

## БІОМЕХАНІЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗООМОРФНОГО МЕХАНІЗМУ КІНЦІВОК ВЕЛИКОЇ РОГАТОЇ ХУДОБИ

Е.Б. Алієв, к.т.н.

*(відділ біоекотехнічних систем у тваринництві Національного наукового центру «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»)*

*Метою досліджень є побудувати біомеханічну модель функціонування зооморфного механізму кінцівок великої рогатої худоби та їх взаємодії з різними типами підлоги. Запропоновано біомеханічну модель рухів кінцівок великої рогатої худоби та складено систему рівнянь, що її описують. Отримано часові залежності прискорень суглобів кінцівок. Проведено моделювання взаємодії кінцівок з різними типами підлог.*

**Постановка проблеми.** Особливості технології утримання великої рогатої худоби на фермах і комплексах зумовили виникнення специфічних негативних умов, що призвело до масового захворювання кінцівок, зокрема копитець. Одними з головних причин захворювань копитець є різноманітні механічні пошкодження з наступним проникненням в живі тканини патогенних мікроорганізмів. Сприяє даній патології концентрація тварин на обмеженій площі, погана якість підлог, гіподинамія, порушення санітарно-гігієнічних норм, незбалансоване годування, а також важливу роль відіграє й породний фактор. Важливо підкреслити, що хвороби копитець у тварин займають за поширеністю і збитком, що завдаються, третє місце після маститів і гінекологічних захворювань [1].

Комфорт корови залежить від характеристики покриття, по якому вона пересувається. Тварини на м'якому покритті відчують себе більш природно і впевнено. Спостереження [2] показали, що в залежності від виду підлогового покриття значно змінюється поведінка корів у стані охоти.

Враховуючи вищезазначене, можна стверджувати, що дослідження процесу руху великої рогатої худоби по різних типах покриттів є актуальною задачею механізації молочного скотарства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тварина в процесі руху по підлозі утворює динамічну біомеханічну систему (зооморфний механізм) з властивими їй закономірностями [3]. Рухова активність тварин разом з їх фізіологічним станом є основою технології утримання тварин. Удосконалення технології утримання великої рогатої худоби на сучасному етапі вимагає системного дослідження і використання фундаментальних біомеханічних закономірностей механічної (рухової) взаємодії тварин із засобами виробництва – технікою і спорудами, для підвищення ефективності виробництва і продуктивності тварин. Лише знання закономірностей руху і механічної

взаємодії тварин в зонах утримання і за фазами розвитку дозволяють підвищувати продуктивність тварин і працю людини.

Враховуючи фундаментальне значення питань біомеханіки рухового апарату тварини як першооснови технологій тваринництва, розробка технологічної зооінженерної біомеханіки скотарства починається саме з цього завдання. У дослідженні [4] піднімаються не всі питання зооінженерної біомеханіки рухового апарату худоби. Обираються лише ті з них, які є важливими в технологічній біомеханіці утримання худоби в молочному скотарстві. Домінуючим фактором середовища є опорна поверхня зон утримання худоби.

**Мета досліджень.** Побудувати біомеханічну модель функціонування зооморфного механізму кінцівок великої рогатої худоби та їх взаємодії з різними типами підлоги.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для створення біомеханічної моделі рухів кінцівок великої рогатої худоби в сагітальній площині використаємо багатоланкову систему, ланки якої з'єднані послідовно один з одним за допомогою точкових шарнірів (рис. 1). Маса-інерційні характеристики ланок приймаються рівними масо-інерційним характеристикам елементів передньої та задньої кінцівок. Довжини ланок  $l_i$  беруться рівними відстаням між осями обертання суглобів. Для простоти припускається, що центри мас  $m_i$  лежать на ланках. Сили від шиї та голови не розглядаються.

Положення описаної системи може бути задане узагальненими кутами  $\psi_i$ . Система знаходиться під дією сил тяжіння  $m_i g$  і протидіючих їм м'язових зусиль  $F_i$  для кожної ланки. У моделі розглядаються тільки двосуглобові м'язи. Приймається, що в стабілізації пози беруть участь шість груп двосуглобових м'язів. Приймається також, що на копита діє сила реакції опори  $F_0$ , яка залежить від типу підлоги.

