

Біомеханічні особливості рухового апарату людини

1. Біомеханічна система, як модель живого рухового механізму

Рухові дії людини істотно залежать від будови та властивостей його тіла. З одного боку, надзвичайно складна будова і різноманітність властивостей тіла людини обумовлюють високу складність як самих рухових дій так і процесів керування ними. Але з іншого боку, це дозволяє досягнути надзвичайного багатства та різноманітності рухів, до цього часу недоступних жодній навіть найдосконалішій машині.

Біомеханіка вивчає переважно ті особливості будови і функцій тіла людини та її опорно-рухового апарату, які мають найбільше значення для удосконалення рухових дій. Відволікаючись від деталей анатомічної будови і фізіологічних механізмів рухового апарату, розглядають спрощену модель тіла людини - *біомеханічну систему*. Вона володіє основними властивостями, важливими для виконання рухової функції, але не включає в себе більшості другорядних деталей.

При математичних розрахунках з використанням біомеханічної системи (БМС) живого організму приймаються наступні *припущення*:

- кінематичні і динамічні характеристики БМС відповідають відповідним характеристикам досліджуваного живого організму;
- нехтують різницею в анатомічній будові правої та лівої частини тіла;
- біоланки БМС розглядаються як "миттєво затверділі", не враховуючи, що частини реального тіла – "жива маса";
- внутрішнє тертя і тертя в суглобах відносять до внутрішніх втрат, якими знехтувати неможливо, і які враховують при виведенні коефіцієнта механічної ефективності роботи м'язів;
- переміщеннями у деяких суглобах залежно від поставленого завдання нехтують;

- багатовісні суглоби при наявності відповідної керуючої роботи м'язів найчастіше вважають одновісними відповідно до рухових дій, які аналізуються, і т.ін.

Отже, біомеханічна система – це спрощена копія, модель тіла людини, на якій можна вивчати закономірності її рухових дій. Таким чином, біомеханічна система тіла людини складається з *біомеханічних ланцюгів*. Більшість частин тіла, з'єднаних рухомо, утворюють біокінематичні ланцюги. До них прикладені сили (навантаження), які викликають деформації самих біоланок та зміну їх руху.

2. Біомеханічні пари та ланцюги біоланок

В технічних механізмах, як і в побудованих з них машинах, можливості взаємного переміщення їхніх деталей, як правило, обумовлені способом їх з'єднання. В живих системах способи з'єднання біоланок в біокінематичні ланцюги однозначно не визначають можливостей рухів (наприклад їхній напрямок чи розмах). М'язи визначають рухи біомеханічних важелів, які передають рух і зусилля, та маятників, які зберігають рух, що почався раніше.

Рухоме з'єднання двох сусідніх частин тіла називають *біопарою*, а біоланки, поєднані біопарами, з'єднуються в *біокінематичні ланцюги*. Таким чином, *біокінематична пара* – це рухоме (кінематичне) з'єднання двох біоланок у суглобі, будова якого і керуючі дії м'язів визначають можливі варіанти взаємного механічного переміщення з'єднаних ним частин тіла.

В технічних механізмах з'єднання окремих деталей або частин – кінематичні пари – звичайно сконструйовані таким чином, аби дозволити можливість лише певних, заздалегідь заданих взаємних переміщень. Вони завжди обмежені або можливими *ступенями свободи*, або додатковими *в'язями* (див. нижче).

В живому організмі розрізняють наступні *види в'язей*: а) *геометричні* (постійні перешкоди переміщенню у кожному конкретному напрямку, наприклад

кісткове обмеження в суглобі) і б) *кінематичні* (обмеження швидкості, наприклад м'язами – антагоністами, які перешкоджають рухові).

Біокінематичні пари можуть мати *постійні в'язі*, які визначають максимальну і залишкові степені свободи взаємних механічних переміщень з'єднаних біоланок. Майже всі біокінематичні пари обертові; деякі допускають поступальне ковзання однієї ланки відносно іншої і лише одна пара – гвинтовий рух.

