

ГЛАВА 1

ВСТУП ДО БІОФІЗИКИ І БІОМЕХАНІКИ

«Людина є, зазвичай, машиною, яка, як і будь-яка інша в природі, підпорядковується неминучим і єдиним для усієї природи законам; але тією системою ..., яка в найвищому рівні є самостійно організованою, самостійно підтримуючою і, навіть, такою, що самостійно організується...»

І. П. Павлов

§ 1.1. ПРЕДМЕТ, МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ, ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ БІОФІЗИКИ

«Біофізика характерна лише її притаманним фізичним підходом до вивчення широкого кола життєвих явищ...»

Г. М. Франк

Біологічна фізика – це наука, що вивчає фізичні і фізико-хімічні закономірності в життєдіяльності рослинних і тваринних організмів, системну організацію процесів життєдіяльності на усіх рівнях організації живого (клітина, тканина, органи, організми, біосфера), а також механізм дії фізичних факторів на організми.

Теоретична будова і моделі біофізики засновані на фізичних поняттях енергії, сили, типів взаємодії, на загальних поняттях фізичної кінетики, термодинаміки. Ці поняття відображають природу основних взаємодій і законів руху тіл, що, як відомо, складає предмет фундаментальної природничої науки – фізики. В центрі уваги біофізики лежать *біологічні процеси* і явища. Біофізика вивчає фізичну основу процесів, які відбуваються у біологічних системах.

Біологічною системою є сукупність живих організмів, окремий живий організм і будь-яка його частина, наприклад, орган, тканина, сукупність клітин, окрема клітина, частина клітини, метаболіти, ферменти, рецептори, які взаємодіють і взаємоперетворюються у складі живого організму. Частина біологічної системи може мати самостійну назву, залежно від того, предметом якої науки є ця частина. Існують фізіологічні системи, біохімічні системи та інші, за назвою відповідних

розділів біології (*Life science*). Таким чином, біофізика вивчає механізми діяльності і працездатності біологічної системи на будь-якому рівні її організації (від окремих його частин, окремих клітин – до складного багатоклітинного організму). *Об'єктом* вивчення біофізики є біологічна система будь-якого рівня її організації, а *предметом* – фізичне обґрунтування процесів, які відбуваються у біологічних системах.

Незважаючи на складність і взаємозв'язок різних процесів в організмі людини, часто серед них можна виділити такі, які є близькими до фізичних. Наприклад, такий складний фізіологічний процес, як кровообіг, за своєю природою є фізичним, бо пов'язаний з течією рідини (*гідродинаміка*), розповсюдженням великих коливань за судинами (*коливання і хвилі*) та механічною роботою серця (*механіка*), генерацією біопотенціалів (*електрика*) тощо. Дихання пов'язане з рухом газу (*аеродинаміка*), тепловіддачею (*термодинаміка*), випаровуванням (*фазові перебудови*) тощо. Дослідження фізики таких мікропроцесів необхідно для правильної оцінки стану організму, природи деяких захворювань, дії ліків, призначення правильного курсу лікування тощо. Цим і займається наука біофізика.

Крім того, будь-який прояв життєдіяльності, будь-яка функція клітин потребує енергії. Енергія потрібна для біосинтетичних реакцій і різних форм клітинної активності, а будь-яка діяльність клітин завжди співпадає у часі з розпадом аденозинтрифосфорної кислоти (АТФ). При підсиленій, але короткочасній роботі, наприклад, при виконанні бігу на коротку дистанцію, м'яз працює майже виключно за рахунок АТФ, яка є у цьому м'язі, тому окремо у біофізиці розглядаються питання перетворення енергії у біологічних системах. Розділ біофізики, який займається перетворенням енергії у біологічних системах, має назву *біоенергетика*.

Розвиток і становлення біофізики як науки, що стоїть на межі біології, фізики, хімії, математики, відбувався за декількома стадіями. Спочатку біофізика розвивалась як частина фізіології. У XVIII столітті **М. В. Ломоносов**, згідно з уявленнями про хімічний зв'язок подразнюючих молекул матерії з молекулярними й ефірними структурами нервів, описав механізм подразнень у чутливих нервах та поширення збудження у нервах. Він також пояснив як виникає відчуття смаку і нюху. Суттєвий внесок у XVIII столітті мали результати досліджень фізика **Юнга Томаса** (1773-1829), який пояснив явище акомодатії ока зміною кривизни кришталіка, першим пояснив явище інтерференції світла, розробив теорію кольорового зору, дослідив деформацію тіл. Італійський фізіолог **Л. Гальвані** (1791) поклав початок електробиології, довівши, що в живих тканинах є електрика.

Основний розвиток біофізики пов'язаний з усвідомленням необхідності принципового застосування в галузі біології основних законів фізики, як фундаментальної природничої науки про закони руху матерії. Важливе загальнометодичне наукове значення для розвитку споріднених до біології галузей мають отримані у цей період (XVIII-XIX століття) експериментальні докази закону збереження енергії (*I закон термодинаміки*), затвердження принципів хімічної кінетики як основи динамічної поведінки біологічних систем, концепції відкритих систем та *II закону термодинаміки* для біологічних систем.

На початку XIX століття французький фізик і фізіолог **Пуазель Жан Луї Марі** (1799-1869) вивчав протікання рідини у тонких циліндричних трубках і внутрішнє тертя, першим застосував ртутний манометр для вимірювання тиску крові.

У середині XIX століття німецький лікар **Майер Юліус Роберт** (1814-1878) встановив, що кількість окислювальних продуктів в організмі зростає при підвищенні роботи, яка ним виконується (одним із перших відкрив закон збереження і перетворення енергії).

Гельмгольц Герман Людвіг Фердинанд (1821-1894) – німецький лікар-фізіолог і фізик – математично обґрунтував закон збереження енергії, відмітив його загальну характеристику, розробив термодинамічну теорію хімічних процесів, визначив швидкість поширення процесів збудження вздовж нерва та заклав основи сучасної фізіологічної оптики і фізіологічної акустики. Далі розвиток науки стимулювали винаходи **Дарсенваля Жак Арсена** (1851-1940) – французького фізіолога, засновника електрофізіотерапії.

Усе це вплинуло на розвиток біології і, поряд з її досягненнями, надало успіхів у вивченні структури біополімерів, сприяло формуванню сучасного провідного напрямку експериментальної біологічної науки – фізико-хімічної біології, у якому біофізика займає провідне місце.

У XIX столітті фізіологи **І. М. Сеченов**, **О. Ф. Веріго**, **О. Ф. Самойлов**, **М. Є. Веденський**, **О. О. Ухтомський**, **Д. С. Воронцов** розробили біофізику м'язів і нервів. **К. А. Тімірязєв**, спираючись на закон збереження енергії, вперше встановив (1875) кількісну залежність між швидкістю фотосинтезу і вбиранням хлорофілом світлових хвиль різної довжини. Український фізіолог **В. Ю. Чаговець**, виходячи з теорії електролітичної дисоціації, вперше (1896) висунув фізико-хімічну теорію електричних явищ у живих тканинах, яку він докладно розвинув у своїх наступних працях.

Радянський фізіолог та біофізик **П. П. Лазарєв** вперше розробив точні фізичні методи обліку поглинутої енергії, встановив зв'язок між поглинанням енергії і фотохімічною дією, розвинув іонну теорію

збудження В. Нернста і розробив теорію адаптації стосовно всіх органів чуття і центральної нервової системи.

П. К. Анохін (1898-1974), учень В. Бехтерева та І. Павлова, сформулював теорію функціональних систем, запровадивши поняття *системогенезу* як механізму формування живих систем, та показавши детермінізм явищ, формування та розвитку систем і критерії їх визначення.

