5			0,73	0,43		10,75		0,43	10,7	44,3	358,2	4,6	362,8	407,1
6			0,84	0,2		5		0,43	10,7	51	77,5	4,6	82,1	133,1
7			1,04	0,42		10,5		0,31	7,8	63,1	341,7	2,4	344,1	407,2
8			1,18	0,4		10		0,08	2	73,6	310	0,16	310,2	381,7
9			1,36	0,4		10		0,05	1,25	82,6	310	0,06	310	392,6
10			1,15	0,55		13,75		0,22	5,68	91,1	586	1,3	587,3	678,4

Таблиця 2

Зміна потенціальної, кінетичної та повної механічної енергії правої гомілки у визначений момент часу

№ кадру	Потенціальна енергія E <sub>п</sub> <sup>н</sup>	Кінетична енергія E <sub>п</sub> <sup>к</sup>	Повна механічна енергія E <sub>п</sub>	Зміна потенціальної енергії ΔE <sub>п</sub> <sup>н</sup>	Зміна кінетичної енергії ΔE <sub>п</sub> <sup>к</sup>	Зміна повної механічної енергії ΔE <sub>п</sub>	Квазі-механічна робота W <sub>км</sub>
1	49,2	-	49,2	49,2	-	49,2	49,2
2	43,1	400,6	443,7	-6,1	400,6	394,5	406,1
3	54	448,5	502,5	10,9	47,9	58,8	58,8
4	46,7	526	572,7	-7,3	77,5	70,2	84,8
5	44,3	362,8	407,1	-2,4	-163,2	-165,5	165,5
6	51	82,1	133,1	6,7	-280,7	-274	287,4
7	63,1	344,1	407,2	12,1	262	274,1	274,1
8	71,6	310,2	381,7	8,5	-33,94	-25,5	42,44
9	82,6	310	392,6	11	-0,1	10,96	11,1
10	91,14	587,3	678,4	8,54	277,24	285,74	285,74

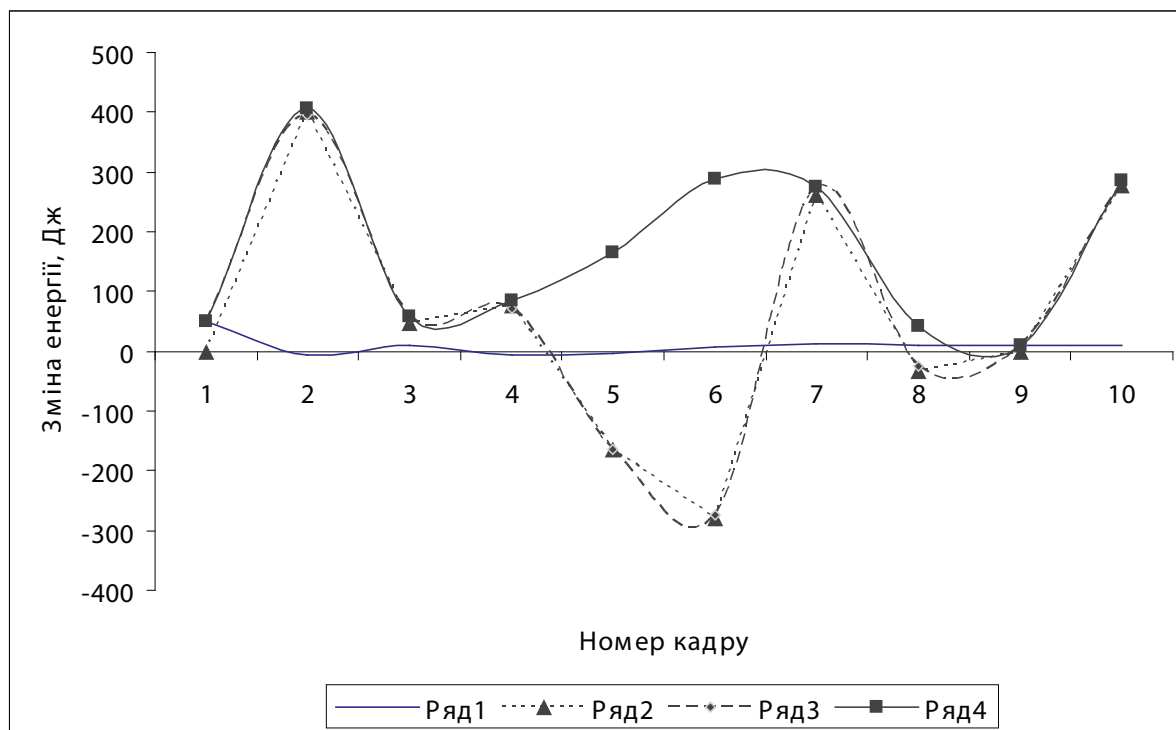
економічності. У той же час ефективність руху визначається повнотою використання запасу механічної енергії для досягнення високих спортивних результатів у кінному спорті.

