

Лекція БІОМЕХАНІЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ ОПОРНО-РУХОВОГО АПАРАТУ БІОКІНЕМАТИЧНІ ЛАНЦЮГИ.

Для об'єктивного аналізу рухів та рухових дій людини необхідно використовувати відомі біомеханічні дані про її руховий апарат як про матеріальну систему процесу рухів її тіла. *Опорно-руховий апарат (ОРА (рис. 2.1))* — це система кісткових важелів, що приводиться у дію м'язами. Руховий апарат людини, з точки зору біомеханіки, являє собою систему біокінематичних ланцюгів, усі ланки котрого об'єднані у біокінематичні пари і мають між собою зв'язки, що визначають їх зовнішню свободу рухів.

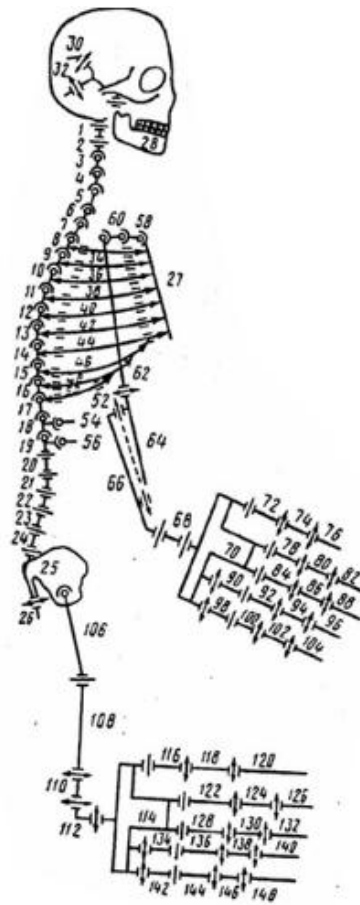


Рис. 2.1. – Структурна схема опорно-рухового апарату людини

Складовими частинами біомеханічної системи є біокінематичні ланцюги — ланцюги між багатьма частинами тіла, що рухомо з'єднані. До цих ланцюгів прикладаються сили (навантаження), які викликають деформацію і зміну рухів.

Біокінематичний ланцюг — це послідовне з'єднання ряду біокінематичних пар.

Біокінематична пара — це рухоме (кінематичне) сполучення двох кісткових механізмів, у якому можливості рухів визначаються будовою цього з'єднання і управляючим впливом м'язів. У біокінематичних парах рухового апарату людини з'єднання двох ланок здійснюються таким чином, щоб створити лише наперед задані (визначені) рухи. Це забезпечується ступенями вільності окремих ланок і

організму в цілому, що і визначає направленість руху.

Суттєвим є те, що кількість з'єднань ланок і кількість ступеней вільності живого організму набагато перевищує те, з чим має справу теорія механізмів і машин (тобто є більшою, ніж 1).

СТУПЕНІ ВІЛЬНОСТІ В БІОКІНЕМАТИЧНИХ ЛАНЦЮГАХ

Кожна біокінематична пара володіє тією чи іншою кількістю ступеней вільності, що і визначає рухові можливості організму. Взагалі, число ступеней вільності ланки відповідає кількості її незалежних переміщень (лінійних та кутових).

З курсу механіки відомо, якщо на фізичне тіло не накладається ніяких обмежень (в'язів), то воно може рухатися в напрямку усіх трьох взаємно перпендикулярних осей поступально. Тому таке тіло має 6 ступеней вільності.

Кожен зв'язок, що накладається, зменшує кількість ступеней вільності:

– зафіксувавши одну точку вільного тіла зразу відбирають у нього 3 ступені вільності (можливих лінійних переміщень відносно основних трьох координатних осей); приклад: шароподібний суглоб, у якому зменшилася кількість ступеней вільності до трьох;

– закріплення двох точок тіла відповідає фіксації його на осі, що проходить крізь ці точки – залишається одна ступінь вільності;

– закріплення трьох точок повністю відбирає у тіла можливість руху; тому таке з'єднання до суглобів не відноситься.

До суглобів з трьома ступенями вільності відносяться шароподібні суглоби, де можливі рухи у наступних напрямках: поворот; приведення і відведення у фронтальній площині; згинання та розгинання. Такими суглобами є: плечовий, тазостегновий.

До суглобів з двома ступенями вільності відносяться: колінний суглоб (який припускає згинання і розгинання, а також деякий поворот голени відносно стегна), зап'ястно-п'ястний суглоб великого пальця кисті руки і деякі інші.

Суглобами з одним ступенем вільності є плече, ліктьовий, міжфалангові суглоби пальців, сочленіння стопи з великою берцовою кісткою.

Кількість ступеней вільності кінематичного ланцюгу опорно-рухової системи людини дорівнює числу незалежних джерел енергії, необхідних для приведення у рух тієї чи іншої ланки відносно відповідної осі обертання суглобу.

Розрахунок числа ступеней вільності кінематичного ланцюгу проводиться за наступною формулою:

проводиться за наступною формулою: $N = 6n - \sum_i i P_i$, де: N – число ступеней вільності, n – кількість рухомих ланок кінематичного ланцюга, i – число обмежень ступеней вільності в з'єднаннях – суглобах, P_i – число з'єднань з i -обмеженнями, при цьому: $\sum P_i = n-1$.

Загальна кількість ступеней вільності тіла людини складає близько: $6 \cdot 144 - 5 \cdot 81 - 4 \cdot 33 - 3 \cdot 29 = 240$, але з повною достовірністю точна кількість невідома.

Число ступеней вільності, наприклад, руки, можна розрахувати за цією залежністю:

$n = 18$, $\Sigma f = 27$, $\Sigma \lambda_n(\lambda) = 35$, $P_i = 1$ (знак Σ означає суму за усіма змінними).

Для відкритого біокінематичного ланцюга отримуємо: $N = \Sigma f = 27$.

У цій залежності n характеризує число рухомих сегментів: плече, передпліччя, зап'ястя, 1-5-п'ясні кістки, проксимальні та дистальні фаланги пальців кисті, Σf – число ступенів вільності біокінематичних пар; $\Sigma \lambda_n(\lambda)$ – число сегментів, які мають λ з'єднань: плече має 2 суглоби; передпліччя, 1-5-п'ясні кістки і проксимальні фаланги пальців – також по 2. Дистальні фаланги пальців мають по 1 суглобу.

