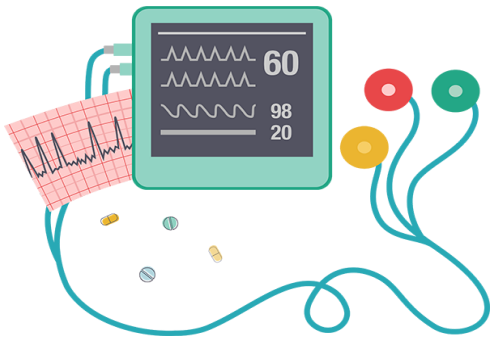




Дідич В.М., Назаренко Н.С.

Фізичні основи електрографії органів



**МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені М.І.ПИРОГОВА**

КАФЕДРА БІОФІЗИКИ, МЕДИЧНОЇ АПАРАТУРИ ТА ІНФОРМАТИКИ

Фізичні основи електрографії

Навчальний посібник

**для студентів 1 курсу
медичного і фармацевтичного факультетів**

Вінниця, ВНМУ – 2025

УДК 577.35:612.13
ББК 28.707.1+28.706 Я73
К 90

Навчальний посібник «Фізичні основи електрографії органів» для студентів 1 курсу медичного і фармацевтичного факультетів затверджено Вченою радою ВНМУ ім. М.І.Пирогова.

Протокол №6 від 30 квітня 2025р.

Рецензенти: д.м.н., професор **Очередько О.М.**
д.т.н., професор **Семенов А.О.**
д.т.н., професор **Павлов С. В.**

Фізичні основи електрографії органів / Дідич В.М., Назаренко Н.С.-
Вінниця, ВНМУ, 2025. – 101с.

В навчальному посібнику викладені: фізичні основи електрографічних методів дослідження тканин та органів в медицині (теоретичні відомості, формули та рівняння з фізичних і фізіологічних процесів в біологічному середовищі); контрольні запитання; тести для вивчення та засвоєння основних тем даного розділу, самоконтролю та самостійної роботи; приклади розв'язання практичних задач; задачі для самостійного розв'язування; опис трьох лабораторних робіт. Навчальний посібник розраховано на студентів 1 курсу медичного і фармацевтичного факультетів.

УДК 577.35:612.13
ББК 28.707.1+28.706 Я73
Дідич В.М., Назаренко Н.С.

ЗМІСТ

Передмова.....	6
• Тема: Структурні елементи та фізичні властивості біологічних мембран.....	8
<i>Тести для перевірки кінцевого рівня знань</i>	<i>28</i>
• Тема: Вивчення мембранних потенціалів спокою та дії.....	34
<i>Тести для перевірки кінцевого рівня знань</i>	<i>46</i>
<i>Лабораторна робота №18. Визначення електричних характеристик порогу збудження електронної моделі біомембрани.....</i>	<i>50</i>
• Тема: Вивчення біофізичних основ електро- та векторкардіографії.....	53
<i>Тести для перевірки кінцевого рівня знань</i>	<i>70</i>
<i>Лабораторна робота №20. Вивчення фізичних основ електрокардіографії</i>	<i>72</i>
• Тема: Дослідження дисперсії імпедансу біологічних тканин.....	77
<i>Тести для перевірки кінцевого рівня знань</i>	<i>93</i>
<i>Лабораторна робота №20. Вивчення електропровідності біологічних об'єктів.....</i>	<i>97</i>
Перелік використаної літератури.....	101

ПЕРЕДМОВА

Медична і біологічна фізика — наука про фізичні та фізико-хімічні явища, що відбуваються в живих організмах, тканинах, клітинах, а також їх дія на організм. Крім того, в лікувальній практиці використовується різноманітна апаратура — діагностична, терапевтична, хірургічна тощо, дія якої ґрунтується на фізичних явищах і процесах. Тому сьогоденній медичний працівник повинен добре розуміти біофізичні процеси, що протікають в організмі людини, а також знати можливості електронної апаратури, з якою він неминуче буде працювати.