Таким чином, коефіцієнти рекуперації досліджуваних біоланок становлять у середньому: 0,34; 0,39; 0,32; 0,47. Енергію було використано економічно (майже половина заощадила), тому високої ефективності у виконанні вправи не було досягнуто, що призвело до низького результату. Спостерігався перехід механічної енергії від біоланки більшої маси (гомілки) до біоланки

меншої маси (стопа), що свідчить про поліпшення техніки виконання рухових дій вершника.

## Висновки

Встановлено закономірності протікання енергетичних процесів під час біомеханічних взаємодій вершника з конем в конкурі. Спортивна техніка проходження перешкод у конкурі визначається ефективністю переходу з одного виду механічної енергії в інший. Виявлено протифазність переходу



**Рис. 4.** Динаміка величин енергій правої гомілки, де ряд 1 — зміна потенційної енергії, ряд 2 — кінетичної енергії, ряд 3 — повної механічної енергії, ряд 4 — квазімеханічної роботи

потенціальної енергії у кінетичну. Виконано розрахунок коефіцієнтів рекуперації енергій.

### Список літератури

1. *Архипов А.А.* Эргономические факторы оптимизации опорных взаимодействий в технике гандбола. (депонированная статья) / Архипов А.А., Лапутин А.Н., Половников И.И. // Труды всесоюзной школы-семинара «Перспективы развития эргономической биомеханики». — М. : НС АН СССР, ВНИИТИ, 1988. — С. 56-64.
2. *Диллон Д. М.* Конный спорт. Техника и стиль прыжка / Джейн. Маршалл Диллон. — М. : Аквариум ЛТД, 2002. — 160 с.
3. *Донской Д.Д.* Биомеханика : учебн. для ин-тов физич. культ. / Донской Д.Д., Зацюрский В.М. — М. : Физкультура и спорт, 1979. — 264 с.
4. *Лапутин А. Н.* Гравитационная тренировка / А. Н. Лапутин. — К. : Знання, 1999. — 316 с.
5. *Лапутин А. Н.* Современные проблемы совершенствования технического мастерства спортсменов в олимпийском и профессиональном спорте / А. Н. Лапутин, Н. А. Носко // Физическое воспитание студентов творческих специальностей : сб. науч. тр. / под ред. С. С. Ермакова. — Харьков, 2002. — № 4. — С. 3-17.
6. *Биомеханика спорта*: навч. посібн. / Лапутин А.Н., Гамалій В.В., Архипов О.А. та ін. — К. : Олімпійська література, 2005. — 320 с.
7. *Нероденко В. В.* Конкурная подготовка всадника и лошади в конном спорте / В. В. Нероденко // К. — 2009. — 208 с.
8. *Шелухова І. В.* Кутові параметри вершника при подоланні перешкод у кінному спорті / І. В. Шелухова // Молода спортивна наука України : зб. наук. праць з галузі фізичної культури та спорту. — Л., 2011. — Вип 15, т. 1. — С. 373-379.
9. *Шелухова І. В.* Біомеханічна взаємодія коня та вершника під час проходження дистанції паркуру в конкурі. / І. В. Шелухова, Б. А. Виноградський // Вісник Чернігівського національного університету ім. Т. Г. Шевченка. Серія: педагогічні науки. Фізичне виховання та спорт. — Ч., 2010. — Вип. 81. — С. 698-693.
10. *Энока Р.М.* Основы кинезиологии. — К. : Олимпийская литература, 1998. — С.13-36.
11. *Mailer C.* Jumping Problems Solved / Carol Mailer. — Vermont : North Pomfret, 2005. — P.187.