Зап'ястя має 6 суглобів (променево зап'ястний, зап'ясно-п'ясний 1-гої п'ясно-фалангові 2-5-гопальців).

У цій залежності n характеризує число рухомих сегментів: плече, передпліччя, зап'ястя, 1-5-п'ясні кістки, проксимальні та дистальні фаланги пальців кисті, Σf – число ступенів вільності біокінематичних пар; $\Sigma \lambda_n(\lambda)$ – число сегментів, які мають λ з'єднань: плече має 2 суглоби; передпліччя, 1-5-п'ясні кістки і проксимальні фаланги пальців – також по 2. Дистальні фаланги пальців мають по 1 суглобу.

Зап'ястя має 6 суглобів (променево зап'ястний, зап'ясно-п'ясний 1-гої п'ясно-фалангові 2-5-гопальців).

Найсуттєвішим є те, що майже в усіх суглобах ступеней вільності більше, ніж у механізмах (тобто більше, ніж 1). З одного боку, устрій пасивного апарату людини (кістки, суглоби) створює невизначеність руху, а з іншого м'язи (їх управляючі рухи) накладають додаткові ступені зв'язку і залишають необхідну кількість ступеней вільності. Так і забезпечується необхідна можливість рухів.

Таким чином, м'язи – це той апарат, що забезпечує управління рухами і спрямовує рух у наперед заданому напрямку. Крім того, своєрідність процесів управління рухами людини зумовлена також особливостями м'язової системи, як системи двигунів, що перемагають зайві ступені вільності.

Зрозуміло, що нервово-м'язове управління рухами, яке полягає в зменшенні цих ступенів вільності, сильно відрізняється від систем управління у техніці.

Розрізняють *замкнені та незамкнені біокінематичні ланцюги*. У незамкнених ланцюгах є остання («вільна») ланка, котра входить до складу лише однієї пари; у цих ланцюгах немає вільної кінцевої ланки, кожна ланка входить у дві пари. У незамкненому ланцюзі можливі ізольовані рухи у кожному окремо взятому суглобі. При цьому можливість ізольованого руху не виключається будовою незамкнутого ланцюга, бо рухи біокінематичних ланцюгів у рухових діях зазвичай відбуваються одночасно у багатьох суглобах.

У замкненому ланцюзі ізольовані рухи в одному суглобі неможливі, бо обов'язково при цьому у рух залучаються й інші з'єднання.

Незамкнений ланцюг може стати замкненим, якщо вільна кінцева ланка отримає зв'язок (опору, захват) з іншою ланкою ланцюга чи безпосередньо, чи через будь-яке тіло. Наприклад, вільна кінцівка (руки, ноги) являють собою незамкнений ланцюг. Дві ноги через таз є замкненим ланцюгом через опору. Постійно замкнений ланцюг: грудина-ребро-хребет-ребро-грудина. Дві ноги можуть замкнути ланцюг через опору, наприклад, у положенні випаду.

Ці взаємозв'язки у біокінематичному ланцюгу обов'язково потрібно враховувати при аналізі роботи м'язів, при оцінці їх напруженості, спроможності до скорочення. Замкнений ланцюг може розімкнутися, а через це – і змінити свої можливості (наприклад, при переході ноги зі стану випаду до звичайного стану). Постійно замкнені системи тут не розглядаються. Завдяки переходу ланцюгів із замкненого стану в незамкнений і здійснюється рух людини. Значна частина незамкнених біокінематичних ланцюгів оснащена багатосуглобними м'язами. Тому рухи в одних суглобах через такі м'язи більш чи менш пов'язані з рухами в сусідніх суглобах. Однак при точному управлінні в багатьох випадках цей взаємний зв'язок можна виключити, перебороти. В замкнених ланцюгах такий зв'язок є непереборним, і дії м'язів передаються на віддалені суглоби

Одним із способів моделювання рухового апарату є уявлення про нього як про систему взаємозв'язаних біокінематичних ланок. У реальних умовах функціонування організму усі рухомі ланки тіла мають між собою кінематичні зв'язки, котрі обмежують їх зовнішню свободу рухів. Завдяки цим зв'язкам усі біокінематичні ланки об'єднані у біокінематичні пари. У руховому апараті людини на відносний рух кожної ланки будь-якої біокінематичної пари (залежно від способу з'єднання її ланок) накладено певні обмеження. На характер вказаних обмежень впливають такі чинники, як пластичний стан тканин, що беруть участь в утворенні будь-якого сполучення, а якщо це суглоб, то ще й форма поверхні кісток, що сполучаються, наявність того чи іншого допоміжного апарату, участь у рухах певних груп м'язів та наявність різних морфологічних компонентів. Усе це для зручності дослідження можна об'єднати таким поняттям, як умови зв'язку біоланок у біокінематичних парах.

Те чи інше число умов зв'язку (**S**) обмежує рухомість кожної біоланки у парі, котре теоретично не може бути менше **1** або більше **5** у силу максимально можливих 6 ступенів свободи руху усякого незв'язаного тіла ($1 < S < 5$). Кількість ступенів свободи у будь-якій біокінематичній парі рухового апарату (**H**) визначають виходячи із залежності між числом умов зв'язку у парі (кількість обмежень - **S**) та загальними можливостями

руху у тривимірному просторі (6 – три поступальних, три обертальних): $H = 6 - S$.

Якщо враховувати, що кількість умов зворотного зв'язку біоланок теоретично можливе тільки у межах від 1 до 5, то слід було б виділити біокінематичні пари п'яти класів. Тоді з попереднього рівняння можна було б визначити число зв'язків практично будь-якої біокіне-матичної пари рухового апарату людини.

Таким чином, біокінематична пара I класу мала б п'ять ступенів свободи рухів ланок, II класу — чотири, III класу — три, IV класу — два, пара V класу мала б тільки один ступінь свободи рухів. У руховому апараті немає жодної біокінематичної пари I та II класу, на доказ чого можна констатувати, що жодна з ланок не має чотирьох, а тим більше п'яти ступенів свободи руху щодо своєї пари. Ланки біокінематичних пар мають максимум три ступеня свободи щодо своєї пари, тому при класифікації їх можна віднести до пар III класу. Такими парами є плече й лопатка, зчленовані у плечовому суглобі, та деякі інші. Біокінематичними парами IV класу слід, зокрема, вважати передпліччя та кисть, зчленовані у променевоzap'ястковому суглобі. Класифікація біокінематичних пар за класами передбачає також урахування усіх рухів тіла, що спричиняє необхідність більш дрібного поділу у кожній парі. Зважаючи на те, що пар I та II класу в руховому апараті людини не виявлено, розглянемо можливі відмінності біокінематичних пар III, IV та V класів (рис. 2.2).

