

Біомеханічні основи обертових рухових дій

1. Біомеханічні особливості виконання обертових рухових дій

Основа рухових дій людини - це відносне обертання бісланок тіла в суглобах. Для біомеханічних розрахунків використовується модель тіла спортсмена - біомеханічна система, що складається з твердих бісланок, які не деформуються, і переміщуються одна відносно одної за рахунок обертання в суглобах (за рахунок чого і відбувається деформація всієї системи - зміна пози моделі тіла).

Обертаний рух твердого тіла - це вид простого руху, при якому всі точки тіла рухаються по колах з центрами на спільній осі. Сума двох або трьох обертових рухів (одночасне обертання довкола двох або трьох осей) - це сферичний рух тіла: всі його точки рухаються по сферах із спільним центром (який виходить з точки перетину осей обертання). При біомеханічних розрахунках найчастіше вивчають обертання бісланок відносно кожної з осей окремо, а потім сумують одержані результати: таким чином сферичний рух представляється як сума більш простих обертових рухів.

Обертання тіла у просторі можна представити у вигляді складного обертання навколо трьох осей. Це можуть бути осі прямокутної системи координат, проте у даному випадку зручніше користуватися системою координат (кутами) Ейлера. Наприклад, дитя обертається:

а) довкола власної осі (власне обертання);

б) відносно осі обертання описує криву конічну поверхню довкола іншої осі (прецесія);

в) кут між цими двома осями змінюється (нутація). Коли обертання нетривале з відносно невеликою швидкістю, помітним є тільки власне обертання.

Виконувач руху довкола осей, спортсмен утримує все тіло, або окремі його бісланки на криволінійних траєкторіях, або змінює кривизну цих траєкторій, забезпечуючи необхідну кінематику та динаміку фізичної вправи, яка виконується. У деяких випадках швидкість обертового руху зростає або зменшується: обертання прискорюється або сповільнюється. Обертові рухи завжди включають в себе елементи власне обертання, сферичного руху, а також радіальний поступальний рух відовж радіуса до осі або від осі обертання, який змінює сам обертовий рух.

Рух тіла довкола осі обертання відбувається лише при наявності утримуючого тіла, що викликає доцентрове прискорення. Навіть при рівномірному обертанні (коли кутова швидкість обертового руху не змінюється), напрямок вектора лінійної швидкості руху всіх точок тіла, що обертається, постійно змінюється. А внаслідок цього виникає нормальне (радіальне) прискорення, яке направлене до центра обертання; це прискорення одержало назву доцентрового (за напрямком його вектора). Доцентрове прискорення викликане діяю зов-

нішньої сили, яка має такий самий напрямок, і також називається доцентровою силою. Джерелом цієї зовнішньої сили в зовнішнє - утримує тїло, яким може бути спортивний прилад (наприклад, бруси, перекладина), опорна поверхня, партнер чи суперник тощо, або протилежна частина тїла спортсмена (при обертанні без опори довкола осей, що обов'язково проходять через ЦМТ). Але якщо дія утримуючого тїла припиняється, то завдяки своїй інертності тїло продовжує рух по дотичній до попередньої траєкторії.

При обертovому русі біоланки довкола суглобової осі утримуючим тїлом виступає сусідня біоланка, а доцентровою силою є реакція зв'язку зі сторони утримуючого тїла (сусідньої біоланки) на м'язові тяги та дію суглобових зв'язок.

Біоланка, що обертається, діє на утримуюче тїло відцентровою силою - реальною силою інерції, рівною за величиною і протилежною спрямованою, ніж доцентрова сила.

Величина доцентрового прискорення при обертанні біоланки залежить від швидкості обертання та віддазі до осі обертання:

$$a_{\text{доц}} = v^2 / r \quad [\text{м/с}^2]$$

де $a_{\text{доц}}$ - доцентрове прискорення, м/с^2 ;
 v - лінійна швидкість руху центра мас, тїла по колу, м/с ;
 r - віддаль від ЦМТ до осі обертання, м .

Доцентрова сила, яка викликає доцентрове прискорення, спрямована перпендикулярно вектору лінійної швидкості руху точок тїла, тому змінювати її не може. Її може змінити (збільшити або зменшити) лише тангенціальна (дотична до траєкторії) сила, перпендикулярна до радіуса, яка викликає тангенціальне (дотичне) прискорення. Тому, при вивченні обертovого руху біоланки необхідно чітко розрізняти сили, прикладені відсвж радіуса: перпендикулярно до нього.