Знання електричних явищ мають велике теоретичне значення: для розуміння процесів, що відбуваються в живих організмах, тканинах, клітинах; їх дія на організм; важливі медико-біологічні застосування. Електрична активність — це властивість живої матерії. Тому вивчення електричних явищ у живих об'єктах посідає важливе місце в біофізиці.

Транспортні процеси, що відбуваються в мембрані, підтримують її іонний склад і зумовлюють іонні градієнти, потрібні для виникнення мембранного потенціалу, підтримання збудливості, а також транспортування деяких молекул та іонів. Під час функціонування клітин і тканин виникають електричні поля, енергетичною характеристикою яких є різниця потенціалів (біоелектричні потенціали). Біопотенціали зумовлені нерівномірним розподілом іонів між клітиною і середовищем. Вони пов'язані з метаболічними процесами та фізіологічним станом клітин, а тому є чутливим показником змін у клітинах внаслідок патології.

Потенціал спокою виникає між зовнішньою і внутрішньою поверхнями мембрани в стані фізіологічного спокою, а потенціал дії — в стані порогового і надпорогового збудження клітини. В основі збудливості клітин, регуляції внутрішньоклітинних процесів, роботи нервової системи, регуляції м'язового скорочення лежить генерація і поширення електричних потенціалів.

Отже, органи, тканини, окремі клітини та їхні складові є електрично-активними, тобто процес їхнього функціонування супроводжується появою у

навколишньому середовищі змінного електричного поля, характеристики якого (різницю потенціалів, напруженість, зумовлені ним струми тощо) можна зареєструвати. Отриману інформацію використовують з діагностичною метою та з метою вивчення природи електричних явищ у біологічних тканинах. Реєстрацію різниці потенціалів між точками середовища, яке оточує електрично-активні тканини, називають електрографією, а графік залежності цієї різниці потенціалів від часу – електрограмою (ЕГ).

Електрографічний метод застосовують для клінічної діагностики серця (електрокардіографія), м'язів (електроміографія), головного мозку (електроенцефалографія), сітківки ока (електроретинографія) тощо. У медичній практиці найбільшого поширення набуло дослідження електричної активності серця – електрокардіографія. Сьогоднішній медичний працівник повинен добре розуміти біофізичні процеси, що протікають в організмі людини, а також знати можливості електронної апаратури, з якою він неминуче буде працювати.

В навчальному посібнику містяться матеріали до чотирьох тем, в яких крім теоретичних відомостей, містяться: контрольні запитання; тести для самоконтролю та самостійної роботи; приклади розв'язання практичних задач; задачі для самостійного розв'язування. Опис трьох лабораторних робіт допомагає студентам глибше засвоїти матеріал кожної теми; набути навиків роботи з електрокардіографом; отримувати за допомогою електронної моделі біомембрани криву електрозбудливості і визначати за нею такі діагностичні показники функціонального стану біотканини, як реобаза і хронаксія; досліджувати на різних тканинах рослинного походження дисперсію імпедансу - критерій життєздатності тканин і органів, який використовується для контролю життєздатності консервованих трансплантантів (шкіри, кісток, рогівок, крові та інших).

Навчальний посібник розраховано на студентів 1 курсу медичного і фармацевтичного факультетів.

Тема: СТРУКТУРНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ МЕМБРАН

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:

Актуальність теми:

Основу всіх біологічних мембран складає подвійний шар молекул ліпідів, з якими зв'язані молекули білків і вуглеводів. Незважаючи на те, що мембрани мають різний хімічний склад і виконують різні специфічні функції в різних клітинах, вони мають загалом універсальну будову і завжди виконують дві основні функції: слугують бар'єром для речовин та іонів і основою для мембранних ферментів, рецепторів та інших вмонтованих у мембрани білків.