О. Л. Чижевський (1897-1964), творець геліобіофізики та поняття космічної погоди, вперше встановив механізми впливу Сонячної активності на біосферу і соціум. Ключовими в роботах були встановлені механізми електричних явищ в гемодинаміці.

В останні десятиріччя найбільш інтенсивно розвивається радіобіологія – розділ біофізики, що вивчає вплив іонізуючих випромінювань на живий організм. Відкриття **Фредеріком** та **Ірен Жоліо-Кюрі** (1932) штучної радіоактивності збагатило біологічну науку новими точними методами дослідження (мічені атоми, авторадіографія, гісторадіографія тощо), які дали можливість глибоко вивчати обмінні процеси в організмі. Застосування штучних радіоактивних ізотопів у медицині розширило можливості діагностики і лікування окремих хвороб, зокрема деяких форм рака. В наш час, коли людина опанувала ядерну енергію, перед біофізикою постають нові актуальні проблеми: захист від шкідливих ядерних випромінювань, вивчення впливу на організм умов міжпланетних подорожей тощо.

Ідеї і методи біофізики не тільки знаходять сьогодні широке застосування при вивченні біологічних процесів на макромолекулярному рівні, але і розповсюджуються, особливо в останні роки, на популяційний і екосистемний рівні організації живої природи.

Сьогодні основний зміст біофізики складають наступні завдання:

- 1) пошук загальних принципів біологічно значущих впливів на молекулярному рівні;
- 2) розкриття їхньої природи відповідно до знань сучасної фізики, хімії, математики;
- 3) розробка узагальнених понять, які адекватно описують біологічні явища.

Сучасна біофізика має різні спеціалізації відповідно до рівня організації об'єктів чи явищ та методів:

– *Молекулярна біофізика* вивчає фізико-хімічні властивості й функціональну роль біологічних макромолекул (біополімерів) та молекулярних комплексів (ультраструктур) живих організмів, які створюють функціональні одиниці клітин, та характер їхньої взаємодії з іонами, молекулами і радикалами, їхню просторову будову й енергетику процесів, що в них відбуваються;

- *Біофізика клітини* вивчає фізико-хімічні основи функціонування клітини, будову й основні функції біологічних мембран (поверхневої плазматичної мембрани та мембран внутрішньоклітинних органолів): їх проникненості, каталітичну активність, електро- та хімізбудливість, а також енергетичні процеси клітини, її механічні та електричні властивості;
- *Біофізика органів чуття* з'ясовує молекулярні фізико-хімічні механізми рецесії, вивчає процеси трансформації енергії зовнішніх стимулів у специфічні реакції нервових клітин і механізмів кодування інформації в органах чуття;
- *Біофізика складних систем* досліджує явища та механізми системогенезу (еволюція, індивідуальний розвиток) та функціонування живих організмів чи біоценозів (соціуму), проблеми регулювання й саморегулювання на рівні клітин, органів, організмів та біоценозів і біосфери в цілому;
- *Теоретична і математична біофізика* розглядає теоретичні основи біофізики, зокрема, питання кінетики і термодинаміки, здійснює математичне моделювання біологічних процесів, структури та властивостей окремих макромолекул і субклітинних утворень (макромолекулярних комплексів);
- *Прикладна біофізика* здійснює цільові дослідження питань прикладного характеру та використання знань, методів, контролю чи керування явищами задля прикладних розробок та їхнього застосування: медична, екологічна та технічні (біотехнічні) чи технологічні їх напрямки:
- *біоінформатика*, саме з позиції комунікацій, програм та читання, запису, трансляції, сприйняття, обробки сигналів у природних біосистемах є ґрунтовним розділом біофізики сенсорних систем – психофізика, комунікативна та ергономічна біофізика;
- *біометрія* – метрологічна, медична, ергономічна, біотехнічна, екологічна;
- *біомеханіка* пов'язує функції та структуру опорно-рухового апарату з рухом біосистем – протезування, робототехніка, ергономіка, дизайн, архітектура;
- *біофізика еволюційних процесів* та індивідуальний розвиток – системогенез, гомеостаз, формоутворення, провідні чинники норми розвитку та життєдіяльності, патогенезу і їхні оздоровчий чи реабілітаційний, біомедичний, психофізичний аспекти);
- *біофізика періодичних (циклічних) процесів* – біоритмологія та хрономедицина, адаптаційні механізми, періодичні процеси, фізичні

умови та стимули для компенсації чи посилення дії періодичних умов природних чи штучних джерел впливу;

– *екологічна гео-біофізика* – дослідження, класифікація біофізичних аномалій геофізичного та антропогенного походження, контроль та запобігання і профілактика їх негативного впливу;

– *біофізичні продуктивні технології* – біонічний, нанотехнологічний, фармакологічний, харчовий чи біопродуктивний напрямки (отримання біогазу, рідке біопальне чи технічні розчинники та масла, селективні та конструкційні матеріали тощо).

Сучасний етап розвитку біофізики характеризується тим, що на перший план виступає проблема формулювання основних теоретичних понять, які відображають фундаментальні механізми взаємодій у біологічних системах на молекулярному рівні. Разом із цим специфіка біологічних систем проявляється в своєрідності фізичних механізмів молекулярних процесів, а принципова особливість – у тому, що характерні параметри елементарної взаємодії можуть змінюватися залежно від умов їх протікання в організмі. Наприклад, ефективність швидкостей окремих елементарних актів перенесення електрону при фотосинтезі не тільки змінюється протягом життєвого циклу, але є різною у різних сортах рослин, які відрізняються за фізіолого-біологічними показниками і продуктивністю. Це означає, що молекулярні процеси і механізми взаємодії не тільки залежать від локального оточення у біологічних системах, але і самі виступають об'єктом цілеспрямованого фізіологічно-біохімічного ранжування. В цьому і полягає необхідність і специфіка біофізичних досліджень явищ у біологічних системах.

Методи дослідження у біофізиці базуються на підході розгляду організму людини як відкритої біологічної системи – системи, компоненти якої функціонують в умовах обміну енергією та речовиною з навколишнім середовищем. Усі результати отримують через експериментальні дослідження. Експериментальна робота з біологічними об'єктами ставить своєю задачею моделювання процесів, котрі протікають у біологічній системі. Таке моделювання є основою наукового вивчення явищ, але звісно, вчений повинен дуже уважно обирати моделі, щоб вони відповідали реальним ситуаціям і процесам у біосистемах. Моделі в біофізиці засновуються на безпосередніх, отриманих при прямих експериментах, відомостях про реальні молекулярні властивості біологічної системи і не повинні являти собою результат простого перенесення з фізики у біологію готових схем ззовні схожих процесів.

§ 1.2. ПРЕДМЕТ, МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ, ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ БІОМЕХАНІКИ

Перша наша задача полягає в тому, щоб зайнятися тією прекрасною машиною, котра нам близька, – людським організмом. Ця машина володіє розкішню механіки – автоматизмом і прудкістю включення. Чи її не вивчати? У людському організмі є мотор, «передача», амортизатори, є якнайтонші регулювальники і навіть манометри. Все це вимагає вивчення і використання. Має бути особлива наука – біомеханіка ...

А. К. Гастєв

Окремо в біофізиці розглядаються закономірності будови рухового апарату людини, її рухових якостей і рухової діяльності. Цей напрямок біофізики має назву *біомеханіка*. Сьогодні біомеханіка відокремилася у самостійну науку.