Процес переміщення великої рогатої худоби описується системою рівнянь Лагранжа другого роду [5]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \psi_i} = Q_i, i=1..6, \quad (1)$$

де  $\psi_i$  – узагальнені кути;

$\dot{\psi}_i$  – узагальнена швидкість, м/с;

$t$  – час, с;

$T$  – кінетична енергія, Дж;

$Q_i$  – узагальнені сили, Н·м.

Кінетична енергія багатоланкової системи може бути представлена у вигляді:

$$T = \sum_{i=1}^6 \frac{m_i l_i^2 \dot{\psi}_i^2}{2} + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \frac{m_j l_i l_j \dot{\psi}_i \dot{\psi}_j}{2} \cos(\psi_i - \psi_j), \quad (2)$$

де  $l_i$  – довжина ланки тіла, м;

$m_i$  – маса ланки тіла, кг.

Узагальнені сили можуть бути визначені за формулою:

$$Q_i(t) = \overline{F}_i(t) \frac{d\overline{r}_i}{d\psi_i}, \quad (3)$$

де  $F_i$  – сила, що діє на ланку тіла, Н:

$$\overline{F}_i = F_{ix} \overline{e}_x + F_{iy} \overline{e}_y, \quad (4)$$

$e_x, e_y$  – одиничні вектори вздовж осей OX і OY відповідно;

$F_{ix}, F_{iy}$  – проекції сил на осі OX і OY;

$r_i$  – радіус-вектор центра мас ланки, м:

$$\overline{r}_i = \overline{e}_x \sum_{j=1}^i l_j \cos \psi_j + \overline{e}_y \sum_{j=1}^i l_j \sin \psi_j. \quad (5)$$