Клітинна будова тканин дає змогу розмежовувати живе від неживого, аналізувати взаємодію клітин із середовищем і між собою, забезпечувати поділ вмісту клітини на окремі фази. Усі ці функції виконують біологічні мембрани.

Клітина – відкрита термодинамічна система, яка обмінюється речовиною, енергією й інформацією із середовищем. Транспортні процеси, що відбуваються в мембрані, регулюють об'єм клітини і підтримують її іонний склад у вузьких межах коливань, а це створює необхідні умови для прояву активності ферментів. Вони зумовлюють іонні градієнти, потрібні для виникнення мембранного потенціалу, підтримання збудливості, а також транспортування деяких молекул та іонів. Системи транспорту в мембрані екстрагують із середовища і концентрують у клітині речовини, що є джерелами енергії, а також необхідні для побудови компонентів клітини.

2. НАВЧАЛЬНІ ЦІЛІ:

Знати:

- Будову, функції і фізичні властивості біологічних мембран.
- Види транспорту речовин через біомембрани та закони, що їх характеризують.

Вміти:

- Аналізувати структурні елементи біомембран та їх фізичні властивості.
- Пояснювати механізми пасивного та активного транспорту речовин через мембранні структури клітин.
- Трактувати рівняння Фіка, Теорелла, Нернста-Планка.

3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДОАУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ

3.1. Теоретичні питання:

1. Будова та функції біологічних мембран. Моделі біологічних мембран.
2. Структура біологічних мембран. Рідинно-мозаїчна модель будови біомембран.
3. Транспорт речовин через біологічні мембрани. Види транспорту.
4. Види пасивного транспорту речовин через біологічну мембрану:
 - 4.1. Вільна дифузія нейтральних частинок через мембрану. Рівняння Фіка.
 - 4.2. Вільна дифузія іонів через мембрану. Електрохімічний потенціал і рівняння Теорелла. Рівняння Нернста-Планка. Білкові транспортні системи пасивного переносу.
 - 4.3. Полегшена дифузія речовини за допомогою переносників.
 - 4.4. Осмос. Фільтрація.
5. Активний транспорт речовин через біологічну мембрану. Натрій-калієвий насос. Ендоцитоз та екзоцитоз.

3.2. Зміст теми

1. Будова та функції біологічних мембран. Моделі біологічних мембран

Біологічними мембранами називають специфічно організовані поверхневі утворення клітин, які являють собою дуже тонкі плівки товщиною 6-10 нм.

Функції мембран:

- **структурна** – відділяє вміст клітини від зовнішнього середовища;
- **захисна** – захищає вміст клітини від небажаних впливів зовнішнього середовища;
- **транспортна** – перенесення речовин через мембранні пори, канали і за допомогою білків-переносників та везикул;
- **біокаталітична** – на мембрані знаходиться велика кількість різноманітних ферментів;
- **енергетична** – перетворюється, накопичується і витрачається енергія на різні потреби клітини;
- **рецепторна** – різні рецептори на мембрані сприймають впливи від зовнішнього середовища;
- **антигенна** – забезпечує імунний захист організму.

Основні групи речовин, з яких будується мембрана – **фосфоліпіди і білки**. Крім них в різній кількості можуть бути присутні вуглеводні сполуки, неорганічні іони, вода. В різних мембранах співвідношення між основними компонентами коливається в середньому від 4:1 до 1:4. Наприклад, в мієліні воно дорівнює 50% на 50%, а в мембранах мітохондрій фосфоліпіди складають 90%.

Хімічний склад фосфоліпідів зображено на рис. 1.