12. *Steinkraus W. Reflections on Riding and Jumping: Winning Techniques for Serious Riders / W. Steinkraus. — Vermont : North Pomfret, 1997. — 245 p.*
13. *Wanless M. Ride With Your Mind Clinic. Rider Biomechanics-Basics to Brilliance / M. Wanless. — Ontario : Kenilworth Publishing, 2009. — P. 221.*

*Надійшла до редакції 03.02.2012 р.*

**Половников Игорь, Виноградский Богдан.** Моделирование энергетических процессов биомеханической системы «всадник-лошадь».

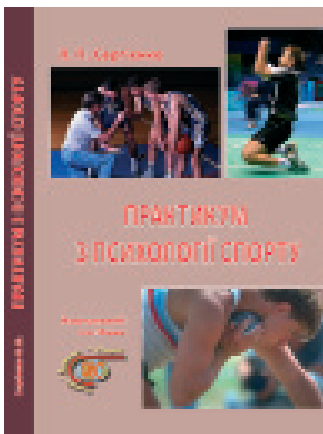
Способность эффективно выполнять механическую работу в конном спорте во время преодоления препятствий является одним из важнейших критериев спортивного мастерства. Установлены закономерности протекания энергетических процессов в ходе биомеханического взаимодействия всадника с лошадью во время преодоления препятствий. Спортивная техника прохождения препятствий в конкуре определяется эффективностью перехода одного вида механической энергии в другой. Выявлена противофазность перехода потенциальной энергии в кинетическую. Выполнен расчет коэффициентов рекуперации энергии.

**Ключевые слова:** моделирование, потенциальная и кинетическая энергия, биомеханическая система, конный спорт.

**Polovnikov Igor, Vynogradskiy Bogdan.** Modeling energy processes in biomechanical systems «rider — horse».

Ability to perform mechanical work in the equestrian at overcoming barriers is one of the most important criteria of sport skills. Patterns of emanate energy in the course of the biomechanical interaction between the rider of a horse while overcoming barriers was indication. Sports technique of passing interference competition was determined by the efficiency of conversion from one type of mechanical energy into another. Different phases of the transition potential in the kinetic energy were found. The energy recovery coefficients were calculated.

**Key words:** modeling, potential and kinetic energy, biomechanical system, equestrian.



**Сергієнко Л.П.**

- S32 **Практикум з психології спорту: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів фізичного виховання і спорту. — Харків: «ОВС», 2008. — 256 с. (МОН України, лист № 1-4/18-Г-1054 від 14 травня 2008 р.) ISBN 966-7858-51-0.**

У навчальному посібнику викладено зміст практикуму з психології спорту та програми з даної навчальної дисципліни. У практикумі наведено короткий зміст лекцій. Фактично це конспекти лекцій, які особливо потрібні студентам заочного відділення та тим, хто навчається дистанційно. На практичних заняттях студентам пропонується виконання психологічних та дидактичних тестів. Навчальний посібник доцільно використовувати під час підготовки до семінарських занять, заліків та іспитів.

Навчальний посібник рекомендовано студентам вищих навчальних закладів освітнього напрямку «Фізичне виховання і спорт» та «Психологія». Може бути корисним для викладачів, фахівців у галузі психології, тренерів, спортсменів високої кваліфікації, широкого кола читачів.



**Худолій О.М.**

- X98 **Загальні основи теорії і методики фізичного виховання: Навч. посібник. — 2-е вид., випр. — Харків: «ОВС», 2008. — 408 с.: іл. ISBN 966-7858-53-7.**

У навчальному посібнику розглянуті загальні питання теорії фізичного виховання, а також теорія і методика розвитку рухових здібностей та навчання фізичним вправам.

Посібник рекомендовано викладачам і студентам факультетів фізичного виховання вищих педагогічних навчальних закладів III—IV рівня акредитації та вчителям фізичної культури середніх загальноосвітніх шкіл.