Усі можливі одночасні рухи в біопарах III класу теоретично можна поділити на чотири види: перший — виконання трьох обертальних рухів, другий — два обертальних і один поступальний, третій — один обертальний та два поступальних, четвертий — три поступальних рухи. За даними біомеханічних досліджень, серед біокінематичних пар III класу у людини є пари тільки першого виду, оскільки в усіх зчленуваннях з парами цього класу за звичайних умов можливі тільки три обертальних рухи.

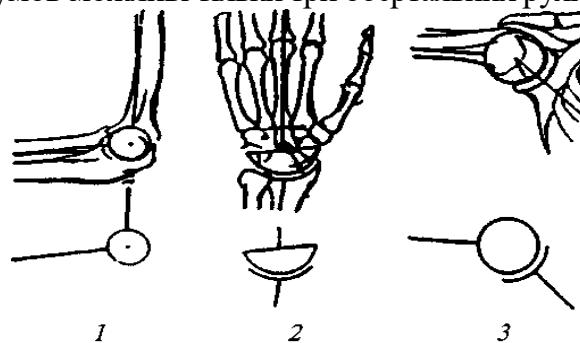


Рис. 2.2. - Графічне зображення біокінематичних пар:

1—V клас (ліктьовий суглоб);

2—IV клас (суглоб кисті);

3—III клас (плечовий суглоб).

Усі можливі одночасні рухи в біопарах IV класу також можна поділити на три види. У парах першого виду цього класу можливі тільки два обертальних рухи, другого — один обертальний та один поступальний і третього виду — два поступальних рухи ланок.

У руховому апараті людини за звичайних умов серед пар четвертого класу зустрічаються пари тільки першого виду.

Усі можливі одночасні рухи в біопарах V класу теоретично можуть бути усього двох видів. Перший вид має один обертальний рух, другий — один поступальний рух. У біокінематичних парах V класу у людини зустрічаються переважно пари першого виду, хоча за певних умов можна припустити наявність пари і другого виду. Щодо пар VI класу можна припустити відсутність можливих рухів в них.

Згідно з наведеними даними, біокінематичні пари опорно-рухового апарату структурно і функціонально об'єднані у біокінематичні ланцюги. Цей принцип організації у руховому відношенні видається надзвичайно вигідним та раціональним.

Біокінематичним ланцюгом слід вважати зв'язані між собою біокінематичні пари з урахуванням їх природного місця в опорно-руховому апараті та біологічної ролі, що філогенетичне склалася, в організмі людини. Морфологічно ці ланцюги визначаються як прості або складні залежно від того, кільком парам належать їх ланки. У простому біокінематичному ланцюгу кожна ланка є елементом не більше двох пар; складний ланцюг може включати біоланки, що входять у три і більше кінематичні пари.

Прості та складні рухомі ланцюги можуть бути також замкненими й незамкненими. До замкнених біокінематичних ланцюгів належать біоланки, що входять не менше ніж у дві біокінематичні пари. Незамкнені біокінематичні ланцюги містять біоланки, що входять тільки в одну рухову пару.

Число ступенів свободи руху біокінематичних ланцюгів опорно-рухового апарату людини (H) відповідно до урахування числа пар I класу (B_1), II класу (B_2), III класу (B_3), IV класу (B_4), V класу (B_5) та VI класу (B_6). З усіх можливих ступенів свободи ланок біокінематичного ланцюга, що розглядається, виключаються ступені свободи, що обумовлені наявністю відповідного числа умов зв'язку. У такому випадку число ступенів свободи (H), котрі має даний ланцюг, буде складати:

$$H = 6k - 5B_5 - 4B_4 - 3B_3;$$

де: k — кількість пар у ланцюгу; 5, 4, 3 коефіцієнти, на котрі слід помножити кількість пар відповідного класу, що є у ланцюгу, який розглядається.

Назва біокінематичного ланцюга складається з аббревіатури ВКС (*bios, kinesis, catena*, — ланцюг, що біологічно рухається), індексу, котрий позначається латинською літерою p (*part*— частина) та початкової літери латинської назви частини тіла або скелета: голови, тулуба (хребетний стовп, грудна клітка), пояса верхніх кінцівок (плечовий), вільних верхніх кінцівок, пояса нижніх кінцівок (таз) та нижніх кінцівок. Наприклад, біокінематичний ланцюг вільної верхньої кінцівки записується: В К С _{pms} (**ms** — *membrum superius*— верхня кінцівка).

У принципі все тіло людини залежно від мети дослідження, можна розглядати як єдиний біокінематичний ланцюг: ВКС _{shs}, де індекс складається з перших літер слів *soma* (тіло), *homo sapiens* (людина розумна). Якщо треба позначити біокінематичний ланцюг, що складається не з усіх ланок частини тіла, то індекс утворюють від назв відповідних кісткових утворень або відділів. Наприклад, біокінематичний ланцюг грудного відділу хребта слід записати так: ВКС_{tcv} де t — *thoracalis* (грудний), cv — *columna vertebralis* (хребетний стовп). У записях біокінематичних пар у аббревіатурі ВКС останню літеру замінюють на P . Для того щоб показати, до якого ланцюга належить пара, при аббревіатурі зберігають індекс відповідного ланцюга (наприклад, ВКР_{cv} — пара хребетного стовпа). У даному випадку, однак, неможна встановити, яка це пара, тому слід повідомити також її порядковий номер, починаючи від проксимального кінця хребетного стовпа ВКР_{c-10} (або ВКР_{cv-10}). Для стислості біокінематичні ланки (ВКС) називають за першими літерами латинських анатомічних назв кісток. Якщо дві ланки мають однакову назву, наприклад хребці (*vertebra*) у хребетному стовпі, то їх називають від проксимального кінця ланцюга.