Зміна обертovого руху біоланки, що характеризується збільшенням або зменшенням його кутової швидкості, може бути здійснена лише моментом зовнішньої сили (ця сила мусить бути перпендикулярною радіусу обертання та не проходить через центр обертання). Оскільки до кожного реального тїла завжди прикладені гальмівні сили, що протидіють обертанню, наприклад, тертя між тїлом та віссю обертання, опір середовища тощо, збільшення кутової швидкості можливе лише при позитивній різниці між моментами рушійних та гальмівних сил.

Момент зовнішньої сили, прикладений до біоланки, викликає його кутове прискорення, що оберненопропорційне моменту інерції біоланки відносно осі обертання:

$$M_z = J \cdot \epsilon \quad [\text{Н} \cdot \text{м}]$$

де M - момент зовнішньої сили, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

J - момент інерції біоланки, кг·м² ;
 ϵ - кутове прискорення, с⁻².

Імпульс моменту сили (добуток моменту сили на час) викликає відповідну зміну кутової швидкості обертання:

$$\Delta \omega = S_z / J \quad [c^{-1}]$$

де S_z - імпульс моменту сили ($S_z = J \cdot \Delta \omega$ -
 - кінетичний момент);
 J - момент інерції біоланки, кг·м².

Оскільки момент інерції біоланки постійний, то досягти збільшення кутової швидкості можна лише за рахунок позитивної різниці між рушійним та гальмівним моментами.

Складніше виглядає питання про збільшення кутової швидкості обертання системи біоланок (наприклад, всього тіла спортсмена): при деформації пози в процесі виконання фізичної вправи уже не можна говорити про кутову швидкість обертання всього тіла, так як лінійні швидкості руху різних точок при обертанні змінюються по різному, і єдиний кутовий швидкості для всього тіла не існує. Для приближеної оцінки зміни кутової швидкості всього тіла часто знаходять ЦМ верхньої та нижньої його частин, та вважають лінію, яка з'єднує ці точки, віссю тіла; кутову швидкість обертання всього тіла при цьому утотожують з кутовою швидкістю обертання знайденої осі.

Таким чином, моменти, прикладені до тіла, що обертається, можуть або прискорювати, або сповільнювати його обертання. Момент сили тяжіння, що діє на тіло гімнаста, який вільно гойдається на поперечці, прискорює його рух, коли він рухається дотолу, і сповільнює обертання тіла при русі вгору. З точки зору перетворення енергії, цей процес можна описати, як поступовий перехід потенціальної енергії положення тіла гімнаста вгору в кінетичну енергію руху його тіла вниз, та навпаки - при подальшому русі вгору. Якщо у кожному циклі коливань до системи підводити певну порцію енергії (у вигляді прискорюючого моменту), призначеної для компенсації тертя рук об поперечку, опір повітря і таке інше, коливання могли б продовжуватися необхідний час і навіть (при збільшенні підводу енергії) - збільшуватися за амплітудою.

Якщо гімнаст при підйомі вгору зігне ноги в кульшових, або в колінних суглобах, момент інерції відносно осі обертання стане меншим, а кутова швидкість, згідно з теоремою про зміну імпульсу механічної системи, зросте (кінетичний момент - механічної системи за відсутності зовнішнього моменту повинен зберігатися постійним), причому у стільки ж разів, у скільки зменшиться момент інерції.

Таким чином, кутова швидкість обертання системи біоланок може змінюватися або під дією моментів зовнішніх сил, або за рахунок змін моменту інерції системи відносно осі обертання.

2. Обертання тіла спортсмена зі змінюю кінетичного моменту біомеханічної системи

Керування руками довкола осей зі змінюю кінетичного моменту системи здійснюється за рахунок моментів зовнішніх сил, для чого необхідне їх джерело - зовнішнє тіло.

Обертаний рух тіла можна змінити моментом зовнішньої сили при збереженні його пози. Наприклад, теніс може за рахунок своєї м'язової роботи розгойдати, підкрутити, загальмувати або зупинити обертання тіла спортсмена, який виконує обертові рухи. При цьому, навіть без попереднього обертання, стороння людина може надати тілу спортсмена, який рухається поступально, обертання (наприклад, у боротьбі, акробатиці і ін.).

