

В.М. АДАШЕВСЬКИЙ, Д.В. ЛАВІНСЬКИЙ

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ, ЯКІ ДІЮТЬ НА ЧАСТИНИ ТІЛА ЛЮДИНИ, ПРИ РІЗНИХ СПОРТИВНИХ РУХАХ

У статті розглядаються питання щодо визначення та аналізу сил, які діють на частини біомеханічної системи, за допомогою якої моделюється тіло людини-спортсмена із урахуванням особливостей певного виду спортивного руху. Застосовується твердотільне моделювання, задача розглядається у квазістационарному наближенні. Наведені основні типи сил, які діють на частини тіла спортсмена при різних видах рухів. Представлено загальний підхід до визначення положення центру ваги із метою коректного введення сил ваги у розрахункову схему. Надано теоретичні рекомендації щодо визначення сил взаємодії, які виникають у суглобах тіла людини. Наведена загальна методика із визначення сил реакцій опор та сил взаємодії поміж частинами моделі. Розглянуто розрахункову схему із визначення реакцій опор та сил взаємодії поміж частинами тіла людини для пози з певного виду спорту у рамках плоскої постановки задачі. Із застосуванням програмного комплексу КіДиМ проведено чисельне моделювання та визначені реакції опор для однієї конфігурації тіла людини.

Ключові слова: біомеханіка, твердотільне моделювання, квазістационарне наближення, сили реакцій, програмні комплекси.

В.М. АДАШЕВСКИЙ, Д.В. ЛАВИНСКИЙ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ, КОТОРЫЕ ДЕЙСТВУЮТ НА ЧАСТИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА, ПРИ РАЗНЫХ СПОРТИВНЫХ ДВИЖЕНИЯХ

В статье рассматриваются вопросы определения и анализа сил, которые действуют на части биомеханической системы, при помощи которой моделируется тело человека-спортсмена с учетом особенностей конкретного вида спортивного движения. Используется твердотельное моделирование, задача рассматривается в квазистационарном приближении. Приведены основные типы сил, которые действуют на части тела спортсмена при разнообразных видах движений. Представлен общий подход для определения положения центра тяжести с целью корректного введения сил тяжести в расчетную схему. Даны теоретические рекомендации для определения сил взаимодействия, которые возникают в суставах тела человека. Приводится общая методика по определению реакций опор и сил взаимодействия между частями модели. Рассмотрена расчетная схема определения реакций опор и сил взаимодействия между частями тела человека для положения из определенного вида спорта в рамках плоской постановки задачи. С использованием программного комплекса КиДиМ проведено численное моделирование и определены реакции для одной конфигурации тела человека.

Ключевые слова: биомеханика, твердотельное моделирование, квазистационарное приближение, силы реакций, программные комплексы.

V.M. ADASHEVSKY, D.V. LAVINSKY

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE FORCES THAT ACT ON PARTS OF THE HUMAN BODY DURING DIFFERENT SPORTS MOVEMENTS

The human body is a complex system, its functioning is subject to certain laws. Human movement is the basis of its existence. In the first approximation, the study of the laws of human motion can be carried out from the standpoint of biomechanics. The fundamental importance of biomechanics for the development of natural sciences, astronautics, medicine, physical culture and sports is well known and is due to the fact that its laws and methods of modeling are widely used in practical developments for each of these areas of science. Quantitative calculations of mechanical characteristics are an important step in determining rational biomechanical parameters for various human movements and actions, including sports. One of the stages of the analysis is to determine the forces acting on parts of the human body. The determined forces can be used both for further analysis of the deformation of body parts and for the analysis of motion in order to determine the rational parameters, i.e. those that lead to the best results. The paper considers issues related to quasi-stationary analysis of forces acting on elements of biomechanical systems. Theoretical methods and approach to computer modeling are offered. The main types of forces, which are taken into account in the calculated analysis of the balance and movement of an athlete in various sports, are given. In particular, an approach to determining the position of the center of mass of the biomechanical system "human body" for the correct introduction of gravity forces into the design scheme is presented. A theoretical approach to determining the forces of interaction in the joints of the human body is considered. The numerical analysis is carried out on the basis of computer modeling by means of software KiDiM on the example of determination of reactions under the conditions of a certain pose of the athlete.