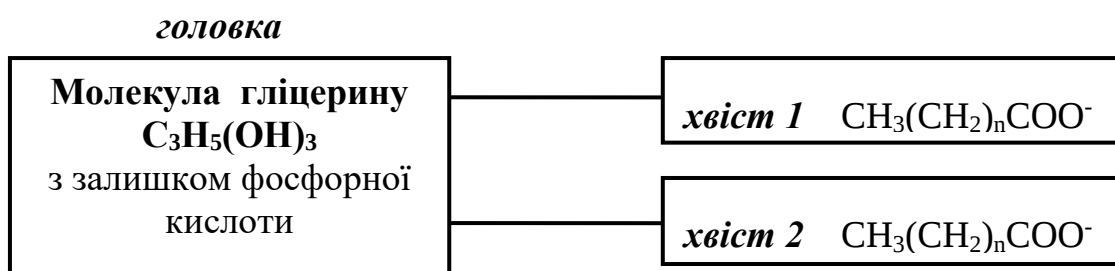


Рис. 1

$C_3H_5(OH)_3$ – молекула гліцерину з залишком фосфорної кислоти – головка ліпиду.

$CH_3(CH_2)_nCOO^-$ – молекули жирної кислоти – хвости ліпиду.

Головка займає $1/4$ довжини фосфоліпиду (l), хвости – $3/4$ l . Головки і хвости ліпідів характеризуються різними фізико-хімічними властивостями: головки – полярні гідрофільні, хвости – гідрофобні неполярні.

Оскільки товщина мембрани декілька нанометрів, тому її побачити можливо тільки за допомогою електронного мікроскопу.

Вивчення будови мембрани та її властивостей стало можливим при використанні фізико-хімічної моделі мембрани (*штучної мембрани*). Найбільшого розповсюдження отримали три моделі:

- *перша модель – моношар фосфоліпідів* на межі поділу вода-повітря або вода-масло (рис. 3);
- *друга модель – біліпідна (бішарова ліпідна) мембрана*, яка дозволила вивчати деякі властивості біомембран прямими методами (рис. 2);
- *третья модель – ліпосоми* – мілкі кульки (везикули), які складаються з біліпідної мембрани й отримані при обробці суміші води та фосфоліпідів ультразвуком.



Рис.2

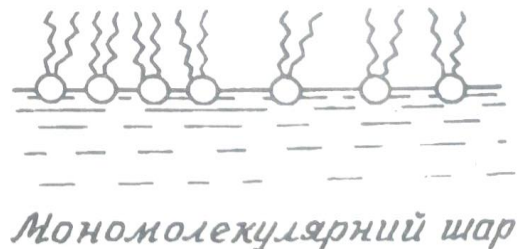


Рис. 3

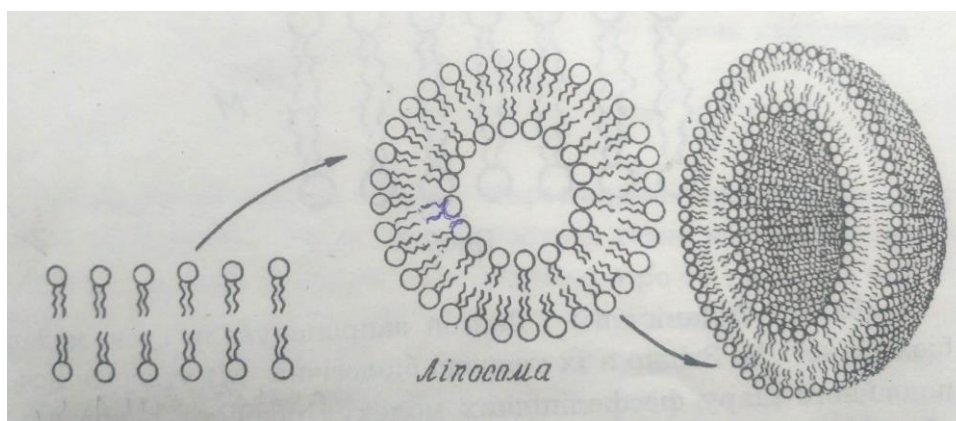


Рис. 4

До сучасних методів дослідження біологічних мембран відносяться: електронна мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, електронний парамагнітний резонанс, мікроколориметрія та ін.