Змінюючи момент інерції тіла відносно осі обертання за рахунок згинання ніг або підтягування на руках ближче до осі обертання, спортсмен змінює плече прикладання зовнішньої сили - сили тяжіння, завдяки чому від циклу до циклу кутова швидкість руху тіла зростає. Це досягається шляхом зменшення від'ємної роботи сили тяжіння при гальмуванні тіла спортсмена, який рухається вгору, за рахунок активних м'язових тяг, що наближають та віддаляють центр мас від опори.

При відштовхуванні від опори, а також за рахунок рухів у кистях рук завдяки силі тертя між долонями та поперечкою, можна привести систему в обертовий рух (за рахунок шкунного створення моменту зовнішньої сили). При цьому обертання може відбуватися як довкола горизонтальної осі, так і довкола похилої (несиметричне відштовхування від опорної поверхні ногами або від поперечки, брусів і т. ін. - руками).

Таким чином, зміна обертового руху системи зі змінюю кінетичного моменту системи можлива:

- а) за рахунок моментів зовнішніх сил, обумовлених дією інших тіл (тренер, суперник тощо) при збереженні пози;
- б) за рахунок зміни пози (моменту інерції відносно осі обертання) при фіксованій осі обертання;
- в) при активному створенні обертового моменту зовнішніх сил при відштовхуванні або притягуванні до опори.

Приклади обертових рухів при опорі

Наявність утримуючого тіла - опори - створює умови для обертового руху. Реакція опори утримуючого тіла служить децентрованою силою.

Оборот назад з упору стоячи зігнувшись: у цій справі при згинанні ніг тіло наближається до осі обертання, при розгинанні - віддаляється, що приводить до зміни моменту інерції відносно осі обертання. Першу половину оберту гімнаст виконує під дією сили тяжіння, розігнувши ноги, завдяки чому він абільше плече прикладання сили тяжіння. Друга половина оберту виконується із зігнутими ногами, завдяки чому від'ємна робота сили тяжіння менша за додаток

і компенсує втрати енергії на тертя об гриф поперечки та опір повітря. В останній момент (уже на горі) спортсмен випрямляє ноги, піднімаючи ЦМТ в попереднє положення, та знову виходить у початкове положення (рис. 1,б).

Підйом розгином на поперечці: ця вправа виконується в положення вису в положення упору (рис. 1,в,г). В кінці маху вперед гімнаст згинає тіло в кульшових суглобах, наближаючи ноги до осі обертання. При цьому зменшується момент інерції і рух тіла, що відбувається під дією сили тяжіння, стає інтенсивнішим (швидкість обертання збільшується).

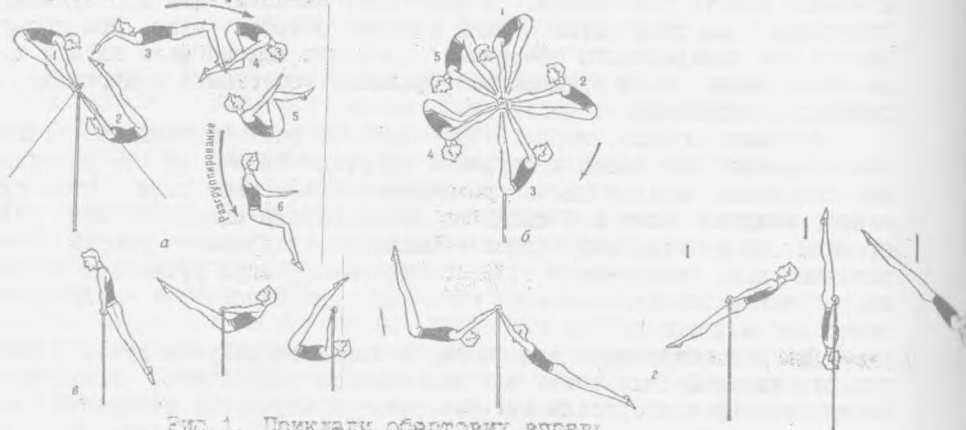


Рис. 1. Приклади обертових вправ:
а - зіскок дуги з поперечки із зальто;
б - оборот назад з упору стоячи вигнувшись;
в, г - підйом розгином на поперечці.

Існує інший спосіб наближення тіла до осі обертання - розгинання рук у плечових суглобах (тіло стає випрямленим). В результаті цього руху гімнаст починає підйом в упор в протилежну сторону із швидкістю, достатньою для завершення вправи в положенні упору на поперечці, або стійки на кистях.