Термін «біомеханіка» складається з двох грецьких слів «*bios*» – життя, «*texane*» – знаряддя. Як відомо, механіка – це розділ фізики, який вивчає механічний рух і механічну взаємодію матеріальних тіл. Звідси зрозуміло, що *біомеханіка* – це наука, яка досліджує механічні властивості тканин, органів і систем живого організму та вивчає механічні явища, котрі супроводжують процеси життєдіяльності, рухові можливості і рухову діяльність людини. *Об'єктом* науки є тканини, органи і системи живого організму і рухові дії, як система взаємопов'язаних активних дій і положень тіла людини, а *предметом* – механічне обґрунтування тієї чи іншої рухової діяльності організму.

Іншими словами, *біомеханіка* – це *механіка живих тіл*. Користуючись методами теоретичної та прикладної механіки, ця наука досліджує деформацію структур елементів тіла, течію рідини і газів у живому організмі, рух у просторі частин тіла, стійкість і управління рухів та інші питання, які є доступними вказаним методам.

На основі цих досліджень можуть бути складені біомеханічні характеристики органів і систем організму, знання яких є важливою передумовою для вивчення процесів регуляції.

До останнього часу основні дослідження у галузі біомеханіки були пов'язані з вивченням лише рухів людини і тварини. Однак сфера цієї науки швидко розширюється, і зараз вона включає в себе також вивчення дихальної системи, систем кровообігу тощо. В останні часи отримані дані з вивчення еластичного і нееластичного опору грудинної клітини,

рухів газів у дихальній системі. Сьогодні є спроби узагальненого підходу до аналізу рухів крові з позиції механіки суцільних середовищ. Зокрема, вивчаються коливання судинної сітки. Доведено, що з точки зору механіки структура судинної системи є оптимальною для виконання своїх транспортних функцій. Сучасні дослідження в біомеханіці з'ясували специфічні властивості багатьох тканин тіла: експоненційність (нелінійність) зв'язку між напругою і деформацією; істотну залежність деформації від часу тощо.

Виникненню і розвитку біомеханіки, як самостійної науки, сприяло накопичення знань у сфері фізичних і біологічних наук, а також біотехніки для вивчення рухової діяльності. Основи біотехніки були закладені ще в далекі часи. Її початок лежить у роботах **Аристотеля** і **Галена**, які присвячені аналізу рухів тварин і людини.

Лише завдяки роботам одного з видатних людей епохи Відродження – **Леонардо да Вінчі** – біомеханіка зробила наступний крок. Він описав механіку тіла при ходьбі вгору і вниз, при стрибках; відносно вивчення рухів людини за механічними законами він наголосив: *«Наука механіка тому така благородна і важча за всі інші науки, що як виявилось, всі живі організми, що мають властивість до руху, діють за її законами»*. Це була нова і смілива ідея для того часу. Вивчення польоту птахів призвело Леонардо да Вінчі до створення проекту першого літального апарату типу планера, в якому передбачалося використання для польоту сили м'язів людини.

Трохи пізніше **Галілео Галілей** закладає основи механіки, а **Вільям Гарвей** пояснює механізм кругообігу крові. Ці дослідження стали джерелом ідей порівняння живого організму з машинами, які працюють за законами механіки. **Декарт** (1596-1650) закладає основи рефлексорної теорії і показує, що причиною рухів може бути конкретний фрагмент зовнішнього середовища, який впливає на органи відчуття.

Наприкінці XVI століття **Роберт Гук** формулює закон механіки про поведінку твердого тіла під напругою, який було покладено в основу біомеханічного пояснення роботи м'язів. Подальші дослідження рухів людини і тварини пов'язані з іменем італійського лікаря і математика XVII століття – **Джовані Борелі**. Своєю книгою «Про рухи тварин» він поклав початок розвитку біомеханіки. Він розглядав організм людини, як машину, і намагався пояснити дихання, рух крові і роботу м'язів з позицій механіки.

Відкриття **Ісааком Ньютоном** трьох основних законів механіки закінчило формування базису для біомеханічних досліджень. Багато зробив для вивчення рухів людини і, особливо для розробки об'єктивних методів реєстрації рухів, французький фізіолог **Етьєн Жюль Марей**.

Спочатку з'явився розділ науки механіки, який займався дослідженням цілеспрямованих рухів людини, а вже пізніше утворилася біомеханіка – як розділ біології, який вивчав механічні властивості живих тканин, органів і організму в цілому, а також механічні явища, які відбуваються в ньому (при рухах, диханні і т. ін.). Перші кроки у детальному вивченні біомеханіки рухів було зроблено лише наприкінці XIX століття німецькими вченими **Браном** і **Фішером**, які розробили досконалу методіку реєстрації рухів, детально вивчили динаміку переміщення кінцівок і загального центру тяжіння (ЗЦТ) людини при ходьбі.

П. Лесгафтом (1837-1909) на основі динамічної анатомії була створена біомеханіка фізичних вправ. Великий внесок у пізнання рівнів регуляції рухів зробив російський учений **М. О. Бернштейн** (1880-1968), який теоретично обґрунтував процеси управління рухами з позицій загальної теорії великих систем. Нейрофізіологічні концепції М. О. Бернштейна склали підстави формування сучасної теорії біомеханіки рухів людини.

На становлення біомеханіки вплинули роботи таких вчених як **І. Сеченов** (1829-1905), **А. Ухтомський** (1875-1942). За визначенням А. Ухтомського, біомеханіка досліджує *«яким чином утворюється механічна енергія руху, і тиск може мати робочу приналежність»*. Ним показано, що сила м'язів, при інших однакових умовах, залежить від його поперечного перетину (чим більшим є поперечний перетин м'язу, тим більший вантаж він може підняти).

У середині XX століття вчені створили протез руки, який управляється електронними сигналами, що надходять з нервової системи. У 1957 р. у СРСР було сконструйовано модель руки (кисті), яка виконувала біометричні команди типу «зімкнути-розімкнути», а у 1964 р. створений протез зі зворотнім зв'язком, тобто протез, від якого безперервно до центральної нервової системи надходила інформація про силу зімкнення-розімкнення кисті, про напрямок руху руки тощо. Американські спеціалісти (Шредер, 1964р.) створили протез ноги при ампутації останньої вище коліна. Було виготовлено гідравлічну модель колінного суглобу, яка дозволяла досягти природної ходьби. Конструкція передбачала нормальну висоту підйому п'яти і витягування ноги при її відведенні незалежно від швидкості ходьби.

Біомеханічні дослідження дозволили створити новий тип взуття, обладнання і техніки управління ними (велосипеди, горні і гоночні лижі, човни для греблі та інше). Вивчення гідродинамічних характеристик риб і дельфінів дало можливість створити специфічні костюми для плавців, змінити техніку плавання, що сприяло підвищенню швидкості плавання.

Сучасна біомеханіка розвивається за декількома напрямками:

- *інженерна біомеханіка* – пов'язана з будівництвом робототехніки;
- *медична біомеханіка* – досліджує причини, наслідки і способи профілактики травматизму, міцність опорно-рухової системи, питання протезування;
- *ергономічна біомеханіка* – досліджує взаємодію людини з оточуючим середовищем для оптимізації цієї взаємодії;
- *спортивна біомеханіка*.

Закономірності рухів залежать від особливостей будови і функцій організму. Для вивчення рухових дій опорно-руховий апарат людини розглядають як біомеханічну систему. Рухи людини в біомеханіці розглядаються як системи рухів. Тому **методи дослідження в біомеханіці** базуються на системному підході і системному аналізі рухів їх кількісних характеристик, у тому числі кібернетичного моделювання. При дослідженні в біомеханіці вивчають біомеханічні (кінематичні, динамічні) характеристики руху людини.