2. Структура біологічних мембран. Рідинно-мозаїчна модель будови біомембран

Сукупність результатів, які були отримані за допомогою відповідних фізичних і хімічних методів дослідження, дала можливість запропонувати рідинно-мозаїчну модель будови біологічної мембрани (рис. 5).

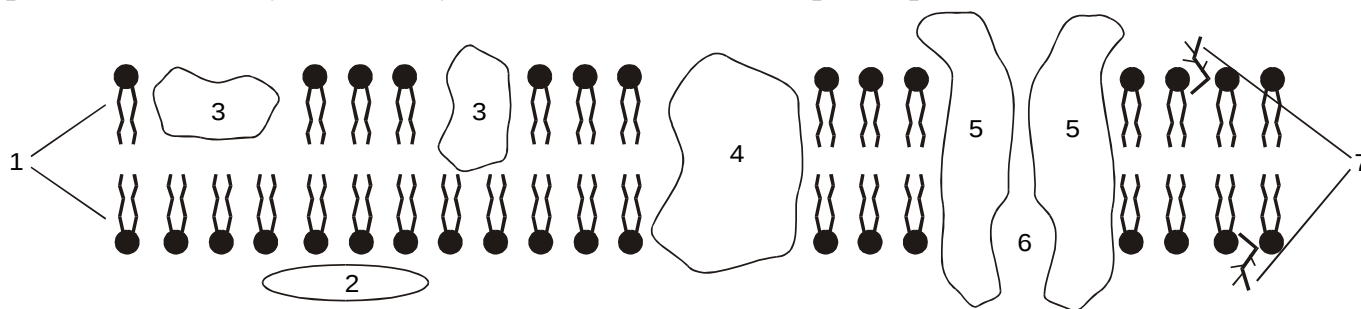


Рис. 5

Складові біологічної мембрани:

1. фосфоліпідний бішар;
2. поверхневий білок;
3. напівінтегральні білки;
4. інтегральний білок;
5. білок з іонним каналом;
6. іонний канал;
7. вуглеводні сполуки - вуглеводи, прикріплені до ліпідів або білків (вони знаходяться на зовнішній поверхні плазматичної мембрани). Ці вуглеводні комплекси допомагають клітині зв'язувати речовини, які потрібні клітині в позаклітинній рідині.

Мембрани є рухомими структурами. Ліпіди і білки обмінюються місцями і переміщуються як вздовж площини мембрани (латеральна дифузія), так і поперек (рухи “фліп-флоп”).

3. Транспорт речовин через біологічні мембрани. Види транспорту.

Живі системи на всіх рівнях організації – відкриті системи, тому транспорт речовин через біологічні мембрани – необхідна умова життя. З переносом

речовин через мембрану пов'язані процеси метаболізму клітин, біоенергетичні процеси, утворення біопотенціалів, генерація нервових імпульсів та ін. Лікування майже завжди пов'язане з проникненням ліків через мембрану і ефективність лікарського препарату в значній мірі залежить від проникності мембрани для даного препарату.

Розглянемо основні види транспорту речовин через біологічну мембрану:



Рис. 3

- **пасивний** транспорт - спонтанне переміщення речовини з області більш високої концентрації в область меншої концентрації, без затрат енергії, проти відповідного градієнту (градієнту концентрації для нейтральних частинок і градієнту електрохімічного потенціалу для заряджених частинок);
- **активний** транспорт потребує затрат енергії АТФ та участі іонних насосів (АТФаз) або везикул.

4 Види пасивного транспорту речовин через біологічну мембрану

Існують декілька видів **пасивного** транспорту речовин через мембрану (рис.7).