Обертові рухи із збереженням рівноваги тіла у прикладних видах спорту часто припадає вирішувати завдання збереження рівноваги тіла під час його руху по криволінійній траєкторії (найчастіше - при проходженні поворотів траси). Класичними завданнями у цьому випадку є:

а) розрахунок найбільшої кривизни (найменшого радіуса) траєкторії руху велосипедиста (мотоцикліста, ковзаняра, бігуна, гірськокожаника тощо) та відповідного йому максимального вахлиду до поверхні траси при заданій лінійній швидкості руху та коефіцієнті тертя шин (вауття, лиж) і покриття траси;

б) розрахунок найбільшої кривизни (найменшого радіуса) траєкторії руху автомобіля (саней, боба, безмоторного візочка тощо) без його перекидування, при заданій лінійній швидкості руху та коефіцієнті тертя шин (полосів) і покриття траси.

В обоіх випадках розв'язок завдання полягає у вивченні сил, які діють на біомеханічну систему.

Показавши, що діють на систему велосипедист-велосипед при проходженні віражу траси (рис. 2), можна визначити наступне:

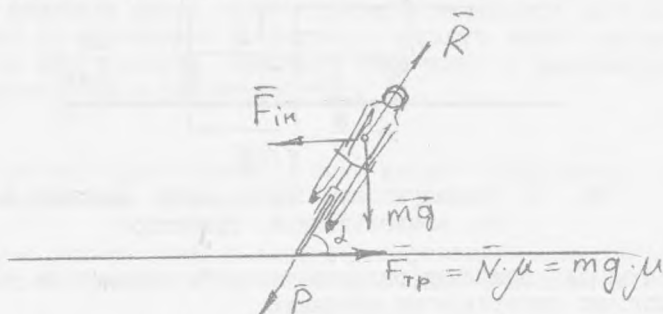


Рис. 2. Розрахункова схема руху біомеханічної системи велосипедист-велосипед по криволінійній трасі

- утримувачим тілом біомеханічної системи, що рухається по криволінійній трасі, з опорна поверхня (асфальт траси);

- доцентровою утримувачою силою є сила тертя F_{TP} між шинами коліс і покриттям опорної поверхні;

- на біомеханічну систему діє сила тяжіння $\overline{m\vec{g}}$ і сила інерції $\overline{F_{in}} = -m\vec{a} = m\vec{v}^2/r$, які зрівноважуються реакцією опори

$$\overline{R} = -(\overline{F_{in}} + \overline{m\vec{g}})$$

- вертикальна складова реакції опори зрівноважує притискальну силу N , рівну силі тяжіння біомеханічної системи $m\vec{g}$;

- горизонтальна складова реакції опори - сила тертя - зрівноважує силу інерції.

Звідси:

$$F_{TP} = \mu \cdot m\vec{g} = \overline{F_{in}} = m\vec{a} = m \frac{\vec{v}^2}{r}$$

де μ - коефіцієнт тертя; r - радіус повороту.

$$v = \sqrt{\mu g \cdot r} \quad ; \quad r = \frac{v^2}{g \cdot \mu}$$

Для визначення кута нахилу системи, що відповідає знайденому мініимальному радіусу повороту при заданій лінійній швидкості руху біомеханічної системи використаємо обумовлену заданим коефіцієнтом тертя нерівність:

$$F_{in} \leq F_{TP} = m\vec{g} \cdot \mu$$

Тому:

$$m\vec{g} \cdot \text{tg } \alpha \geq m \vec{v}^2 / r, \quad \alpha \geq \text{arctg } \sqrt{v^2 / r \cdot g}$$

Для розв'язку другого завдання розглянемо розрахункову схему на рис. 3:

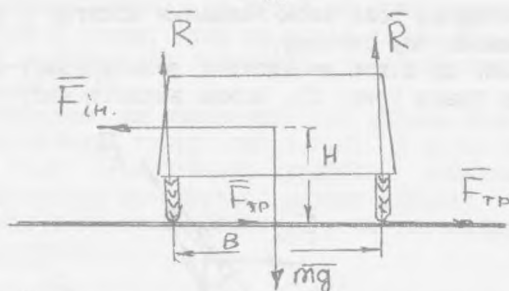


Рис. 3. Розрахункова схема руху автомобіля по криволінійній траєкторії

Мінімальне значення радіуса повороту автомобіля розраховується аналогічно попередньому завданню:

$$r = \frac{v^2}{g \cdot \mu}$$

При зменшенні розрахованого виду радіуса повороту, або при збільшенні лінійної швидкості руху автомобіля почнеться бокове ковзання (занос).