Класифікацію доцільно починати з розгляду біоланок голови. Скелет голови — череп, складається з численних кісткових утворень, але значні рухи можливі

тільки у скронево-нижньощелеповому суглобі.

Він утворює біокінематичну пару $ВКР_{c-1}$, що складається з мозкового та частини лицьового черепа (одна біоланка) і нижньої щелепи (друга біоланка). Морфологічно та функціонально біоланка голови зв'язана з хребетним стовпом (рухи голови відбуваються у зчленуваннях з хребетним стовпом, головний та спинний мозок нерозривно зв'язані у цілісну центральну нервову систему), тому часто біоланки голови не класифікують як окремі ланцюги, а розглядають як біопару біокінематичного ланцюга хребетного стовпа.

Хребетний стовп являє собою складний багатоланковий ланцюг ($ВКС_{cv-1}$), утворений атланта-потиличним зчленуванням, що об'єднує ланку черепа та першого шийного хребця. Таким чином можна визначити назви усіх біокінематичних пар $ВКС_{cv}$: $C-1$ - власна пара черепа; $cv-1$ - пара, утворена біоланкою черепа та 1-м хребцем; $cv-2$ - пара 1-го та 2-го хребців і т.д. Остання, 26-та, пара ($cv-26$) включає біоланки крижів та куприка.

Оскільки різноманітні рухи хребетного стовпа автономні, то доцільно у його загальному біокінематичному ланцюгу виділити ще три ланцюги, визначені наявністю трьох рухомих відділів — шийного, грудного та поперекового: $СVC$ — біокінематичний ланцюг шийного відділу; CVT — біокінематичний ланцюг грудного відділу; CVL — біокінематичний ланцюг попереково-крижово-куприкового відділу.

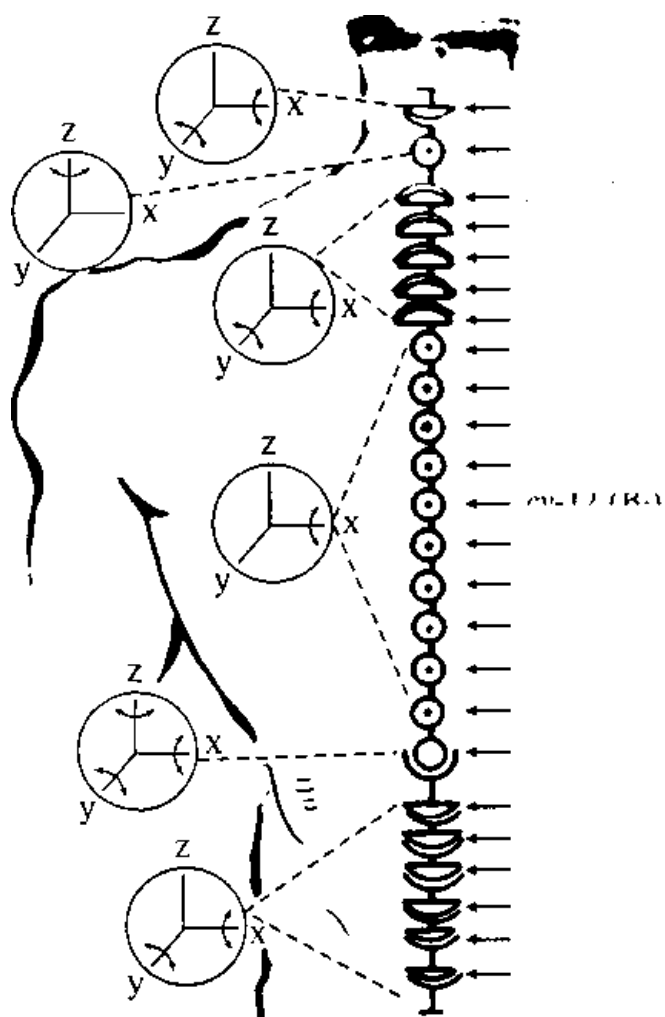


Рис. 2.3. – Біокінематичні пари хребетного стовпа

Грудна клітка складається з численних кісткових утворень складної форми, що володіють різноманітними ступенями рухомості. Але й вона може бути представлена як єдиний біокінематичний ланцюг $ВКС_{th}$. Грудні хребці відносяться як до біокінематичного ланцюга хребетного стовпа, так і до біокінематичного ланцюга грудної клітки. З'єднання $ВКС_{cv}$ та $ВКС_{th}$ здійснюються у місці зчленування ребер та хребців. Тому за дійсною біомеханічною номенклатурою ці утворення позначають як з'єднання двох відносно рухомих ланцюгів, а самі зчленування для більш детального вивчення рухів розглядають окремо при спостереженнях за переміщенням ребер та груднини. По суті, такий поділ не являє собою розчленування цілісної ділянки, а тільки полегшує її вивчення за порівняно простими частинами.

Чотири нижніх вільних ребра практично можуть переміщуватися

незалежно від інших біоланок грудної клітки. Цей факт, а також те, що дані ребра з хребцями з'єднані рухомо, дозволяє іноді розглядати їх як самостійні біоланки, що зв'язані лише з хребетним стовпом.

Згідно з біомеханічною класифікацією, у біокінематичному ланцюгу грудної клітки є 40 основних біокінематичних пар та 4 додаткових. Оскільки кожне ребро з'єднується з грудниною своєю грудною частиною, а з хребцями — хребцевою, то воно фактично утворює дві пари (одну — з хребцем, другу — з грудниною). Зважаючи на це до назв усіх пар замість порядкових цифр додали індекси "a" (anterior — передній) та "p" (posterior — задній), "s" (sinister — лівий) та "d" (dexter — правий). Таким чином, перші чотири біокінематичні пари грудної клітки позначають відповідно thda-1, thdp-1, thsp-1, thsa-1; другі - thsp-2, thsa-2, thdp-2, thda-2; треті - thda-3, thdp-3, thsa-3, thsp-3; четверті - thda-4, thdp-4, thsa-4, thsp-4; п'яті - thda-5, thdp-5, thsa-5, thsp-5; шості - thda-6, thdp-6, thsa-6, thsp-6; сьомі - thda-7, thdp-7, thsa-7, thsp-7; восьмі - thda-8, thdp-8, thsa-8, thsp-8; дев'яті - thda-9, thdp-9, thsa-9, thsp-9; десяти - thda-10, thdp-10, thsa-10, thsp-10. Чотири додаткові біокінематичні пари позначають thdp-11, thsp-11, thdp-12, thsp-12.