Keywords: biomechanics, solid modeling, quasi-stationary approximation, reaction forces, software systems.

Вступ. Тіло людини є складною системою, його функціонування підпорядковано певним закономірностям. Рух людини є основою її існування. У першому наближенні вивчення закономірностей руху людини

можна проводити із позицій біомеханіки. Фундаментальне значення біомеханіки для розвитку природознавства, космонавтики, медицини, фізичної культури і спорту добре відомо і пов'язано з тим, що її закони і

способи моделювання широко використовуються в практичних розробках для кожного з цих напрямків науки. Разом з тим, слід зазначити, що біомеханіка, поряд з традиційною механікою, складає сучасну наукову базу техніки і технології для вирішення різноманітних і складних інженерних задач в області створення ефективних транспортних систем, авіаційних, космічних і атомних енергетичних установок, систем управління, робототехніки та автоматики, екології та інших систем, орієнтованих на вирішення глобальних проблем, що стоять перед суспільством [1-3].

Кількісні розрахунки механічних характеристик є важливим етапом визначення раціональних біомеханічних показників для різноманітних рухів і дій людини, в тому числі і спортивних. Одним із етапів проведення аналізу є визначення сил, які діють на частини тіла людини. Визначені сили можуть використовуватись як для подальшого аналізу деформування частин тіла, так і для аналізу руху із метою визначення раціональних параметрів, тобто таких, які призводять до найкращих результатів.

Теоретична методика визначення сил, які діють на частини тіла людини. Першим етапом розв'язання є визначення класів сил (гравітаційні, дисипативні, активні), які діють на елементи тіла людини. У першому наближенні вони можуть бути визначені із квазістаціонарної постановки задачі у припущенні відсутності деформування.

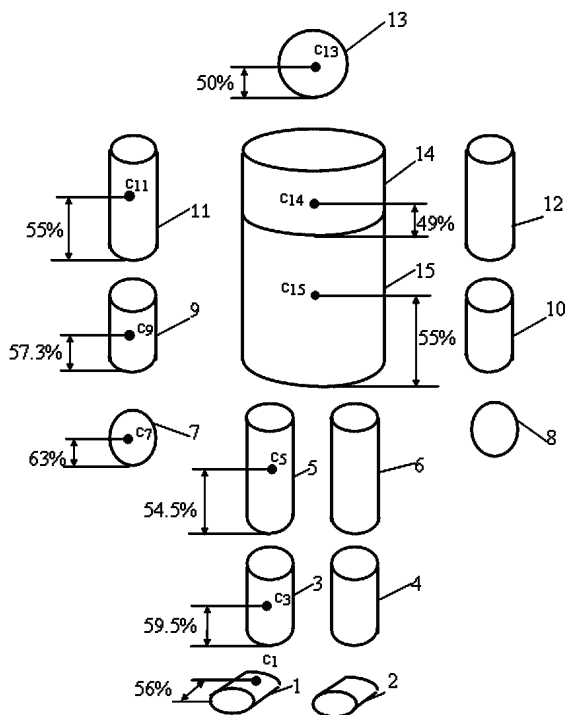


Рисунок 1 – Фізична модель тіла людини для визначення положення центрів ваги його частин

Аналіз рівноваги та взаємодії при моделюванні різноманітних рухів спортсменів неможливий без врахування сил ваги, які повинні прикладатись у відповідних точках – центрах ваги. Визначення положення

центрів ваги частин тіла людини є важливим етапом розв'язання.

Для знаходження центрів ваги біологічних об'єктів використовують безпосередньо фізичні моделі.

У разі визначення положення центрів ваги частин тіла людини можна використовувати модель, наведену на рис. 1, де центри ваги окремих частин (сегментів) позначені точками, положення яких вказані у відсотках від їх довжин, знайдених безпосередніми вимірами [2, 3]. Маси сегментів визначаються у відсотках від загальної маси тіла спортсмена, які отримані на основі статистичної обробки інформації. Величини мас сегментів приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Маси сегментів тіла людини

Назва сегменту	Номер сегменту	Маса сегменту у відсотках від загальної маси
Стопа	1,2	1,40
Гомілка	3,4	4,30
Стегно	5,6	14,20
Кисть	7,8	0,614
Передпліччя	9,10	1,60
Плече	11,12	2,70
Голова	13	6,94
Верхній відділ тулуба	14	15,96
Середній і нижній відділи тулуба	15	27,50