Процедура аналізу рухової діяльності (біомеханічного аналізу рухової діяльності) складається з наступних етапів:

1. *Вивчення зовнішньої картини рухової діяльності.* Розглядаючи складну рухову дію, як систему рухів, спочатку в цій системі виділяються її складові частини. З'ясовують, з яких рухових дій вона складається і в якому порядку ці дії здійснюються одна за одною. При цьому використовують системний аналіз, тобто представлення системи через складові частини.

На першому етапі аналізу, при вивченні зовнішньої картини рухової діяльності, досліджують кінематику рухів, реєструють *кінематичні характеристики*. Особливо важливо знати тривалість окремих частин руху (фаз), графічним відображенням чого є **хронограма** (рис. 1.2.1.). Хронограма рухової дії характеризує техніку, а хронограма рухової діяльності – те, чому приділяють увагу при аналізі спортивної тактики.

2. *З'ясування причин, які викликають і змінюють рухи.* Вони є недосяжними візуальному контролю, і для їхнього аналізу потрібно досліджувати динаміку рухів, реєструвати *динамічні характеристики*. Важливе значення тут мають величини сил, що діють на людину ззовні і які створюються його власними м'язами. На підставі вивчення змін їх кількісних характеристик встановлюють закон взаємодії рухів у системі; з'ясовують, як елементи впливають один на одного.

3. *Визначення топографії працюючих м'язів.* На цьому етапі з'ясовується, які м'язи і яким чином беруть участь при виконанні певної вправи. Це дозволяє з багатьох фізичних вправ обрати ті, що

допомагають розвитку саме цих м'язів і їхньої координації. Залежно від того, яка частина усєї м'язової маси тіла задіяна, розрізняють: глобальну м'язову роботу (більш за $\frac{2}{3}$), регіонарну (від $\frac{1}{3}$ до $\frac{2}{3}$), локальну (менш $\frac{1}{3}$). Так, спортсмени-бігуни, гребці, лижники виконують глобальну м'язову роботу. До регіонарної відноситься, наприклад, м'язова робота, що виконується при деяких загальнорозвиваючих гімнастичних вправах (підтягування на перекладинах, піднімання ніг і верхньої частини тулуба тощо).

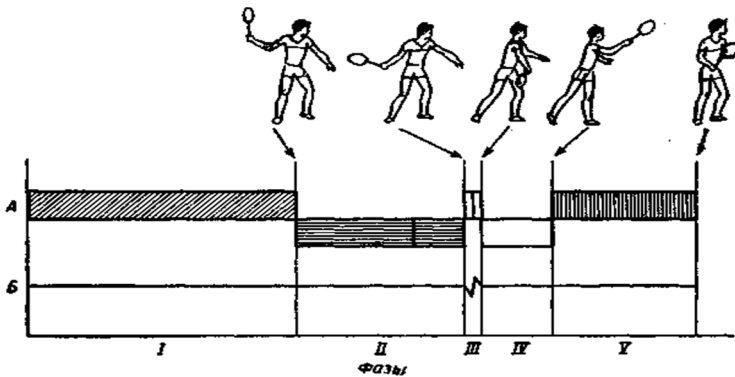


Рис. 1.2.1. Фазовий склад ударної дії у тенісі (за Л. С. Зайцевою)
 А – хронограма; Б – тензометрична відмітка удару, I – фаза руху назад для замахування; II – фаза прискореного руху ракетки вперед; III – фаза взаємодії ракетки з м'ячем; IV – фаза затриманого руху ракетки вперед; V – фаза повернення ракетки в початкове положення

Реєструючи електричну активність м'язів, можна отримати інформацію про те, які саме м'язи задіяні в кожній вправі (*метод електроміографії*). Чим інтенсивніше працює м'яз, тим вищою є його електрична активність і тим більшою є амплітуда електроміограми. На рис. 1.2.2 показано місця накладання електродів при запису електроміограми, а на рис. 1.2.3 – приклад графічного зображення топографії працюючих м'язів.

Різні рухи відрізняються один від одного за кінематикою (зовнішньою картиною) і динамікою (характером силових взаємодій). Так само і електроміографічний портрет рухів є неоднаковим для різних вправ. Але, як писав Р. Персон, «навіть дуже складні рухи, якщо вони є достатньо автоматизованими (наприклад, ходьба або інші локомоції, побутові, професійні і спортивні рухи), мають більш-менш постійний малюнок збудження м'язів не лише при повторенні руху однією людиною, але і у різних людей» [26].

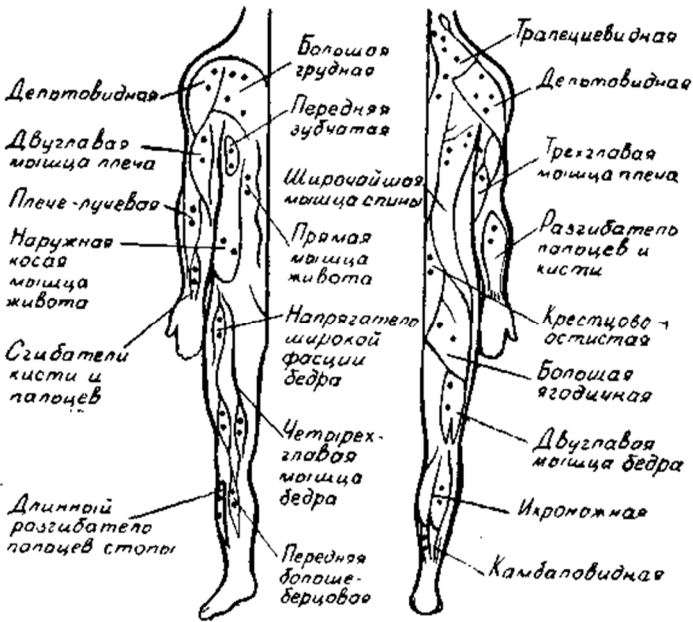


Рис. 1.2.2. Схематичне зображення м'язів тіла людини і місць накладення електроміографічних електродів [16]

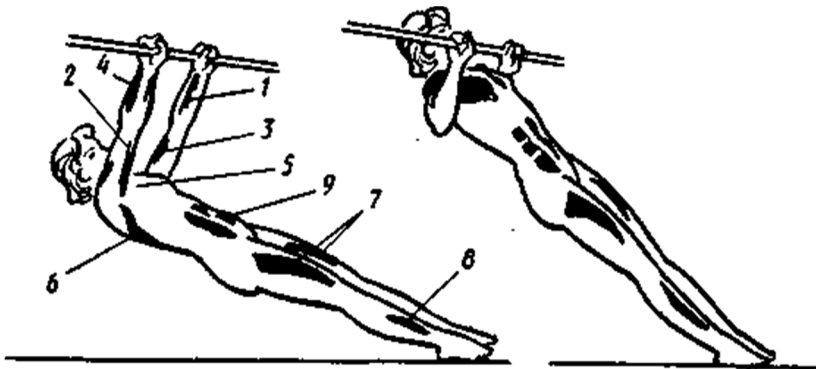


Рис. 1.2.3. Граничні пози при підтягуванні на низькій перекладині – м'язи-згиначі кисти; 2 – триголовий м'яз плеча; 3 – двоголовий м'яз плеча; 4 – плечелучевий м'яз; 5 – великий грудний м'яз; 6 – широкий м'яз спини; 7 – чотириголовий м'яз стегна; 8 – м'язи-розгиначі ступні; 9 – прямий м'яз голені

4. *Визначення енергетичних витрат і доцільності витрат енергії працюючих м'язів.* Для цього реєструють енергетичні характеристики (робота, потужність, енергія). Поряд з величинами енерговитрат важливою є економічність, яка є тим вищою, чим є більшою є частка корисних енерговитрат по відношенню до усієї витраченої енергії. Підраховано, наприклад, що у бігунів вищої кваліфікації підвищення економічності бігу на 20 % переміщує бігуна у списку кращих з 10-го на 1-е місце.