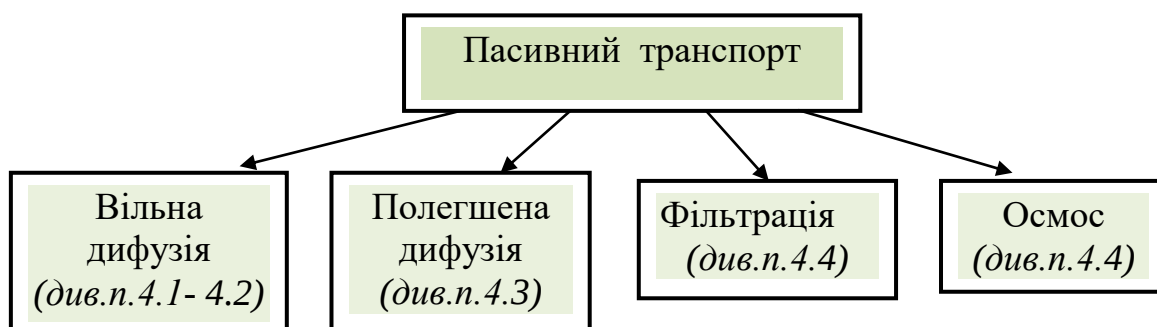


Рис. 7

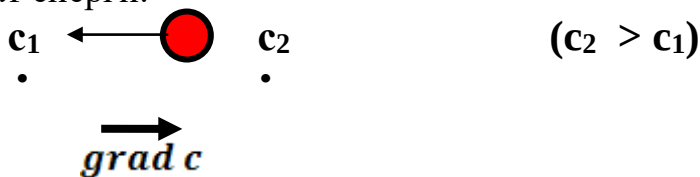
Кожна окрема речовина в середовищі (клітинна чи позаклітинна рідина) має свій градієнт концентрації, незалежний від градієнтів концентрації інших матеріалів. Крім того, кожен тип молекул дифундує відповідно до власного градієнта концентрації.

На швидкість дифузії впливає кілька факторів:

- *Величина градієнта концентрації*: чим більша різниця в концентрації, тим швидша дифузія.
- *Маса дифундуючих молекул*: більш масивні молекули рухаються повільніше, тому що їм складніше переміщатися між молекулами речовини, через які вони рухаються.
- *Температура*: більш високі температури збільшують енергію молекул, збільшуючи швидкість дифузії.
- *Щільність розчинника*: зі збільшенням щільності розчинника швидкість дифузії зменшується. Рух молекул сповільнюється, оскільки їм важче пробиратися через більш щільне середовище.

4.1. Вільна дифузія нейтральних частинок через мембрану. Рівняння Фіка

Вільна (проста) дифузія нейтральних частинок – самовільне переміщення цих частинок з ділянки, де їх концентрація c_2 більша, до ділянки з меншим значенням концентрації c_1 , тобто проти градієнта концентрації, без затрат енергії.



Рухомою силою вільної дифузії *нейтральних частинок* є градієнт концентрації:

$$\text{grad } c = \frac{dc}{dx}$$

Речовини, які добре розчинні в ліпідах, проникають в клітину через *ліпідний шар і ліпідні канали* (рис. 8) завдяки вільній дифузії. Наприклад, кисень (потрібний клітині при диханні) та вуглекислий газ у розчині швидко дифундують крізь мембрани.