Біокінематичний ланцюг пояса верхніх кінцівок ВКС_{pms} (ms — membrum superius — верхня кінцівка) складається з чотирьох біокінематичних пар (мал.7), що рухомо з'єднують груднину, ключицю та лопатки: cmss-1 - ліва пара (груднина та ліва ключиця); cmss - 2 - ліва пара (ліва ключиця та ліва лопатка); cmsd - 1 - права пара (права ключиця та груднина); cmsd - 2 - права пара (права ключиця та права лопатка).

Біокінематичні ланцюги правої та лівої верхніх кінцівок з'єднуються з біокінематичним ланцюгом пояса верхніх кінцівок своїми першими парами (mss-1 та msd-1). Праву та ліву другі пари будуть складати плечова та ліктьова кістки, з'єднані плечоліктьовим суглобом (mss - 2 та msd - 2).

Треті пари утворені плечовими та променевими кістками, зчленованими плечопроневими суглобами (mss - 3 та msd - 3).

Четверті пари складаються з проксимальних кінців променевої та ліктьової кісток, об'єднаних у променеліктьовий суглоб (mss-4 та msd-4).

П'яті біокінематичні пари (mss - 5 та msd - 5) складені дистальними кінцями ліктьової та променевої кісток у дистальному променеліктьовому суглобі.

Шоста пара утворена дистальною частиною ліктьової кістки та латеральною частиною проксимальної поверхні півмісяцевої кістки (mss - 6). Сьома пара включає дистальну частину променевої кістки та латеральну частину півмісяцевої (mss - 7). Восьма пара складається з дистальної частини променевої кістки та проксимальної частини човноподібної кістки (mss - 8).

Дев'ята пара утворена горохоподібною кісткою та медіальною частиною тригранної кістки (mss - 9). Десята пара утворена латеральною частиною тригранної кістки та медіальною частиною півмісяцевої (mss -10). Одинадцята пара складається з дистальної частини тригранної кістки та проксимальної частини гачкоподібної кістки (mss -11). Дванадцята пара утворена латеральною частиною гачкоподібної кістки та медіальною частиною головчастої кістки (mss -12). Тринадцята пара утворена діальною поверхнею проксимальної частини головчастої кістки та дистальною частиною півмісяцевої (mss -13). Чотирнадцята пара включає латеральну поверхню дистальної частини човноподібної кістки (mss -14). П'ятнадцята пара складається з латеральної частини головчастої кістки та медіальної частини малої багатокутної кістки (mss - 15). Шістнадцята пара складається з проксимальної частини

малої багатокутової кістки та латеральної поверхні дистальної частини човноподібної кістки (mss -16). Сімнадцята пара утворена латеральною частиною малої багатокутної кістки та верхньою медіальною гранню великої багатокутної кістки (mss - 17). Вісімнадцята пара включає проксимальну частину великої багатокутової кістки та латеральну поверхню дистальної частини човноподібної кістки (mss - 18). Дев'ятнадцята пара утворена медіальною поверхнею дистальної частини гачкоподібної кістки та проксимальною частиною п'ятої п'ясткової кістки (mss - 19). Двадцята пара складається з проксимальних частин п'ятої та четвертої п'ясткових кісток (mss - 20). Двадцять перша пара утворена медіальною поверхнею проксимальної частини четвертої п'ясткової кістки та латеральною поверхнею дистальної частини гачкоподібної кістки (mss - 21). Двадцять друга пара складається з латеральної поверхні проксимальної частини четвертої п'ясткової кістки та матеріальної частини дистальної поверхні головчастої кістки (mss - 22). Двадцять третя пара включає латеральну суглобову поверхню проксимальної частини четвертої п'ясткової кістки та медіальну поверхню проксимальної частини третьої п'ясткової кістки (mss - 23). Двадцять четверта пара складається з проксимальної частини третьої п'ясткової кістки та дистальної частини головчастої кістки (mss - 24). Двадцять п'ята пара утворена латеральною суглобовою поверхнею третьої п'ясткової кістки та медіальною суглобовою поверхнею проксимальної частини другої п'ясткової кістки (mss - 25). Двадцять шоста пара складається з латеральної поверхні дистальної частини головчастої кістки та медіальної суглобової поверхні проксимальної частини третьої п'ясткової кістки (mss - 26). Двадцять сьома пара включає дистальну поверхню малої багатокутової кістки та середню ділянку проксимальної поверхні другої п'ясткової кістки (mss - 27). Двадцять восьма пара утворена латеральною суглобовою поверхнею проксимальної частини другої п'ясткової кістки та дистально-медіальною поверхнею великої багатокутової кістки (mss - 28). Двадцять дев'ята пара складається з проксимальної частини першої п'ясткової кістки та дистальної частини великої багатокутної кістки (mss - 29). Тридцята пара складається з проксимальної частини першої фаланги п'ятого пальця та дистальної частини п'ятої п'ясткової кістки (mss -30). Тридцять перша пара утворюється проксимальною частиною першої фаланги четвертого пальця та дистальною частиною четвертої п'ясткової кістки (mss - 31). Тридцять друга пара включає дистальну частину третьої п'ясткової кістки та проксимальну частину першої фаланги третього пальця (mss - 32). Тридцять третя пара складається з дистальної частини другої п'ясткової кістки та проксимальної частини першої фаланги другого пальця (mss - 33). Тридцять четверта пара утворена дистальною частиною першої п'ясткової кістки та проксимальною частиною першої фаланги першого пальця (mss - 34). Тридцять п'ята пара утворена дистальною частиною першої фаланги п'ятого пальця та проксимальною частиною його другої фаланги (mss - 35). Тридцять шоста пара включає дистальну частину першої фаланги четвертого пальця та проксимальну частину його другої фаланги (mss - 36). Тридцять сьома пара складається з дистальної частини першої фаланги третього пальця та проксимальної частини його другої фаланги (mss - 37). Тридцять восьма пара включає дистальну частину першої фаланги другого пальця та проксимальну частину його другої фаланги (mss - 38). Тридцять дев'ята пара утворена дистальною частиною першої фаланги першого пальця та проксимальною частиною його другої фаланги (mss - 39). Сорокова пара складається з дистальної частини другої фаланги п'ятого пальця та проксимальної частини його третьої фаланги (mss - 40). Сорок перша пара складається з дистальної частини другої фаланги четвертого пальця та проксимальної частини його третьої фаланги (mss -41). Сорок друга пара включає

дистальну частину другої фаланги третього пальця та проксимальну частину його третьої фаланги (mss - 42). Сороч третя пара утворена дистальною частиною другої фаланги другого пальця та його третьою фалангою (mss - 43).