Для знаходження координат вузлів сегментів використовується права ортогональна система координат з горизонтальною віссю x , вертикальною віссю y , початок якої вибраний в довільній точці площини моделі. Координати центру мас біомеханічної моделі тіла спортсмена в прийнятій системі координат визначаються по формулах:

$$x_c = \frac{\sum (m_k \cdot x_k)}{m}; \quad y_c = \frac{\sum (m_k \cdot y_k)}{m}; \quad z_c = \frac{\sum (m_k \cdot z_k)}{m}$$

де m_k , x_k , y_k – маса і координати центру мас k -го сегменту моделі тіла; m – маса тіла спортсмена.

У багатьох випадках важливим є визначення сил зовнішнього опору, серед яких найпоширенішою є сила сухого тертя ковзання. Сила сухого тертя ковзання – як реактивна, виникає при взаємодії тіла з опорною поверхнею із-за шорсткості останньої і спрямована протилежно передбачуваному руху тіла під дією активних сил. Величина сили тертя залежить від активних сил і може набувати різних значень з інтервалу: $0 \leq P_{\text{тр}} \leq P_{\text{тр}}^{\text{max}}$. Максимальне значення сили тертя визначається за відповідними емпіричними законами, наприклад, за законом Амонтона-Кулона.

Важливим також є визначення реакцій суглобів. У загальному випадку тривимірного просторового руху кісткових сегментів, з фіксованою (нерухомою) однією їх точкою в суглобі, їх рух відповідає сферичному руху. При вивченні статичної рівноваги і стійкості у біомеханіці використовують моделі, в яких суглоби приймають у вигляді циліндричних або сферичних шарнірів, а їх реакції розкладають по ортогональ-

них осях, відповідно, на дві або три складові. З механічної точки зору суглоб можна представити (моделювати) деяким «підшипником ковзання», який змащується синовиальною рідиною, а роль контактних поверхонь в ній виконують гіалінові хрящі.

Окрім задач із визначення невідомих сил, які діють на елементи біомеханічних систем, також постають задачі аналізу статичної стійкості. Потреба у подібному аналізі виникає, наприклад, при розгляді видів спорту, у яких є необхідною фіксована статична поза спортсмена. Аналіз статичної стійкості рівноваги пози спортсмена здійснюється наступним чином. Для прийнятої пози в системі координат, в якій визначені координати центру ваги тіла, обчислюються абсциси крайньою лівою $x_{\text{лів}}$ і крайньою правою $x_{\text{пр}}$ опорних точок. Якщо абсциса центру ваги тіла x_c розташована усередині інтервалу $[x_{\text{лів}}, x_{\text{пр}}]$, то лінія дії рівнодійної сил ваги спортсмена проходить між опорними точками і поза є статично стійкою.

Загальний аналіз невідомих сил, що діють на елементи біомеханічної системи спирається на відповідні розрахункові схеми. Розрахункові схеми – представляються схематичним зображенням тіла спортсмена в характерній позі, рівновага якого розглядається в завданні. Розрахункова схема містить відомі (активні) сили та реакції в'язей. У випадку симетричного навантаження біомеханічної системи є можливість створювати плоскі розрахункові схеми. На рис. 2 наведені приклади розрахункових схем із визначення реакцій опор для певних видів спортивних дій.

Після знаходження опорних реакцій з рівнянь знаходяться навантаження, діючі на окремі суглоби. Для цього виділяється певний біокінематичний сегмент моделі спортсмена і розглядається його рівновага під дією відомих сил і невідомих навантажень в суглобах.