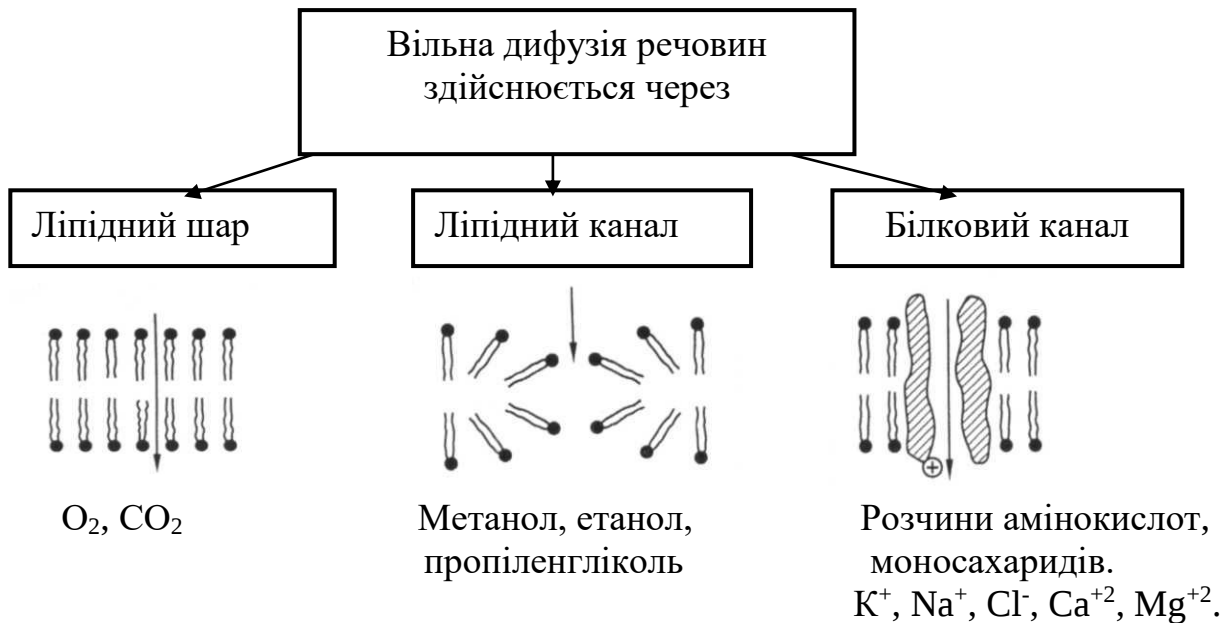


Рис. 8

Речовини, які не розчинні в ліпідах, транспортуються через іонні канали, що утворені в мембрані білками, або за допомогою білків-переносників.

Вільна дифузія нейтральних частинок описується рівнянням Фіка:

$$J_m = -D \frac{dc}{dx}, \quad (1)$$

де J_m – густина потоку речовини (маса речовини, яка переноситься за одиницю часу через одиницю площі: $J_m = \frac{m}{S \cdot t}$);

$\frac{dc}{dx}$ – градієнт концентрації;

D – коефіцієнт дифузії, який визначається за формулою: $D = u \cdot R \cdot T$

(u – рухливість частинок речовини, R – універсальна газова стала,

T – абсолютна температура).

Рівняння Фіка для транспорту нейтральних частинок через біологічну мембрану має вигляд:

$$J_m = -P(C_1 - C_2), \quad (2)$$

де C_1 і C_2 - концентрації речовини в розчинах з обох сторін мембрани;

P - коефіцієнт проникності мембрани для даної речовини.

4.2. Вільна дифузія іонів через мембрану. Електрохімічний потенціал і рівняння Теорелла. Рівняння Нернста-Планка. Білкові транспортні системи пасивного переносу.

Вільна дифузія заряджених частинок (іонів) – самовільне переміщення іонів з ділянки, де їх концентрація більша, до ділянки з меншим значенням концентрації, тобто проти градієнта електрохімічного потенціалу, без затрат енергії.

Рухомою силою пасивного переносу заряджених частинок через мембрану є градієнт електрохімічного потенціалу, який враховує не тільки їх концентрацію, але й заряд.

Електрохімічний потенціал для розбавлених розчинів іонів дорівнює:

$$\mu = \mu_0 + RT \ln C + ZF\phi, \quad (3)$$

де μ_0 – стандартний хімічний потенціал;

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура;

C – концентрація;

Z – заряд іону;

ϕ – потенціал електричного поля.