Біокінематичний ланцюг – це послідовне *незамкнуте* (розгалужене), або *замкнуте* з'єднання біоланок через біокінематичні пари. В *незамкнутих* ланцюгах є вільна біоланка, яка з'єднана лише з однією біоланкою. У замкнутих ланцюгах немає вільної кінцевої ланки: кожна біоланка обов'язково з'єднана двома біопарами. В незамкнутому ланцюгу можливі ізольовані рухи в кожному суглобі. При виконанні рухових дій рухи в незамкнутих ланцюгах проходять одночасно в багатьох суглобах, але можливість ізольованого руху не виключена. В *замкнутому* ланцюгу ізольовані рухи в одному суглобі неможливі: у цей рух одночасно втягуються й інші з'єднання.

Значна частина незамкнутих біокінематичних ланцюгів характеризується наявністю багатосуглобових м'язів. Тому рухи в одних суглобах за участю таких м'язів обов'язково пов'язані з рухами в сусідніх суглобах. Але при точному керуванні рухами у багатьох випадках цей взаємний зв'язок можна "виключити". В замкнутих ланцюгах зв'язок невизначений і дії м'язів обов'язково передаються на інші суглоби.

Незамкнутий ланцюг може стати замкнутих, якщо вільну біоланку механічно пов'язати з іншою ланкою ланцюга (безпосередньо або через будь – яке тіло, наприклад через опору).

3. В'язі та ступені свободи біоланок при виконанні фізичних вправ

Якщо механічному руху фізичного тіла немає ніяких обмежень (в'язей), воно може рухатися в просторі у всіх трьох вимірах, тобто уздовж трьох

взаємоперпендикулярних осей (поступально), а також навколо них (обертово). Таким чином, це тіло має шість ступенів свободи рухів, і називається *вільним*.

Кожна в'язь зменшує число ступенів свободи. Так, зафіксувавши лише одну точку вільного тіла (наприклад, приєднавши його до якоїсь біоланки тіла біопарою), це тіло відразу позбавляють трьох ступенів свободи – можливих лінійних переміщень вздовж трьох осей координат. Прикладом у наведеному випадку може бути з'єднання біоланок у кульовидних суглобах – кульшовому чи плечовому, які дозволяють з'єднаним ними біоланкам виконувати три незалежні обертання (згинання-розгинання, відведення-приведення та супінацію-пронацію). Якщо вільне тіло закріпити лише у двох точках, то єдиним можливим його переміщенням буде обертання довкола осі, що проходить через вказані точки. Прикладами таких з'єднань можуть бути одновісні суглоби тіла (наприклад, міжфаланговий). Закріплення трьох точок тіла виключає будь-які його переміщення в просторі, повністю обмежуючи свободу його переміщення.

За рахунок неповної відповідності форми суглобових поверхонь з'єднаних біопарами біоланок, в тілі людини виділяють *двоосні суглоби*, наприклад променево-заг'ястний та п'ястно-фаланговий першого пальця).

Майже всі суглоби тіла людини окрім міжфалангових, ліктьових та атлантаосного, дозволяють з'єднаним біоланкам переміщатися більш ніж з одним ступенем свободи. Це викликає невизначеність можливих рухів біоланок та безліч їх варіантів (так званій неповнов'язний механізм). Керуючі дії м'язів дозволяють одержати бажані додаткові в'язі, які однозначно визначають взаємне переміщення біоланок системи, залишаючи окремим біоланкам лише по одній степені свободи. Таким чином стає можливим вибір єдиного можливого варіанту руху – власне того, який необхідний.

Кожна біокінематична пара багатоосного суглоба має можливості багатьох механізмів, тому біомеханічні з'єднання набагато вигідніші від з'єднань технічних механізмів при керуванні їх переміщеннями (вибір необхідної траєкторії, швидкості переміщення і корекція руху, як протидія перешкодам).