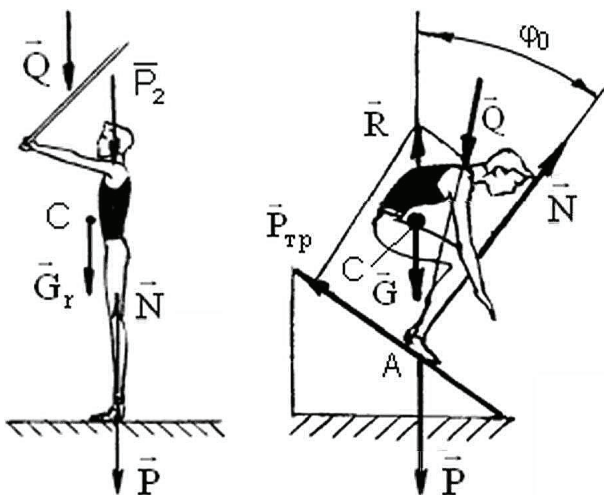


Рисунок 2 – Загальні розрахункові схеми із визначення опорних реакцій

Комп'ютерне моделювання. Сучасний підхід до розв'язання різноманітних задач механіки потребує використання комп'ютерних та інформаційних технологій, які загалом пришвидшують як процес побудови

розрахункових моделей так і процес безпосередньо розв'язку. У випадку розгляду твердотільних моделей можна використовувати програмний комплекс КіДиМ [4]. Розглянемо задачу визначення та аналізу розподілення реакцій опор на прикладі пози спортсмена, характерної для певного виду спорту з системою координат в сагітальній площині (рис.3). Після цього визначимо сили, які виникають у шарнірі, за допомогою якого можна моделювати колінний суглоб. Розглядається плоска розрахункова схема.

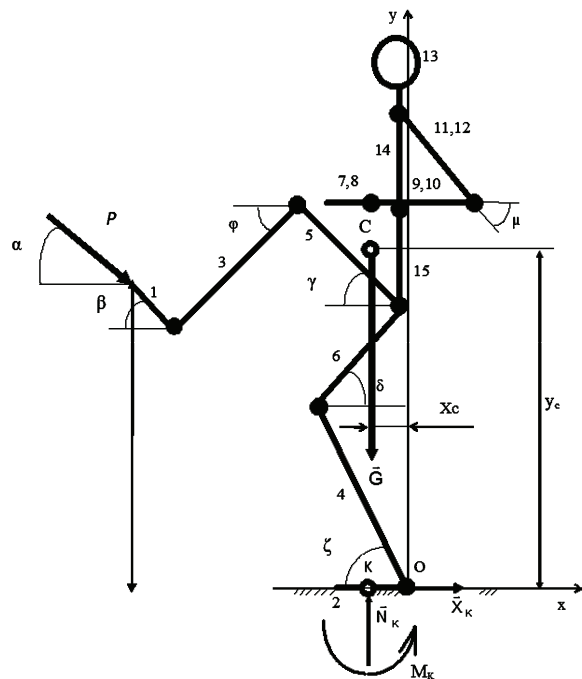


Рисунок 3 – Розрахункова схема із визначення опорних реакцій

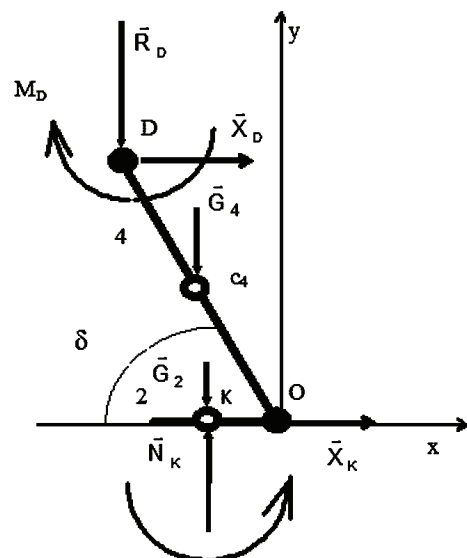


Рисунок 4 – Розрахункова схема із визначення сил у колінному суглобі

Розрахункова схема біокінематичного сегменту складається з гомілки (ланка – 4) і опорної стопи (лан-

ка – 2) (рис.4). Для знаходження зусиль в шарнірі колінного суглоба D замінимо дію відкинутої частини тіла на цей шарнір зусиллями X_D , R_D і моментом M_D , а також врахуємо знайдені раніше певні опорні реакції і сили ваги сегментів.