Обидві (права й ліва) верхні кінцівки людини мають загалом 86 біокінематичних пар, об'єднаних функціонально та морфологічно у біокінематичні ланцюги вільних верхніх кінцівок. Природно, що у процесі вивчення найрізноманітніших рухів можуть виникнути такі умови, за котрих найбільш зручно розглядати інші варіанти біокінематичних ланцюгів. Зокрема, такими ланцюгами можуть бути з'єднання пар тільки кисті, передпліччя тощо. Разом з тим запропоновані поділи кінцівок на відповідні біокінематичні пари завжди будуть основними елементами кінематичної структури усіх можливих ланцюгів та біокінематичних механізмів, утворених за участю вільних верхніх кінцівок.

Біокінематичний ланцюг поясу нижніх кінцівок — тазу ($ВКС_p$) складається з трьох біокінематичних пар. Перша пара ($p - 1$) утворена лобковими частинами правої та лівої тазових кісток, хоча тут має місце зрощення з деякою відносною рухомістю. Друга біокінематична пара тазу ($p - 2$) утворена крижовою частиною правої клубової кістки та крижами, третя пара ($p - 3$) включає крижову частину лівої клубової кістки та крижі (мал.8).

Біокінематичні ланцюги правої та лівої нижніх кінцівок $ВКС_{mi}$ (mi — *metgum inperius* — нижня кінцівка) з'єднуються з ланцюгом пояса нижніх кінцівок своїми першими парами - $mis - 1$ та $mid - 1$

Друга біокінематична пара $ВКС_{mis-2}$ утворена дистальною частиною стегнової кістки та проксимальною частиною великогомілкової. Третя пара ($mis - 3$) утворена передньою поверхнею дистальної частини стегнової кістки та задньою (проксимальною) частиною надколінної чашечки. Четверта пара ($mis-4$) утворена дистальною частиною задньої поверхні надколінної чашечки та поверхнею проксимальної частини великогомілкової кістки. П'ята пара ($mis - 5$) включає медіальну поверхню проксимальної частини великогомілкової кістки та латеральну поверхню проксимальної частини малогомілкової кістки.

Шоста пара (mis- 6) включає медіальну поверхню дистальної частини великогомілкової кістки та латеральну поверхню дистальної частини малогомілкової кістки. Сьома пара (mis-7) утворена дистальною частиною великогомілкової кістки та проксимальною частиною таранної кістки. Восьма пара (mi-8) утворена медіальною поверхнею дистальної частини малогомілкової кістки та латеральною поверхнею проксимальної частини таранної кістки. Дев'ята пара (mis-9) утворена дистальною частиною таранної кістки та проксимальною частиною п'яткової кістки. Десята пара (mi-10) включає передню частину таранної кістки та задню частину човноподібної кістки. Одинадцята пара (mis-11) містить передню частину п'яткової кістки та задню частину кубоподібної кістки. Дванадцята пара (mis-12) утворена передньою частиною човноподібної кістки та проксимальною частиною латеральної клиноподібної кістки. Тринадцята пара (mis-13) утворена латеральною частиною клиноподібної кістки та медіальною частиною кубоподібної кістки. Чотирнадцята пара (mis-14) утворена медіальною частиною латеральної клиноподібної (першої) кістки та латеральною частиною внутрішньої клиноподібної (другої) кістки. П'ятнадцята пара (mis-15) включає дистальну (передню) поверхню човноподібної кістки та проксимальну частину внутрішньої (другої) клиноподібної кістки.

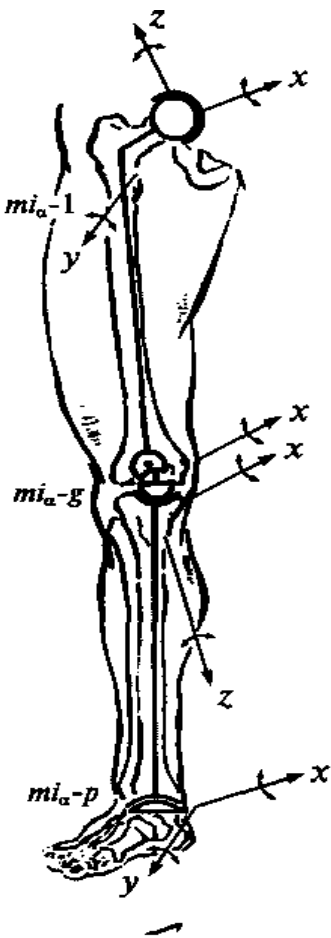


Рис. 2.4 -. Біокінематичний ланцюг нижньої кінцівки

Шістнадцята пара (mis-16) утворена медіальною частиною внутрішньої (другої) клиноподібної кістки та латеральною частиною медіальної (першої) клиноподібної кістки. Сімнадцята пара (mis-17) складається з медіальної частини дистальної поверхні човноподібної кістки та проксимальної частини медіальної (першої) клиноподібної кістки. Вісімнадцята пара (mis-18) включає латеральну поверхню дистальної частини кубоподібної кістки та проксимально-медіальну частину плеснової кістки. Дев'ятнадцята пара (mis-19) включає медіальну поверхню проксимальної частини п'ятої плеснової кістки та латеральну поверхню проксимальної частини четвертої плеснової кістки. Двадцята пара (mis-20) утворена медіальною поверхнею дистальної частини кубоподібної кістки та проксимальною частиною четвертої плеснової кістки. Двадцять перша пара (mis-21) утворена медіальною поверхнею проксимальної частини четвертої плеснової кістки та латеральною поверхнею проксимальної частини третьої плеснової кістки. Двадцять друга пара (mis-22) утворена дистальною частиною латеральної (третьої) клиноподібної кістки та проксимальною частиною третьої плеснової кістки. Двадцять третя пара (mis-23) утворена медіальною поверхнею проксимальної частини третьої плеснової кістки та латеральною поверхнею другої плеснової кістки. Двадцять четверта пара (mis-24) утворена дистальною частиною медіальної поверхні латеральної (третьої) клиноподібної кістки та проксимальною частиною латеральної поверхні другої плеснової кістки. Двадцять п'ята пара (mis-25) включає дистальну частину середньої (другої)