4. Види важелів у біомеханічній системі та співвідношення моментів сил при виконанні різних вправ

Кістки як тверді тіла, з'єднуючись між собою завдяки біопарам, утворюють основу біокінематичних ланцюгів. Прикладені до біоланок сили (тяги м'язів, опір рухові, тяжіння, інерція тощо), діють на них як на важелі і маятники.

Важіль, як біомеханічна категорія, повинен обов'язково мати наступні елементи:

а) тверде тіло, до якого прикладені і через які передаються дії різних сил (кістка);

б) біопара - рухоме з'єднання біоланки з сусідньою, відносно якого можливе взаємне переміщення цих біоланок (суглоб);

в) сили, під дією яких відбувається взаємне переміщення (ці сили не повинні проходити через вісь біопари чи бути їй паралельними, тобто повинні створювати рушійні і гальмівні моменти відносно осі обертання суглоба).

Біоланки тіла, рухомо з'єднані між собою біопарами, під дією прикладених сил можуть або зберігати своє положення в просторі, або його змінювати. Біоланки служать для передачі руху і роботи в просторі. Всі сили, що діють на біоланку, окрім тих, які проходять через вісь відповідної біопари, умовно можна розділити на такі, що лежать у площині її власної осі (і тому не можуть змінити її руху відносно осі біопари) і непаралельні вказаній площині, які або прискорюють, або гальмують обертання навколо біопари.

Рух біоланки тіла по інерції після припинення розганяючої дії, подібний до руху фізичного маятника. Маятник під дією сили тяжіння після його попереднього відхилення від нижнього положення у будь-який бік, починає розганятися вниз, а далі, витрачаючи набуту при цьому кінетичну енергію, по інерції підіймається вгору. Період коливань маятника вираховується за формулою:

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{I : m \cdot g \cdot r} \text{ (с)},$$

- де I – момент інерції маятника відносно осі коливання;
 m – маса маятника;
 r – радіус інерції (віддаль між точкою підвісу маятника і його центром мас).

Для малих амплітуд гойдання маятника (до $6 - 7$ градусів), за вказаною формулою можна розрахувати власну частоту його коливань. Однак при більших амплітудах рухів (наприклад, переміщення ніг під час бігу тощо), а також враховуючи зміну моментів і радіусів інерції біоланок-маятників (рук і ніг) при виконанні більшості фізичних вправ за рахунок зміни їх довжини при згинанні - розгинанні, порядок розрахунку власної частоти коливань таких живих маятників значно складніший.

Прискорення маятника залежить від сумарного моменту розганяючих сил і його власного моменту інерції. Тому для збільшення швидкості розгону біоланки необхідно збільшити силу та плече її прикладання, або зменшити радіус інерції біоланки (наприклад, згинаючи її).

Складені маятники, на які подібні ноги чи руки людини при ходьбі, бігу тощо, ведуть себе набагато складніше, тому при кожному кроці моменти м'язових сил слід пристосовувати до постійно змінних умов, забезпечуючи відносну постійність кроків.

Якщо непаралельні відносно площини біоланки сили прикладені по обидві сторони осі біопари, такий біомеханічний важіль називається *двоплечим* (у класичній механіці – *важіль першого роду*). У випадку прикладення до важеля зусиль лише з однієї сторони він називається *одноплечим* (*важіль другого роду*). Слід пам'ятати, що переміщеннями у різних суглобах керують різні м'язи, які можуть проходити через різні сторони біопари, тому, наприклад, передпліччя у випадку піднімання вантажу за рахунок скорочення м'язів-згиначів працює як одноплечий важіль, а при скороченні розгиначів з метою метання предметів з-за голови – як двоплечий.

Сили дії м'язів, які скорочуються, завжди прикладені до кістки біомеханічного важеля поблизу осі біопари; вони набагато більші за інші сили, більшість яких діє на важіль через його протилежний кінець. Тому при розрахунку обертання біомеханічного важеля до уваги беруть не величину самих сил, а їх обертові моменти, що дозволяє врахувати як величину цих сил і напрямок їх дії, так і плече прикладення конкретного навантаження (найкоротшу віддаль від лінії дії сили до осі обертання).