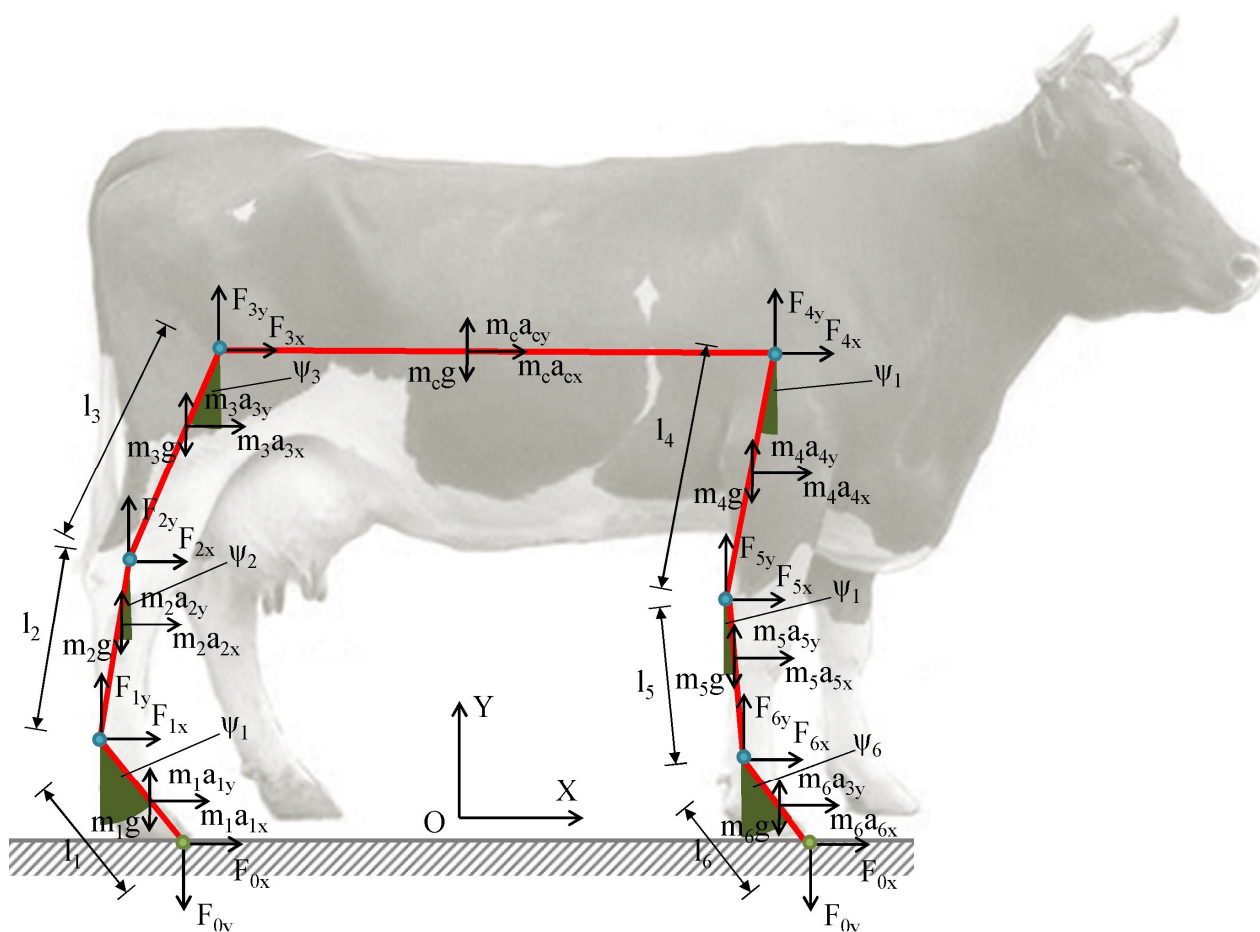


Рисунок 1 – Багатоланкова модель кінцівок великої рогатої худоби

Проекції сил  $F_x$  і  $F_y$  можуть бути представлені в наступному вигляді:

$$F_{ix} = \begin{cases} m_i a_{ix} - F_{0x}, & i = 1, 6; \\ m_i a_{ix} + F_{(i-1)x}, & i = 2..5; \end{cases} \quad (6)$$

$$F_{iy} = \begin{cases} m_i a_{iy} - F_{0y} + m_i g, & i = 1, 6; \\ m_i a_{iy} + F_{(i-1)y} + m_i g, & i = 2..5; \end{cases} \quad (7)$$

де  $a_i$  – прискорення,  $m/c^2$ ;

$$\overline{a}_i = \frac{d^2 \overline{r}_i}{dt^2} = a_{ix} \overline{e}_x + a_{iy} \overline{e}_y . \quad (8)$$

$a_{ix}, a_{iy}$  – проекції прискорення на осі OX і OY;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$F_{0x}, F_{0y}$  – проекції сили реакції опору на осі OX і OY.

Розв'язання системи рівнянь (1)-(8) неможливе без функції прискорення від часу  $a_i = a_i(t)$  для кожної ланки тіла. Для визначення зазначеної залежності були проведені експериментальні дослідження кінематичних параметрів руху ланок тіла великої рогатої худоби. Кінематичні параметри визначалися з використанням сучасної платформи відеоаналізу, а саме датчик-камери «Kinect» з розробленим програмним забезпеченням [6]. «Kinect» був змонтований на виході з доїльного залу на відстані 2 м від коридору, яким рухались корови (рис. 2).



Рисунок 2 – Проведення експериментальних досліджень кінематичних параметрів руху корови

В результаті обробки даних з датчик-камери «Kinect» будується динамічний скелет (набір ланок і вузлів) корови, який показує її рух коридором (рис. 3). Даний рух представляється у вигляді набору математичних виразів, що описують часову залежність положення кожної з вузлових точок.