Для визначення небезпеки перевертання слід врахувати, що сила інерції створює перекидаючий момент відносно осі, що проходить через край площі контакту зовнішніх коліс з дорогою (т. В на рис. 3):

$$M_{пер} = F_{in} \cdot H = m v^2 \cdot H / r$$

Перекидаючий момент сили інерції врівноважується повертаючим моментом сили тяжіння:

$$M_{врів.} = mg \cdot B / 2$$

Якщо коефіцієнт сцеплення коліс з дорогою (коефіцієнт тертя) - великий, а центр мас біомеханічної системи автомобіль-вонщик знаходиться високо над поверхнею дороги, може виникнути загроза перекидування автомобіля:

$$M_{пер} \leq M_{врів.} \quad \frac{m v^2 \cdot H}{r} \leq mg \cdot B / 2$$

Тому: $2v^2 \cdot H \leq g B r$

$$r \geq 2v^2 \cdot H / g \cdot B, \quad \text{а } v \leq \sqrt{r g B / 2H}$$

Збільшення маси автомобіля ніяк не впливає на розраховані нами значення, що видно з одержаних залежностей (збільшення притискувальної сили пропорційне силі інерції, а збільшення повертаючого моменту пропорційне збільшенню перекидаючого). Проте, збільшення маси біомеханічної системи в обидвох розглянутих прикладах пропорційно збільшує потужність, енергосаграти і час її розгону (багато-

раєвих розгонів під час додання траси амагань), і знижує ефективність гальмування (збільшення гальмівного шляху, часу гальмування, прискорене зношування, перегрів, а від нього - закипання гальмівної рідини, зниження ефективності роботи і можлива аварія гальмівної системи).

Тому у вказаних видах спорту стараються знизити масу біомеханічної системи до мінімально допустимої, якомога нижче опустити ЦМТ і використати шини (вуття, ковзани, ліжі тощо) з максимальним коефіцієнтом сцеплення з покриттям траси.

3. Обертання тіла спортсмена без зміни кінетичного моменту біомеханічної системи

Керування рухами довкола осей зі збереженням кінетичного моменту системи здійснюється внутрішніми силами з допомогою зустрічних рухів.

Ефект палачої ніжки, як виявилось при аналізі швидкісної кінограмки, обумовлений поворотом тулуба тварини у потрібному напрямку за рахунок швидкого обертання хвостом у протилежному напрямку. Гімнасти, повертаючи одну або дві руки у фронтальній площині в безопорній фазі фізичної вправи, починають також обертатися навколо фронтальної осі, але повільно (бо момент інерції всього тіла більший за момент інерції рук) і в протилежному напрямку - адже сума векторів кінетичних моментів усіх частини біомеханічної системи повинна залишитися незмінною. При обертанні рук в боковій площині все тіло також починає повільно обертатися, але вже довкола відповідної горизонтальної осі, і також у протилежному відносно рук напрямку.

В спортивних іграх поворот верхньої частини тіла спортсмена в безопорній фазі вправи, викликаний необхідністю термінового зриву технічних чи тактичних завдань, які повстали вже під час польоту, і не були враховані при відштовхуванні від опори для стрибка, можливий, але при умові обов'язкового повороту на такий самий кут, але в протилежну сторону, нижньої частини тіла.

В усіх наведених прикладах кінетичний момен системи залишається незмінним - кінетичні моменти частин тіла, які обертаються у протилежних напрямках, рівні за величиною і протилежні за знаком, але їх сума рівна нулю.

Малючі початкове обертання тіла (нехай з невеликою кутовою швидкістю), спортсмен у безопорній фазі може змінити своє обертання, але лише у межах початкової величини кінетичного моменту, тобто збільшити свою кутову швидкість за рахунок пропорційного зменшення моменту інерції тіла відносно осі обертання, яка завжди проходить через центр мас тіла, та навпаки за рахунок зміни пози (наприклад, згупуючись, чи навпаки).

Змінити орієнтацію тіла спортсмена в безопорній фазі без участі зовнішніх сил можна шляхом складного обертання: спочатку тіло згинають у поперековому відділі хребта (наприклад, обличчям