5. Абсолютна та відносна маси біолонок тіла і способи їх визначення

До показників, що характеризують *геометрію мас тіла*, відносять *абсолютні і відносні маси* окремих його біолонок, *їх моменти та радіуси інерції*.

Абсолютні маси окремих біолонок тіла спортсмена, як і *їх моменти інерції* необхідно знати при біомеханічних розрахунках ефективності техніки виконання рухових дій конкретної людини. Від величини згаданих біомеханічних характеристик залежать підбір оптимального співвідношення темпу циклічних вправ та величини кроку, енерговитрати на переміщення біолонок тіла, сили інерції, що виникають при зміні руху біолонок і всього тіла, виконана спортсменом механічна робота, коефіцієнт її механічної ефективності тощо.

Вказані мас-інерційні характеристики можна визначити лише опосередковано (з допомогою методики занурення окремих біолонок в рідину, способом маятника або подібними), або використавши рівняння регресії, таблиці і коефіцієнти, одержані фахівцями на підставі обробки результатів спеціальних експериментів.

Одними з перших були проведені дослідження на заморожених і розчленованих трупах (звідки й пішли широковідомі коефіцієнти 7, 43, 1, 2, 3, 2, 5 і 12 для приблизного визначення мас окремих біолонок, а також відомі

коефіцієнти Фішера 0,42; 0,44 та 0,47 для визначення положення центрів їх мас, якими користуються і сьогодні.

Наступні дослідження лише уточнили одержані дані для різних груп пацієнтів.

6. Положення центрів мас окремих біолонок та всього тіла спортсмена

Центром мас тіла (ЦМТ) називається точка перетину прямих, вздовж яких повинні бути спрямовані сили, щоб тіло рухалося поступально. Тому важливо вміти визначати положення ЦМТ при біомеханічному аналізі його руху. Будь-яку досліджувану рухову дію можна представити як суму більш простих рухів – наприклад, руху ЦМТ та обертання біолонок тіла довкола нього.

Положення центра маси тіла людини можна визначити шляхом її зважування на спеціальній платформі трикутної форми, на якій вона приймає потрібну позу. Проте більш зручним є розрахунковий спосіб, описаний нижче, який передбачає знаходження центрів мас усіх його біолонок.

Для визначення положення центрів мас біолонок користуються відомими з курсу динамічної анатомії коефіцієнтами Фішера, що становлять: для тулуба та стегна - 0,44; для передпліччя та гомілки – 0,42; для плеча – 0,47.

Вказані коефіцієнти є не зовсім точними, так як не враховують тотальні розміри тіла, вік, співвідношення м'язового, кісткового та жирового компонентів, спортивну спеціалізацію тощо. З цією метою у спеціальній літературі приведені точніші вирази для розрахунку необхідних мас-інерційних характеристик тіла людини. Ці уточнені дані одержані в процесі спеціального радіотопного сканування пацієнтів за методикою ГЦОЛІФКу.

7. Використання теореми Варіньйона для визначення положення центра маси тіла спортсмена

Визначити розташування ЦМТ спортсмена, зображеного на фотографії, можна, використавши наслідок відомої у класичній механіці *теорему Вариньйона* (1654-1722): *момент рівнодійної системи плоских однонапрямлених сил відносно будь-якої точки на площині, рівний алгебраїчній сумі моментів складових сил відносно цієї ж точки.*

ЦМТ співпадає з *центром тяжіння* тіла людини. Тому, застосовуючи теорему Вариньйона до сил тяжіння окремих біоланок тіла, а також враховуючи пропорційність цих сил відповідним масам, одержимо наступні залежності для визначення координат ЦМТ X_c та Y_c :

$$X_c = \sum m_i \cdot x_i / M \text{ (мм)}; \quad Y_c = \sum m_i \cdot y_i / M \text{ (мм)}$$

де: m_i – маса i -тої біоланки в кг;

x_i та y_i – к оординати центрів мас цих біоланок в мм.