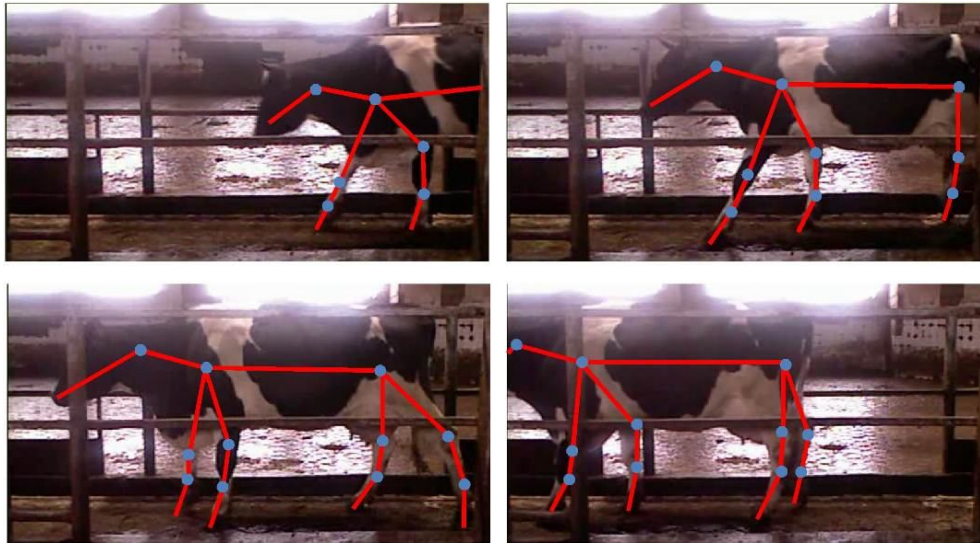


Рисунок 3 – Динамічний скелет (набір ланок і вузлів) корови

Дослідження руху корів проводилися на групі здорових корів (50 голів) середнім віком 1,5 роки, середня маса яких складала 500 кг. В результаті було отримано динамічні показники прискорень для кожної ланки тіла корови. Графічна інтерпретація отриманих залежностей представлена на рисунку 4.