5. *З'ясування оптимальних рухових режимів (найкращої техніки рухових дій і найкращої тактики рухової діяльності)* здійснюється на заключному етапі біомеханічного аналізу рухової діяльності. Тут оцінюється рівень відповідності варіантів техніки і тактики: реальної і оптимальної.

Оптимальним є найкращий варіант з усіх можливих. У спорті (а в останній час і в оздоровчій фізкультурі та при фізичній реабілітації) постійно здійснюється пошук оптимальних варіантів техніки і тактики, а також з визначенням рівня відповідності оптимальному руховому апарату того апарату, що реально спостерігається. Так вирішується задача оптимізації рухової діяльності.

Оптимізацією називають вибір найкращого варіанту з числа можливих. Але для різних цілей є неоднаковими критерії оптимальності, тобто показники, які використовуються для оцінки рівня досягнення цілі: економічність, механічна продуктивність, точність, естетичність, комфортабельність, безпечність.

Економічність рухової діяльності є зворотно пропорційною енергії, що витрачається на одиницю роботи, що виконується або метр пройденого шляху.

Механічна продуктивність є тим вищою, чим більший об'єм роботи виконується за певний час або чим швидше виконується цей об'єм роботи. Наприклад, у циклічних видах спорту механічна продуктивність оцінюється часом подолання дистанції змагання, а в масовій фізичній культурі – відстанню, яку людина може пройти, пробігти чи пропливти за 12 хвилин.

Точність рухових дій має 2 два види: цільова точність і точність виконання певної зовнішньої картини рухів. Цільова точність оцінюється відхиленням точки попадання від центру мішені (наприклад, при стрільбі), або відношенням кількості успішно виконаних рухових дій до їх загальної кількості (ударів у боксі і в спортивних іграх тощо).

Естетичність оцінюється близькістю кінематики (тобто зовнішньої картини руху) до естетичного ідеалу – загальноприйнятому або прийнятому в даному виді спорту.

Комфортабельними вважаються плавні рухи. Чим більше коливається тіло при ходьбі, бігу тощо, тим нижча комфортабельність.

Безпечність є тим вищою, чим меншою є ймовірність травми.

Усі кількісні характеристики рухів дозволяють на рівні вищого системного аналізу будувати моделі системи рухів, за допомогою яких вивчають процеси управління рухами, ведуть пошук оптимальних варіантів рухів. Таким чином, у сучасній біомеханіці рухової діяльності гармонічно перетинаються ідеї і методи оптимізації рухової діяльності, функціонального і системно-структурного підходів, автоматизованого контролю за технічно-тактичною майстерністю, моделювання техніки і тактики на ЕОМ. Але головною залишається думка та праця науковця, який досліджує закономірності рухів, і практиків, які використовують ці досягнення в навчальному, тренувальному, реабілітаційному процесах.

Реєстрація кінематичних характеристик. Просторові кінематичні характеристики (координати, траєкторії) вимірюють безпосередньо або в лінійних, або у кутових одиницях відліку.

1. Для вимірювання кутів у суглобах використовують метод *електрогоніометрії*. Основна мета методики гоніометрії – реєстрація змін величин міжланкових кутів у великих суглобах нижніх кінцівок (для оцінки якості руху людини). При електрогоніометрії на осі суглобу закріплюються дві гілки гоніографу; при їх наближенні чи віддаленні змінюється електричний опір, а зміна струму фіксується гоніографом. При використанні системи електрогоніографів отримують реєстрацію одночасних змін ряду суглобних кутів у різних площинах.

2. *Фотореєстрація* використовується у вигляді однократних або багатократних експозицій для реєстрації змін в окремих суглобах при виконанні рухових дій.

3. *Кінореєстрація* використовується для фіксації змін у суглобах, що відбуваються при рухах людини.

Реєстрація динамічних характеристик. Інерційні характеристики (маси, момент інерції) звичайно не реєструються, а визначається розрахунковими методами. Застосовують експериментальні і аналітичні методи визначення положення ЗЦГ. До експериментальних методів відносять метод зважування людини на трикутниковій платформі, за моделлю Абалакова, за шарнірною моделлю О. Фішера. Визначення моменту інерції відбувається або через застосування спеціальних гойдалок, або розрахунковим методом за даними маси тіла людини, моменту інерції самої установки, періоду качань.

Силу дії людини визначають як при роботі груп м'язів одного або декількох суглобів, так і при спільній роботі багатьох груп м'язів. Цим займається *динамографія* (коли під дією прикладеної сили деформується

пружина, а показання передаються на індикатор). Для вимірювання моментів сили ряду груп м'язів у суглобах застосовують метод *полідинамометрії* (тут застосовується принцип важелю: співвідношення сил тяжіння груп м'язів до їх рівнодіючої є обернено пропорційним відповідній довжині важелів). Для реєстрації сили відштовхування при стрибках, ходьбі, бігу, боротьбі і багатьох видах спорту використовують метод *електричної тензометрії* (який засновано на зміні електричних властивостей датчиків, що наклеюються на частини знарядь штанги або перекладини, весла, ручки тенісної ракетки). *Метод електроміографії* – це метод реєстрації електричної активності збуджених м'язів. За допомогою електроміограми можна визначити момент включення цієї активності і тривалість активності. Крім того, з певним наближенням можна оцінювати ступінь активності м'язу, тобто величину його напруги. Застосування портативних підсилювачів біострумів дозволяє записувати активність багатьох м'язів.

§ 1.3. МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ТА ФІЗИЧНИХ ЯВИЩ У БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

Модель – це спрощена копія (макет), якій притаманні усі характерні властивості біологічної системи різного роду організації.

Для дослідження механічних властивостей тканин та органів людини розроблено відповідні моделі: механічні моделі кісткової тканини, суглобів, м'язів, тканин кровоносної системи, які відображують механічні властивості цих біологічних об'єктів (поведінку на деформацію, пружність, міцність, жорсткість тощо – див. главу 6).

При вивченні біомеханічних властивостей опорно-рухового апарату складають механічну модель, яка в цілому відображає роботу опорно-рухового апарату при здійсненні ним рухової діяльності. Відомі моделі Фішера, Абрамова та інших.

Дослідження системи кровообігу людини в серцево-судинній системі не можливо без створення відповідної механічної моделі кругообертання крові (див. главу 5). Саме створення такої моделі лежить в основі створення апарату штучного кругообертання крові.

Через те, що всі тканини і органи людини володіють певними електричними властивостями, то дослідження останніх неможливо без створення відповідних електричних моделей (див. главу 8). Завдяки моделюванню процесів передачі електричного імпульсу досліджено ті процеси, які при цьому відбуваються у клітинах та тканинах, що необхідно знати при проведенні лікувальних або діагностичних заходів у медицині.

Моделювання є інструментом при дослідженнях у *біологічній кібернетичі*, яка вивчає організацію й управління сприйняття, зберігання,

передачі й перетворення інформації у нервовій системі вищих тварин і людини, переважно з точки зору процесів, які відбуваються при цьому. Але при цьому в біологічній кібернетиці моделювання має свої особливості. Фізичні моделі в цьому випадку замінюються «предметними» – це піддослідні тварини, ізольовані органи, тканинні препарати тощо. Широке поширення мають також математичні моделі.

Через велику складність біологічних систем часто моделюються лише окремі функції системи. Практикуються також спрощені або ідеалізовані моделі. Моделі біологічних систем поділяються на: структурно-функціональні, в яких враховуються функція й структура оригіналу, і функціональні – за типом «чорного ящика», коли внутрішня структура оригіналу залишається невідомою.