Наслідок теорему Вариньйона з метою визначення положення ЦМТ за фотографією застосовують у наступному порядку:

- зображають на заданій фотографії людини плоску систему координат, спрямувавши вісь абсцис (X) праворуч, а вісь ординат (Y) – вгору, і бажано таким чином, щоб людина, зображена на ній, знаходилася якомога ближче до початку системи координат);

- наносять на фотографію центри мас голови, кистей і стоп та центри усіх суглобів, керуючись анатомічними ознаками;

- малюють відповідну таблицю (див. таблицю 1.1. нижче);

- визначають положення ЦМ кожної біоланки, помноживши попередньо виміряну її довжину на відповідний коефіцієнт Фішера та відклавши одержані відрізки від проксимального (важкого) кінця (для тулуба - це плечовий пояс). ЦМ голови знаходиться, як відомо, над верхнім краєм зовнішнього слухового отвору; ЦМ кисті співпадає з п'ястно-фаланговим суглобом третього пальця; ЦМ стопи (якщо це можливо визначити за наявною фотографією) розташований на лінії між

п'ятковим горбом та другим пальцем ноги на віддалі 0,44 повної довжини стопи від п'ятки;

- знаходять маси кожної біоланки тіла, помноживши значення графі «1» таблиці 1 на масу спортсмена в кг заносять їх в графу «4» таблиці;

- вимірюють на фотографії та заносять у відповідні графи таблиці координати x_i та y_i центра маси кожної біоланки;

- вираховують і записують у відповідні графи таблиці 1 добутки $m_i \cdot x_i$ та $m_i \cdot y_i$

- знаходять суми $\sum m_i \cdot x_i$ та $\sum m_i \cdot y_i$;

- за формулами для координат ЦМТ вираховують координати x_c та y_c і показують їх на фотографії, зазначивши знайдені координати на вісях.

Таблиця 1.

Розрахунок положення ЦМТ спортсмена за фотографією

№	Назва біоланки	m_i %	m_i , кг	x_i	$m_i \cdot x_i$	y_i	$m_i \cdot y_i$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Голова	7					
2	Тулуб	43					
3	Стегно праве	12					
4	Стегно ліве	12					
5	Гомілка права	5					
6	Гомілка ліва	5					
7	Стопа права	2					
8	Стопа ліва	2					
9	Плече праве	3					
10	Плече ліве	3					
11	Передпліччя праве	2					
12	Передпліччя ліве	2					
13	Кисть права	1					
14	Кисть ліва	1					
		Суми:					

8. Центр об'єму та центр поверхні тіла і їх значення для виконання фізичних вправ

До показників геометрії мас тіла відносяться також центр об'єму і центр поверхні тіла.

Центр об'єму тіла – це точка прикладення рівнодійної сил гідростатичного тиску – сила Архімеда. Оскільки густина тіла людини неоднорідна (для прикладу – легені важать дуже мало, але займають великий об'єм), центр об'єму тіла не співпадає з центром мас, і в позі стоячи знаходиться на 3 – 6 см вище від нього. Взаємне розташування обох точок істотно впливає на рівновагу тіла у воді, так як спричиняє утворення обертового моменту пари сил: Архімеда та земного тяжіння.

Центр поверхні тіла – точка прикладання рівнодійної сил дії середовища (повітря, води). Центр поверхні залежить в першу чергу від пози і напрямку потоку середовища. При великих відносних швидкостях руху (парашутний, мотоциклетний, автомобільний, санний, гірськолижний спорт, стрибки з трампліна та інше), коли сили опору середовища великі, взаємне розташування центра поверхні і центра мас тіла істотно впливає на збереження рівноваги та успішність виконання всієї вправи.