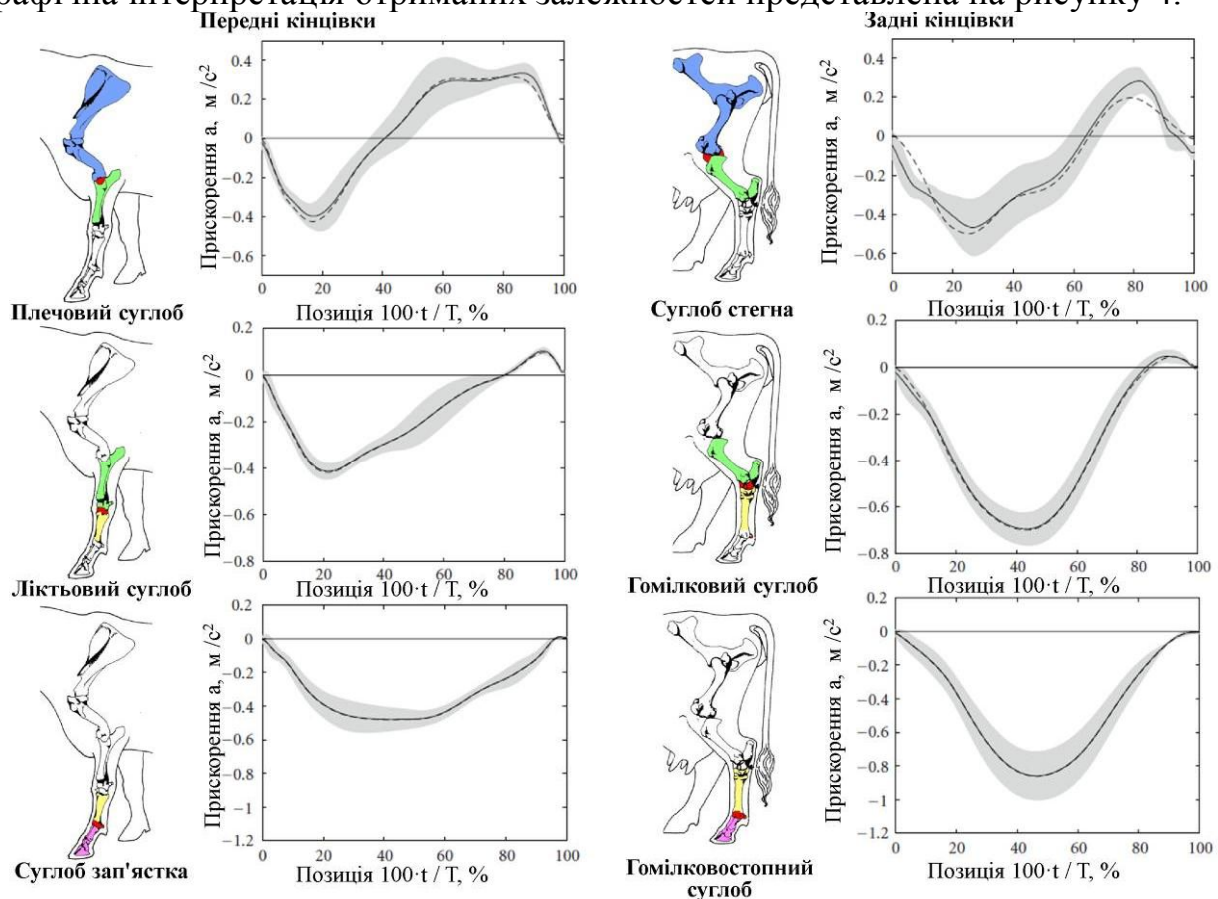


Рисунок 4 – Динаміка зміни прискорень вузлових точок у суглобах кінцівок корови

Розв'язання системи зазначених рівнянь (1)-(8) з урахуванням отриманих експериментальних даних щодо динаміки прискорень вузлових точок у

суглобах кінцівок корови є складною математичною процедурою. Тому біомеханічну модель кінцівок великої рогатої худоби було побудовано з використанням пакету програмного забезпечення OpenSim 3.0, який має відкритий код [7-9]. В процесі моделювання руху кістково-м'язової системи великої рогатої худоби в OpenSim 3.0 (рис. 5) було реалізовано процес взаємодії її кінцівок з різними типами підлог (бетон, пісок, тирса, солома і гумові мати).

Враховуючи фізико-механічні властивості матеріалу підлоги (модуль пружності, модуль зсуву і коефіцієнт пластичності) отримано значення питомої сили реакції опори (на 1 кг маси тварини)  $F_0/m$ , що діє на копита великої рогатої худоби (рис. 6). В результаті встановлено, що найбільша питома сила реакції спостерігається на бетонній поверхні – 9,8 Н/кг, а найменша на гумових матах – 5 Н/кг. Аналіз цих даних показав, що найбільш прийнятні властивості для копит корови мають наступні типи покриття підлоги: гумові мати, солома і тирса.

**Висновки.** Побудовано біомеханічну модель функціонування зооморфного механізму кінцівок великої рогатої худоби з використанням пакету програмного забезпечення OpenSim 3.0 на основі експериментально отриманих залежностей руху. В процесі моделювання руху кістково-м'язової системи великої рогатої худоби в OpenSim 3.0 реалізовано процес взаємодії її кінцівок з різними типами підлоги (бетон, пісок, тирса, солома і гумові мати). Аналіз отриманих даних показав, що найбільш прийнятні властивості для копит корови мають наступні типи покриття підлоги: гумові мати, солома і тирса.