У біокібернетиці розрізняють декілька напрямків, основними з яких є *фізіологічна кібернетика* й *нейрокібернетика*. У тісному зв'язку з біокібернетикою перебуває медична кібернетика, яка в останній час виділилася в самостійний напрямок кібернетики. Так, наприклад, як відомо, чинники багатьох захворювань пов'язані зі змінами, котрі відбуваються в білкових структурах клітин, а причиною можуть бути мутації – заміщення однієї чи декількох амінокислот у структурі білка. Експериментальне дослідження мутаційних явищ в біологічних білкових структурах традиційними рентгеноструктурними або ядерними магнітно-резонансними методами являє собою достатньо трудомістку задачу. Тому розв'язок таких важливих задач на сьогодні під силу лише комп'ютерному моделюванню на базі молекулярної динаміки. Молекулярне моделювання є одним із важливих інструментів для дослідження біо- і наноструктур, у біоінженерії і біодизайні.

Моделювання у фізіологічній кібернетиці. Математична модель у фізіологічній кібернетиці – це точний (кількісний) опис функції певного органу чи системи. Зазвичай ця модель являє собою сукупність рівнянь або відношень, котрі описують залежність між параметрами, що визначають стан органу чи системи, і даними, які характеризують умови їх функціонування або зовнішні впливи.

У зв'язку з особливостями фізіологічних систем (велика складність, динамічність і варіабельність параметрів) математичні моделі для них у багатьох випадках складають з певним рівнем ідеалізації, наближення і спрощення. Однак це має свої переваги, бо дозволяє при створенні моделі відобразити в ній найбільш істотні риси оригіналу. Таким спрощенням виступає *моделювання ізольованих* (таких, які не мають певних зв'язків з іншими системами) *органів і систем*. Крім того, моделі можуть відображувати різні умови (рівні) регулювання діяльності

органу чи системи. Сьогодні, наприклад, розроблено моделі деяких ізольованих органів і систем на рівні підтримання гомеостазу. Значно менше розроблено моделі з урахуванням нервової регуляції або моделі взаємопов'язаних систем.

Для того, щоб підійти до питання про створення математичних моделей фізіологічних систем, приведемо деякі випадки, в яких математичною моделлю виступає просто закономірність, якій підпорядковуються досліджуване явище. Наприклад, моделлю вільного росту числа N

клітин є рівняння природного росту: $\frac{dN}{dt} = kN$, де k – константа росту. При

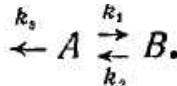
нааявності фактору r , який гальмує зростання (вважається, що r є прямо пропорційним наявній кількості клітин: $r = mN$), модель приймає вигляд:

$$\frac{dN}{dt} = (k - r)N = kN - mN^2.$$

Моделлю дифузії речовини крізь напівпроникну мембрану є рівняння,

яке визначає потік речовини: $\frac{dQ}{dt} = A \cdot p \cdot (C_1 - C_2)$, де C_1 і C_2 – концентрації речовини по обидва боки мембрани, p – її проникність, A – константа проникності.

Модель сорбції тканинною рідиною речовини (наприклад, радіоактивного ізотопу), яку було введено у кров'яне русло, представляє два суміжних резервуари: A (кров'яне русло) і B (тканинна рідина). У резервуар A в початковий момент вводиться деяка маса речовини, що створює в ньому концентрацію C_{A0} . З резервуара A речовина виводиться у навколишнє середовище зі швидкістю k_3 (константа швидкості), яка є пропорційною поточним значенням концентрації в ньому C_A . Між резервуарами A і B відбувається обмін речовиною з пропорційними концентраціям C_A й C_B швидкостями перенесення речовини (константи k_1 і k_2). Процес можна зобразити схемою:



Завдання моделювання – установити зміну в часі концентрацій C_A й C_B . Математичною моделлю є рівняння кінетики процесів, що протікають у системі:

$$dC_A/dt = k_2 C_B - k_1 C_A - k_3 C_A; \quad (\text{при } t = 0, C_A = C_{A0}),$$

$$dC_B/dt = k_1 C_A - k_3 C_B.$$

Задаючи певні значення констант k_1 , k_2 , k_3 , можна вирішити ці рівняння.

Розробка математичної моделі органу чи системи в загальному випадку починається з визначення цілі і задач моделювання, а також

вирішення питання про можливі спрощення моделі. Основою для розробки самої моделі є дані про функціонування органу чи системи, які встановлені дослідним шляхом. За цими даними визначаються незалежні й залежні змінні та складається передчасне уявлення про характер модельованої функції. Однак для цього отримані дані, які звичайно представляють випадкові безперервні величини вимагають певної обробки. При обробці їх використовуються методи теорії імовірності.

Математичне очікування, наприклад, характеризує середній рівень (стале значення) пошукуваної функції. Дисперсія (або середнє квадратичне відхилення) є мірою розкиду (варіабельності) значень функції, що, зокрема, залежить від якості регулювання в системі. Шляхом побудови гістограм установлюється закон розподілу значень функції, що характеризує стаціонарність процесу, стійкість системи по відношенню до зовнішніх впливів тощо. Обчислення автокореляційної функції дозволяє виділити періодичну складову в динаміці пошукуваної функції, якщо вона є, а обчислення кроскореляційної функції – встановити зв'язок даної функції з іншими параметрами системи.

Потім настає основний етап – вибір математичного апарата. Для цього насамперед вирішується питання про складності й ступінь детермінованості системи. Для детермінованих систем, до яких відноситься більшість ізольованих органів і систем, адекватним математичним апаратом є диференціальні й інтегральні рівняння, переважно з постійними коефіцієнтами; для систем з імовірним компонентом (внутрішні органи зі збереженням центральної регуляції, аналізатори, відділи мозку тощо.) – диференціальні рівняння зі змінними коефіцієнтами, а також спеціальні методи теорії інформації, теорії випадкових процесів тощо. (Розробка моделей для цих систем перебуває ще в початковій стадії.)

Коли математичний апарат обраний, складаються необхідні рівняння, в які вносяться можливі спрощення (апроксимація диференціальних рівнянь алгебраїчними, нелінійних залежностей – лінійними тощо). Рівняння складаються за допомогою звичайних прийомів: логічних міркувань (висновку), використання аналогій, шляхом здогаду (методом проб і помилок) тощо. Коефіцієнти в змінних величинах та постійні величини, що входять у рівняння, визначаються на підставі вихідних даних. Потім складені рівняння перевіряються в контрольних дослідах. При подальшому дослідженні моделі встановлюються межі її застосування й вносяться необхідні корективи.

У багатьох випадках не вистачає необхідних даних для складання моделі, тому в цьому випадку використовують попередні (евристичні) моделі, які потім уточнюються шляхом накопичення відповідного досліду.

У якості прикладу достатньо простої математичної моделі фізіологічної системи наведемо запропоновану Хіллом модель скелетного м'язу (див. главу 6). Ця модель являє собою рівняння, яке зв'язує напругу F (зусилля, яке приходить на одиницю поперечного перетину м'язу) і швидкість $v = \frac{dl}{dt}$ скорочення м'язу: $(F+a) \cdot (v+b)=k$, де константи a , b , k залежать від природи м'язу. Розв'язок рівняння дозволяє визначити величину зменшення l м'язу при ізотонічному скороченні при різних навантаженнях, і дає добре співпадання з експериментальними даними.