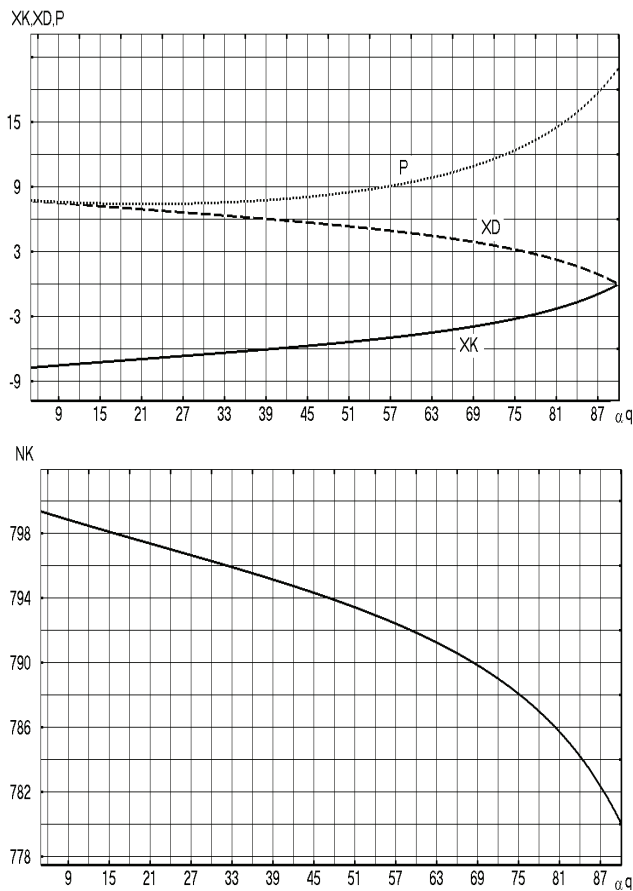


Рисунок 5 – Графіки залежності сил, які діють у колінному суглобі, та опорної реакції стопи від кута нахилу гомілки

Шляхом варіювання кута нахилу гомілки _ до осі Ox при різних значеннях геометричних параметрів біомеханічної системи проаналізувати якісні і кількісні зміни в значеннях опорних реакцій і сил у колінному суглобі.

Використання ПК КіДиМ надає можливості для проведення всебічного аналізу, наприклад, на базі різноманітного графічного матеріалу. Так на рис. 5 наведені графіки залежності опорних реакцій від кута нахилу гомілки. Аналізуючи подібні графіки, можна визначати конфігурацію, за якої реакції набувають екстремальних значень та оцінювати раціональне розташування тіла спортсмена.

Висновки. У роботі розглядаються питання, присвячені квазістационарному аналізу сил, які діють на елементи біомеханічних систем. Запропонована теоретична методика та підхід до комп'ютерного моделювання. Проведений аналіз на базі комп'ютерного моделювання засобами ПК КіДиМ на прикладі визначення реакцій за умов певної пози спортсмена.

Список літератури:

1. Hall S.J., Lysell D. Basic biomechanics. St. Louis, MO: Mosby, 1995.
2. Knudson D. Fundamentals of biomechanics. Springer Science & Business Media, 2007.
3. Özkaya N. et al. Fundamentals of biomechanics: equilibrium, motion, and deformation. Springer, 2016.
4. Андреев Ю.М., Лавинський Д.В., Морачковський О. К. Теоретична механіка. Комп'ютерний практикум. 2014.

Bibliography (transliterated):

1. Hall S. J., Lysell D. Basic biomechanics. St. Louis, MO : Mosby, 1995.
2. Knudson D. Fundamentals of biomechanics. Springer Science & Business Media, 2007.
3. Özkaya N. et al. Fundamentals of biomechanics: equilibrium, motion, and deformation. – Springer, 2016.
4. Andryeyev Yu.M., Lavins'kiy D.V., Morachkovs'kiy O.K. Teoretychna mekhanika. Kompyuternyy praktykum. 2014.

Надійшла (received) 2.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Адашевський Володимир Михайлович (Адашевский Владимир Михайлович, Adashevsky Volodymyr Mykhailovych) – кандидат технічних наук, професор, кафедра теоретичної механіки, НТУ «ХПІ». Тел.: (057)-70-763-73. E-mail: adashevsky@ukr.net

Лавинський Денис Володимирович (Лавинский Денис Владимирович, Lavinsky Denis Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра теоретичної механіки, НТУ «ХПІ». Тел.: (057)-70-763-73. E-mail: denis.lavinsky@ukr.net