Рисунок 5 – Результати моделювання руху кістково-м'язової системи великої рогатої худоби в OpenSim 3.0

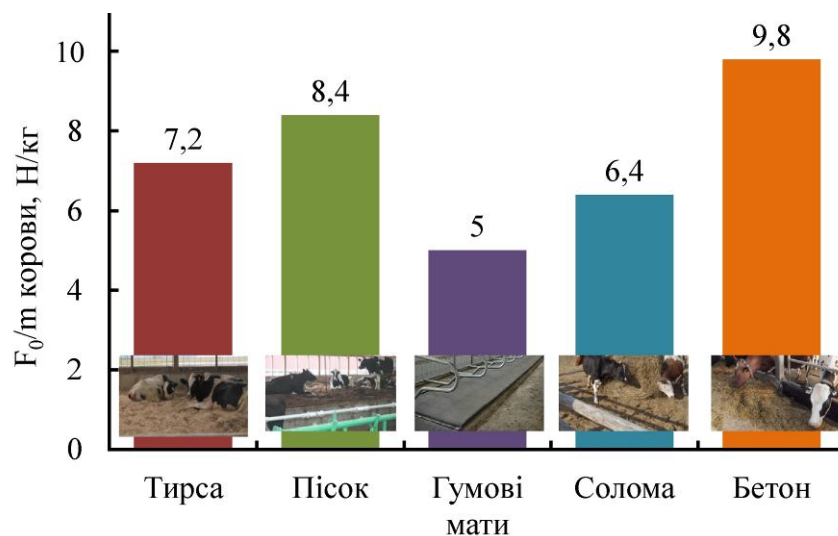


Рисунок 6 – Залежність значення питомої сили реакції опори  $F_0/m$ , що діє на копита великої рогатої худоби, від типу підлоги (на 1 кг маси тварини)

### Список літератури

1. Dr. Pék L.: Állatrögzítő kalodacsalád hazai fejlesztése szarvasmarhák, lovak biztonságos vizsgálatához, kezeléséhez // Óvári Tudományos Napok, előadások és poszterek összefoglaló anyaga. – Mosonmagyaróvár, 2004. – 63. p.

2. Пек Лайош. Влияние поверхности пола животноводческой фермы на изнашивание копытного рога коров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. - №2. – С. 29.

3. Phillips, C.J.C., and I. D. Morris. 2000. The locomotion of dairy cows on concrete floors that are dry, wet or covered with a slurry of excreta. J. Dairy Sci. 83:1767–1772..

4. De Belie, N. & Rombout, E. 2003. Characterisation of claw-floor contact pressure for standing cattle and the dependency on concrete roughness. Biosystems engineering 85,339–346.

5. Mülling, C.K.W. & Greenough, P.R. 2006. Functional synergism of the biomechanical systems of the bovine claw. In: Proc. 14th Int. Symp. Lameness in Ruminants, Colonia del Sacramento, Uruguay, pp. 39–42.

6. Kinect for Windows SDK [Electronic resource] / Интернет-ресурс. - Режим доступа: <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/develop/overview.aspx>

7. Delp, S.L., Anderson, F.C., Arnold, A.S., Loan, P., Habib, A., John, C.T., Guendelman, E., Thelen, D.G. OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 55, pp. 1940-1950, 2007

8. M. G. Pandy, "Computer modeling and simulation of human movement," Annual review of biomedical engineering, vol. 3, pp. 245, 2001.

9. Ratzlaff, M. H., Hyde, M. L., Hutton, D. V., Rathgeber, R. A. and Balch, O. K. (1997). Interrelationships between moisture content of the track, dynamic

properties of the track and the locomotor forces exerted by galloping horses. Equine Vet. Sci. 17, 35-42.

## **Аннотация**

### **Биомеханическая модель функционирования зооморфного механизма конечностей крупного рогатого скота**

Алиев Э.Б.

*Целью исследований является построить биомеханическую модель функционирования зооморфного механизма конечностей крупного рогатого скота и их взаимодействия с различными типами покрытия. Предложена биомеханическая модель движений конечностей крупного рогатого скота и составлена система описывающих ее уравнений. Получены временные зависимости ускорений суставов конечностей. Проведено моделирование взаимодействия конечностей с разными типами полов.*

## **Abstract**

### **Biomechanical model of the animal-mechanism limbs of cattle**

E. Aliev

*Biomechanical model of cattle limbs' motions is proposed, and system of equations, what describe this model, is made. Dependences of accelerations of limbs' joints from time are obtained. Modeling of limbs' interaction with various types of flooring is carried out.*