клиноподібної кістки та проксимальну частину другої плеснової кістки. Двадцять шоста пара (mis-26) складається з дистальної частини латеральної поверхні медіальної (першої) клиноподібної кістки та медіальної поверхні проксимальної частини другої плеснової кістки. Двадцять сьома пара (mis-27) включає дистальну частину медіальної (першої) клиноподібної кістки та проксимальну частину першої плеснової кістки. Двадцять восьма пара (mis-28) утворена дистальною частиною п'ятої плеснової кістки та проксимальною частиною першої фаланги п'ятого пальця. Двадцять дев'ята пара (mis-29) утворена дистальною частиною четвертої плеснової кістки та проксимальною частиною першої фаланги четвертого пальця. Тридцять пара (mis-30) включає дистальну частину третьої плеснової кістки та проксимальну частину першої фаланги третього пальця. Тридцять перша пара (mis-31) складається з дистальної частини другої плеснової кістки та проксимальної частини першої фаланги другого пальця. Тридцять друга пара (mis-32) включає дистальну частину першої плеснової кістки та проксимальну частину першої фаланги першого пальця. Тридцять третя пара (mis -33) утворена дистальною частиною першої фаланги п'ятого пальця та проксимальною частиною його другої фаланги. Тридцять четверта пара (mis -34) включає дистальну частину першої фаланги четвертого пальця та проксимальну частину його другої фаланги. Тридцять п'яту пару (mis -35) складають дистальна частина першої фаланги третього пальця та проксимальна частина його другої фаланги. Тридцять шоста пара (mis -36) складається з дистальної частини першої фаланги другого пальця та проксимальної частини його другої фаланги. Тридцять сьома пара (mis -37) утворена дистальною частиною першої фаланги першого пальця та його другою фалангою. Тридцять восьма пара (mis -38) утворена дистальною частиною другої фаланги п'ятого пальця та його третьою фалангою. Тридцять дев'ята пара (mis -39) утворена дистальною частиною другої фаланги четвертого пальця та його третьою фалангою. Сорокова пара (mis -40) складається з дистальної частини другої фаланги третього пальця та його третьої фаланги. Сорок перша пара (mis -41) утворена дистальною частиною другої фаланги другого пальця та його третьою фалангою. Таким чином, враховуючи парність нижніх кінцівок, у системі їхніх біокінематичних ланцюгів можна встановити 82 пари, котрі, як і у верхніх кінцівках, можуть брати участь у найрізноманітніших механізмах та утворювати численні ланцюги.

Загальне число пар у верхніх та нижніх кінцівках не дуже відрізняється (відповідно 86 та 82), а в усьому єдиному біокінетичному ланцюгу ВКС_{shs} їх 246 (в біопарах VI класу, які утворені плоскими суглобами - **V₆**, рухів майже немає ($H = 6 - 6 = 0$); вони з'являються при наднавантаженнях, травмах, вадах і не відіграють суттєвої ролі у рухах й тому не включені до даної біомеханічної класифікації).

Для здійснення більшості довільних ізольованих рухів організм не використовує повністю свої рухові можливості. Більше того, для виконання висококоординованих фізичних вправ спортсмену необхідно подолати так звані надмірні ступені свободи руху тих або інших біо-ланок тіла. З цих позицій усякий біокінематичний ланцюг опорно-рухового апарату за певних кінематичних умов (коли початковий рух однієї або кількох біоланок викликає рухи інших, що однозначно визначаються) слід розглядати як специфічний локомоторний біомеханізм. Це відбувається кожний раз, коли аналітико-синтетична діяльність нервової системи спрямована на розв'язання певних рухових завдань (ходьба, біг, стрибки, удар по м'ячу у футболі, удар у боксі, складні гімнастичні комбінації тощо). На відміну від технічних, постійних механізмів, в опорно-руховому апараті можуть виникати найрізноманітніші рухові механізми з переміщеннями біоланок, що однозначно визначаються. Так, біомеханічні ланцюги верхніх кінцівок можуть бути використані людиною у локомоторних механізмах, спортивній, трудовій та військовій практиці. Будова

апарату рухів та висока рухова активність людини призвели до того, що вона навчилася "створювати" зі своїх біокінематичних пар та ланцюгів величезну кількість локомоторних біомеханізмів, необхідних для життєдіяльності, праці, спорту тощо.

Аналізуючи ті чи інші рухові дії людини за біомеханічною схемою, необхідно у викладеній послідовності розглянути усі можливі якості біоланок, біопар, біоланцюгів та цілих рухових біомеханізмів.

Біоланки голови. Скелет голови – череп – складається з багатьох кісткових утворень, але значні переміщення можливі тільки в скронь-нижньощелеповому суглобі. Він утворює біокінематичну пару BKP_{c-1} , яка складається з мозкового і частини лицевого черепа (одна біоланка) і нижньої щелепи (друга біоланка).

Хребтовий стовп – це багатоланковий біокінематичний ланцюг (BKS_{cv}), який складається з 26 пар (зокрема BKP_{cv-1} , що утворена ланкою черепа і першим шийним хребцем – атлантопотиличне з'єднання). Остання пара ($cv-26$) містить біоланки хрестця і копчика.

Крім цього, у загальному біокінематичному ланцюзі хребтового стовпа виділяють три автономно рухомі відділи – шийний (cvc), грудний (cvt) і поперековий (cvl).

Грудна клітка складається з багатьох кісткових утворень складної форми, які мають різні ступені вільності. Грудна клітка утворює єдиний біокінематичний ланцюг BKS_{th} (*thoracalis* – грудний). Грудні хребці належать як до біокінематичного ланцюга хребтового стовпа, так і до біокінематичної ланки грудної клітки.