Моделювання у нейрокібернетиці. Інформація, що надходить із зовнішнього середовища та внутрішнього середовища організму у формі різних роздратувань, сприймається нервовими рецепторами й кодується у формі імпульсів подразнення, котрі передаються за нервовими провідниками, що супроводжується певними біохімічними та біоелектричними явищами.

Моделювання, переважно математичне, є основним методом нейрокібернетики.

Завданнями нейрокібернетики виступають: 1) вивчення властивостей основних елементів системи – нервової клітини (нейрона) і нейронних ансамблів (мереж) і механізму переробки в них інформації; 2) моделювання й вивчення рецепторних систем (органів почуття); 3) моделювання окремих функцій головного мозку (розпізнавання образів, утворення понять й емоцій, пам'яті, прийняття рішень тощо); 4) дослідження взаємодії підсистем мозку при формуванні поведінки й ін.

Сьогодні нейрокібернетика досягла значних успіхів тільки в першому й частково у другому із зазначених напрямків.

Як відомо, основний структурний і функціональний елемент нервової системи – нейрон – це спеціальна клітина, якій притаманна властивість збудливості (за законом «всі або нічого») і проведення збудження в певному напрямку.

Нейрон складається з тіла (соми), що містить ядро, з безліччю коротких розгалужених відростків – дендритів – й одного довгого відростка – аксона з розгалуженням тільки на кінці (рис. 1.3.1.). З'єднуючись між собою за допомогою синапсів, нейрони утворюють лінійні ланцюжки або багаторозгалужені мережі. У синапсах особливі пляшки, які присутні на кінцях розгалужень аксона одного нейрона та які вкриті пресинаптичною мембраною, прилягають до мембрани соми або дендритів іншого нейрону, утворюючи вузьку синаптичну щілину. У середині пляшок перебувають пухирці, що містять збудливий або гальмуючий медіатор.

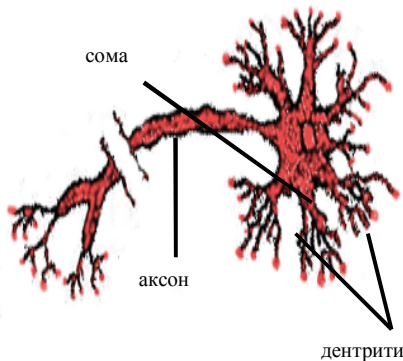


Рис. 1.3.1. Нейрон

При передачі збудження між нейронами нервовий імпульс (або їхня серія), що поширюється вздовж аксона першого нейрону, досягає кінцевих бляшок і звільняє перебуваючий у них медіатор. Останній дифундує крізь щілину до мембрани другого нейрону, викликає її деполяризацію й появу збуджувального постсинаптичного потенціалу. Коли останній досягає критичного рівня, у другому нейроні виникає потенціал дії, що поширюється у вигляді імпульсу вздовж тіла нейрона та його відростків. Якщо збудження триває, то утвориться серія імпульсів. У гальмівних нейронах вивільнюваний медіатор викликає гіперполяризацію постсинаптичної мембрани, тобто підвищує критичний рівень потенціалу утворення збуджувального імпульсу.

На кожній нервовій клітині є безліч (від десятків до тисяч) збуджувальних і гальмівних синапсів, дія яких сумується, і якщо результати підсумку перевищують межу збудження певного нейрону, то в ньому утворюються імпульси збудження.

Після проведення імпульсу настає рефракторний період повної незбудженості нейрона.

У нейронах центральної нервової системи може виникати й спонтанна активність, тобто поява одиночних або груп імпульсів без дії зовнішнього роздратування.

Збудження нейрону може бути здійснено шляхом безпосереднього подразнення аксону, наприклад, під дією електричної напруги. При цьому на виході нейрону також виникає цілий залп імпульсів, частота й кількість яких залежать від сили подразнення. Безпосереднє подразнення нейрону використовують при вивченні його властивостей в експерименті й відтворюється в його математичних моделях.

Сьогодні існують різні математичні моделі нейрону, які приблизно відтворюють його функції. Найбільш проста з них – *калієво-натрієвий насос* – заснована на теорії нервового збудження, що розроблена А. Ходжкіним й А. Хакслі і являє собою рівняння, які описують залежність мембранного потенціалу нейрона від провідності мембрани для іонів калію й натрію. Зміна мембранного потенціалу U описується рівнянням: $\frac{dU}{dt} + \frac{1}{C}(P_K - P_{Na})U = k\varphi$, де P_K й P_{Na} – провідності мембрани для іонів K й Na , φ – потенціал збудження, C – питома ємність мембрани, k – коефіцієнт пропорційності. При цьому приймається, що між провідностями P_K й P_{Na} є залежність: $\frac{dP_{Na}}{dt} = k_2\varphi - a_1P_{Na} - a_2P_K$, де φ – потенціал збудження, k_1, k_2, a_1, a_2 – коефіцієнти пропорційності й розмірності.

Розв'язок цих рівнянь для різних стадій збудження нейрону дозволяє встановити характер зміни в часі постсинаптичного потенціалу.

Кібернетика в протезуванні. До галузі застосування кібернетики в лікувальному процесі відноситься *біоуправління* різними функціями організму. При цьому біопотенціали відповідних органів використовуються як керуючі сигнали. В першу чергу, це знайшло своє пристосування при протезуванні.

Відновлення або заміна повністю втрачених у результаті хвороби або травми окремих органів людини є однією з проблем медичної практики. Починаючи з античних часів і до діючого часу людина постійно шукала засоби створення штучної руки, яка б за своєю досконалістю була найбільш близькою до природної. Але для створення штучного аналогу необхідні знання про механізм роботи руки, механізм виконання нею руховий дій.

З точки зору механіки (див. главу 7) тіло людини являє собою систему рухомо з'єднаних ланок, які мають деякі розміри, масу, момент інерції і які мають м'язові двигуни. Взагалі опорно-рухова система людини, як механічна система, має високу складність, бо до її складу входять до 70 ланок, а для її достатньо повного опису потрібно біля 240 ступеней вільності. Вважається, що усі ці ланки є абсолютно твердими, з'єднуються між собою ідеальними сферичними шарнірами, а рухи здійснюються за допомогою управляючих моментів у шарнірах, котрі виконуються м'язами.

Рухомі з'єднання ланок розглядаються як біокінематичні пари, що об'єднуються в біокінематичні ланцюги. Це дає можливість створити загальну кінематичну схему опорно-рухового апарату людини, де кості являють собою ланки кінематичного ланцюга, а суглоби – кінематичні пари.

При дослідженні рухів людини широко застосовують моделі на основі рівнянь руху системи твердих тіл, які відповідають окремим сегментам тіла за геометричними і мас-інерційними характеристиками. Елементи такої моделі з'єднуються обертальними шарнірами, діапазони обертання яких відповідають амплітудам кутових рухів суглобів.

Розглянемо кінематику руки людини (рис. 1.3.2.).