Згідно із біомеханічною класифікацією, в біокінематичному ланцюзі грудної клітки є 40 основних біокінематичних пар і 4 додаткові. Кожне ребро при цьому утворює 2 пари. Тому замість порядкових цифр номери пари в позначення додають букви "a" (*anterior* – передній) і "p"

(*posterior* – задній). Оскільки ребра є парними утвореннями, тому додатково введені позначення "s" (*sinister* – лівий) і "d" (*dexter* – правий). Отже, біокинематичні пари грудної клітки позначають відповідно th_{dp-1} , th_{dp-1} , th_{sp-1} , th_{sp-1} тощо. Чотири додаткові біокинематичні пари позначають: th_{dp-11} , th_{sp-11} , th_{dp-12} , th_{sp-12} .

Пояс верхніх кінцівок (BKC_{cms}) складається з чотирьох біокинематичних пар, які рухомо з'єднують грудну кістку, ключиці і лопатки:

cms_s-1 – ліва пара (грудна кістка і ліва ключиця)

cms_s-2 – ліва пара (ліва ключиця і ліва лопатка)

cms_d-1 – права пара (права ключиця і грудна кістка)

cms_d-2 – права пара (права ключиця і права лопатка).

Біокинематичні ланцюги правої і лівої верхніх кінцівок з'єднуються з ланцюгом пояса верхніх кінцівок своїми першими парами (ms_s-1 і ms_d-1). Праву і ліву другі пари становлять плечова і ліктьова кістки (ms_s-2 і ms_d-2). Треті пари, утворені плечопроменевими кістками, з'єднані плечопроменевими суглобами. Четверті пари складаються з **проксимальних*** кінців променевої і ліктьової кістки, які об'єднані у променеліктьові суглоби (ms_s-4 і ms_d-4). П'яті пари ms_s-5 і ms_d-5 складені **дистальними**** кінцями ліктьової і променевої кісток у дистальному променеліктьовому суглобі.

Променезап'ястковий суглоб має 3 пари (від $ms-6$ до $ms-8$), кисть складається з 34 пар (від $ms-9$ до $ms-43$).

В цілому одна верхня кінцівка має 43 біокинематичні пари. При розгляді різноманітних рухів зручно розглядати біокинематичні ланцюги у відповідних варіантах.

Біокинематичний ланцюг пояса нижніх кінцівок – тазу (BKC_p) складається з трьох пар:

- перша пара (P-1) – з'єднання лонних частин (правої і лівої) тазової кістки;
- друга пара (P-2) – хрестець – права клубова кістка;
- третя пара (P-3) – хрестець – ліва клубова кістка.

* **Проксимальний** (*proximus*) – ближній.

** **Дистальний** (*distalis*) – віддалений.

Біокінематичні ланцюги правої і лівої нижніх кінцівок (ВКС_{ни}),
з'єднані з ланцюгом пояса нижніх кінцівок своїми першими парами mi_r-1 і mi_l-1 .

Кістки стегна і гомілки утворюють 5 біокінематичних пар (від $mi-2$ до $mi-6$), передплюсна і плюсна складається із 21 пари (від $mi-7$ до $mi-27$), фаланги пальців стопи з'єднані за допомогою 14 пар (від $mi-28$ до $mi-41$).

Всього нижня кінцівка має 41 біокінематичну пару, які беруть участь у русі. Повний біокінематичний ланцюг людини нараховує (ВКС_{обс}) 246 пар.

Відносні рухи кожної ланки залежать від способу з'єднання і пластичного стану тканин, які беруть у ньому участь. Все це об'єднується поняттям "умов зв'язку" біоланок у кінематичних парах. Кількість умов зв'язку (s) обмежує рухомість кожної ланки в парі, яка теоретично не може бути меншою за 1 і більшою, ніж 5 ($1 \leq s \leq 5$). Практично біоланки рухового апарату людини відносно своєї пари мають від 1 до 3 ступенів вільності. Щоб визначити кількість ступенів вільності (H) у біокінематичній парі, від максимально можливих рухів в тривимірному просторі віднімають кількість умов зв'язку в парі ($H=6-s$).

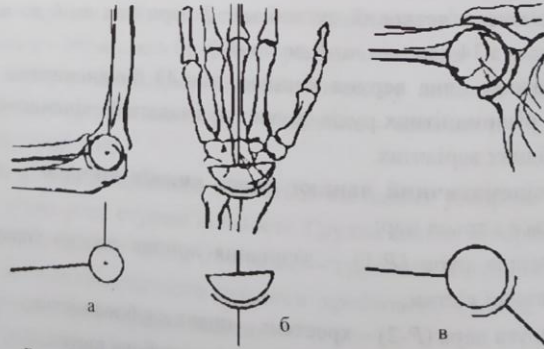


Рис.6.1. Графічне зображення біокінематичних пар:
а – V класу (ліктьовий суглоб); б – IV класу (суглоб кисті);
в – III класу (плечовий суглоб).

Залежно від кількості умов зв'язку (рис 6.1) біопари поділяються на класи (III, IV і V).

Тоді рівняння для визначення H будуть мати вигляд:

$$H = 6 - s = 6 - 3 = 3 \text{ – для біопар III класу;}$$

$$H = 6 - s = 6 - 4 = 2 \text{ – для біопар IV класу;}$$

$$H = 6 - s = 6 - 5 = 1 \text{ – для біопар V класу.}$$

Для визначення кількості ступенів вільності біокінематичного ланцюга від максимально можливої величини ступеня вільності віднімається кількість умов зв'язку:

$$H = 6K - 5B_5 - 4B_4 - 3B_3, \quad (6.1)$$

де K – кількість біокінематичних пар у ланцюзі; B_5 , B_4 і B_3 – кількість біокінематичних пар п'ятого, четвертого і третього класу, відповідно.

При розрахунку кількості ступенів вільності біокінематичного ланцюга відносно нерухої ланки вводиться ще одна характеристика – кількість ступенів рухомості (P)

$$P = H - 6.$$

Тоді розгорнута структурна формула біокінематичного ланцюга опорно-рухового апарату людини буде мати вигляд:

$$P = 6(K-1) - 5B_5 - 4B_4 - 3B_3.$$

Якщо прийняти, що $(K-1)=n$ – кількість рухомих біоланок, то рівняння буде мати вигляд:

$$P = 6n - 5B_5 - 4B_4 - 3B_3.$$

Будова опорно-рухового апарату людини і висока рухова активність привели до того, що вона навчилася "створювати" з своїх біокінематичних пар велику кількість локомоторних біомеханізмів, які необхідні для життєдіяльності, праці, спорту тощо.