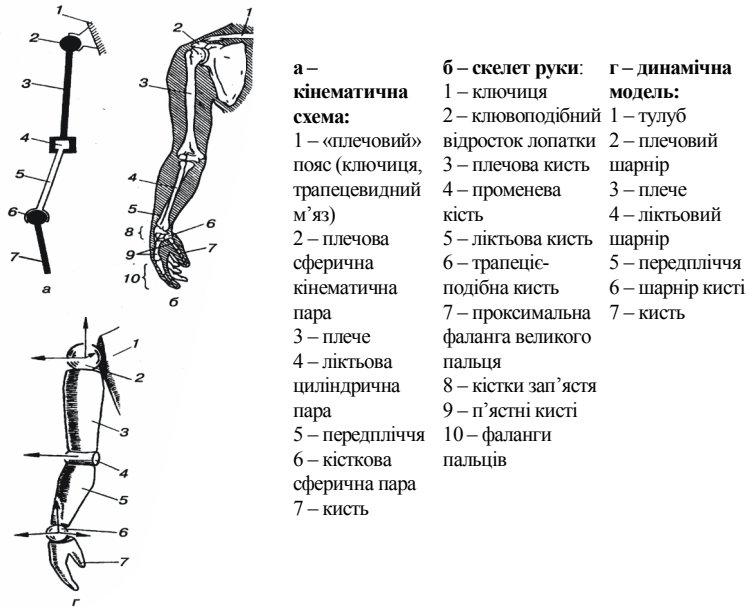


Рис. 1.3.2. Рука, її кінематична схема та динамічна модель (стрілками позначено компоненти м'язових моментів у суглобах)

З точки зору біомеханіки верхня кінцівка може бути змодельована багатоланковим просторовим механізмом: кінематичні пари – плечова сферична кінематична пара (плечовий суглоб, дельтовидний м'яз), ліктьова циліндрична пара (ліктьовий суглоб, клювоплечевий м'яз), кистьова сферична пара (шарнір кисті – трапецієподібна кістка) (рис. 1.3.2, а).

На основі цієї кінематичної моделі можна побудувати динамічну модель верхньої кінцівки (рис. 1.3.2., в). Ця система має 7 ступеней вільності. Плечовий суглоб є шароподібним, тобто має 3 ступеня вільності. На рис. 1.3.2., в він представлений еквівалентною схемою одноосних

шарнірів, вісі обертання яких перетинаються в одній точці, а ланки 1, 2 мають нульову довжину. Тобто за кінематичною схемою руки можна підрахувати, що рухомість руки відносно плечового поясу оцінюється 7 ступенями вільності. Кількість компонент моменту м'язових сил у трьох суглобах також дорівнює 7.

Таким чином, аналізуючи кутові переміщення, швидкості і прискорення ланок руки при виконанні різних цілеспрямованих рухів типу «взьми – поклади» можна якісно і кількісно оцінювати процес реабілітації пацієнта або працездатність протезу.

Але найскладнішим у цьому процесі є моделювання роботи м'язів. Нервово-м'язове управління рухами сильно відрізняється від системи управління в техніці: тут кожне волокно м'язу управляється через власний мотонейрон, а кількість волокон у м'язах є чималою; крім того кожне нервово волокно може подразнювати цілу групу м'язових волокон.

Тому протягом тривалого часу усі спроби створення механічного зразка руки, яке приводилося б у дію тими чи іншими групами м'язів, очікуваного результату не давали. Положення змінилося лише у середині ХХ століття. В результаті досягнутого рівня розвитку електрофізіології, основ автоматичного управління, біомеханіки рухової дії, нової гілки біоніки і електронної техніки з'явилися нові шляхи рішення задачі. Цьому сприяло затвердження кібернетичного підходу до вивчення загальних закономірностей управління функціями живого організму. В результаті зародився принципово новий напрямок у протезуванні кінцівок – створення протезів з *біоелектричною системою управління і біоуправляючих протезів* – протезів, які управляються за допомогою біострумів м'язів культі.

Управління таким протезом наближено до природного управління здорової руки, що дозволяє частково відновити втрачені умовно-рефлекторні зв'язки. Користування біоелектричним протезом нормалізує стан тканин культі, робить кращим кровообіг, процеси обміну речовин. Позитивною якістю біоелектричних протезів є також те, що біоуправління виключає необхідність великих енергетичних витрат для приведення їх у дію інвалідом.

Перший крок у цьому напрямку було зроблено радянськими вченими **А. Е. Кобринским, Я. С. Якобсоном** та ін.: у 1956 р. було створено макетний зразок «біоелектричної руки» – кисті. Ця штучна рука повернула до повноцінного життя тисячі людей. Принцип дії цього протезу досить простий: мозок віддає м'язам наказ скоротитися, після чого легке скорочення одного м'язу культі змушує кисть стиснутися, скорочення іншої – розкриває її. Але паралельно з цим позитивом було виявлено проблему, яка виявилася при експлуатації штучної кисті:

реакція (відповідь) на окремі сигнали, які надсилаються з мозку, не є достатньо швидкою. Цю проблему було виявлено також при інших моделях протезування верхніх кінцівок.

Існують різні розробки біоелектричних протезів верхньої кінцівки: кисть + передпліччя. Роботу таких протезів засновано на тому, що біоелектричний сигнал з поверхні м'язів інваліду знімається за допомогою спеціальних поверхових електродів відведення. Цей сигнал, до подачі його у систему управління, підсилюється за допомогою підсилювачів біопотенціалів. Наскільки сильним і тісним буде зв'язок: «*нервово-м'язовий сигнал – потенціал дії*» – настільки ефективним буде використання того чи іншого протезу. Це залежить, як від підсилювачів біопотенціалів, так і від анатомо-фізіологічних характеристик, котрі визначають властивості культу (які, у свою чергу, формуються за рахунок дії тих чи інших м'язів).

Таким чином, з одного боку ефективність управління та надійність роботи біопротезу, а також енерговитрати інваліду при постійному користуванні протезом визначаються параметрами підсилювачів біопотенціалів. Тому сьогодні серед питань, які розглядаються при протезуванні верхньої кінцівки, однією з основних інженерних проблем є проблема підвищення ефективності підсилювачів біопотенціалів. З іншого боку, через унікальність управляючих впливів у нервово-м'язовій системі, при моделюванні протезу необхідно обов'язково враховувати м'язовий склад культу та анатомо-фізіологічні властивості м'язової тканини.

Сьогодні також розроблено більш складні системи протезів, у яких, крім виконання певних рухів, забезпечується сприйняття деяких зовнішніх впливів, наприклад, тиску, тобто відшкодовується не лише рухова, але частково й чутлива (тактильна) функція кінцівки.

Біоуправління сьогодні розвивається за трьома напрямками: а) лікувальний вплив на патологічно змінені органи за допомогою біопотенціалів здорового організму; б) автоматичне регулювання параметрів лікувального впливу за допомогою біопотенціалів самого хворого органа; в) керування за допомогою біопотенціалів технічними пристроями, які застосовуються в лікувальному процесі.

У якості прикладів можна вказати на наступні апарати: апарат «Міотон», в якому для стимуляції м'язів застосовуються посилені біопотенціали здорових м'язів донора; апарат для електросна, який викликає дію на головний мозок імпульсів, що відтворюють форму біопотенціалів, записаних у цього ж хворого під час природного сну; апарат для електростимуляції м'язів імпульсним струмом, частота якого регулюється автоматично, залежно від зміни біопотенціалів

уражених м'язів; апарат для автоматичного дозування інгаляційного наркозу залежно від зміни біопотенціалів головного мозку, що характеризують глибину наркозу тощо.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що вивчає біомеханіка? Що вивчає біофізика?
2. У чому полягає предмет, об'єкт дослідження, задачі науки біомеханіки. Які сьгодні проблемні питання досліджує ця наука?
3. У чому полягають відмінності між такими поняттями, як «рух», «рухова дія» і «рухова діяльність»?
4. Перерахуйте основні етапи біомеханічного аналізу.
5. Що таке оптимізація рухової діяльності?
6. Які критерії оптимальності рухової діяльності вам відомі?
7. У чому полягає головна відмінність функціонального підходу від системно-структурного?
8. Що таке топографія працюючих м'язів?
9. Які основні методи досліджень у біомеханіці?
10. Які існують методи досліджень у біофізиці?
11. Що таке модель при біомеханічних та біофізичних дослідженнях?
12. Які вимоги до моделювання біологічних об'єктів чи систем?