Густина потоку заряджених частинок через мембрану описується рівнянням Теорелла:

$$J_m = -uC \frac{d\mu}{dx}, \quad (4)$$

де u – рухливість іонів;

$\frac{d\mu}{dx}$ – градієнт електрохімічного потенціалу.

З останніх двох рівнянь при $\mu_0 = \text{const}$ можна отримати рівняння Нернста-Планка:

$$J_m = -uRT \frac{dc}{dx} - uCZF \frac{d\varphi}{dx}, \quad (5)$$

де F – постійна Фарадея;

$\frac{d\varphi}{dx}$ - градієнт електричного потенціалу.

Іони електролітів проходять через мембрану крізь ліпідні і білкові пори. Існує багато видів білкових транспортних систем пасивного переносу. Найчастіше зустрічаються тунельні білки з транспортними каналами, які мають відповідну селективність до різних фізико-хімічних факторів як самих транспортованих речовин, так і оточуючого середовища. Наприклад, до таких транспортних систем відносяться:

- білки з каналами, селективними по розміру (діаметру) молекули чи іона. Через такі канали проходять всі молекули або іони, діаметр яких менший, ніж діаметр самого каналу (так можуть дифундувати через мембрану іони K^+ , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , а також молекули неелектролітів;
- білки з каналами, що керуються за рахунок хімічних зв'язків певних речовин, які називаються лігандами. Наприклад, ліганд ацетилхолін відкриває канал для дифузії іонів K^+ і Na^+ ;
- білки з каналами, які керуються електричним полем мембрани. В цих білках канали відкриваються тільки в момент зміни електричного поля мембрани. Таким чином можуть дифундувати, наприклад, іони Ca^{2+} .

4.3. Полегшена дифузія речовини за допомогою переносників

В деяких випадках було виявлено, що швидкість переносу речовин була значно більшою, ніж вирахована за вищенаведеними рівняннями. Так було знайдено ще один вид пасивного транспорту через мембрану, який отримав назву **полегшеної дифузії**. Полегшена дифузія, як і вільна, здійснюється проти градієнта концентрації і без затрат енергії. На відміну від вільної дифузії полегшена дифузія відбувається за участю молекул речовини-переносника. Вони

забезпечують переміщення через мембрану таких молекул, які самі по собі не можуть дифундувати через мембрану.

Полегшена дифузія відрізняється від вільної рядом особливостей:

- висока *специфічність*, яка зумовлена здібністю переносників відрізняти близькі по структурі молекули. Наприклад, білок – переносник глюкози не транспортує лактозу;
- наявність *феномена насичення*: при збільшенні концентрації речовини її потік через мембрану збільшується тільки до деякої межі, яка визначається активністю системи перенесення. Далі потік перестає залежати від концентрації;
- *чутливість до специфічних речовин-інгібіторів*, які конкурують з речовиною, що транспортується, за зв'язок з молекулами-переносниками.

Виділяють три види переносників (рис. 9):

- ♦ *Переносники першого типу* – це **рухомі переносники**, які підхоплюють відповідний іон (або нейтральну молекулу речовини) на поверхні мембрани, протягують його через фосфоліпідний бішар і відпускають по іншу сторону, а назад повертаються порожняком або з іншою речовиною. Працюють вони по типу малої або великої каруселі. Наприклад, так валіноміцин транспортує іони K^+ .
- ♦ *Переносники 2-го типу* – це **нерухомі молекули-переносники**, які фіксовані певним чином поперек мембрани і створюють спеціальні швидкісні пори. При цьому молекула речовини, що переноситься, передається від одної молекули-переносника до іншої, як в естафеті. Наприклад, представником переносників цього типу є антибіотик грамідіцин.
- ♦ *Третім типом переносників є інтегральні білки*, що вбудовані в плазматичну мембрану і мають там певну орієнтацію. Вони транспортують речовину через мембрану, змінюючи свою структуру (конформацію), ці конформаційні зміни структури білка є зворотними.

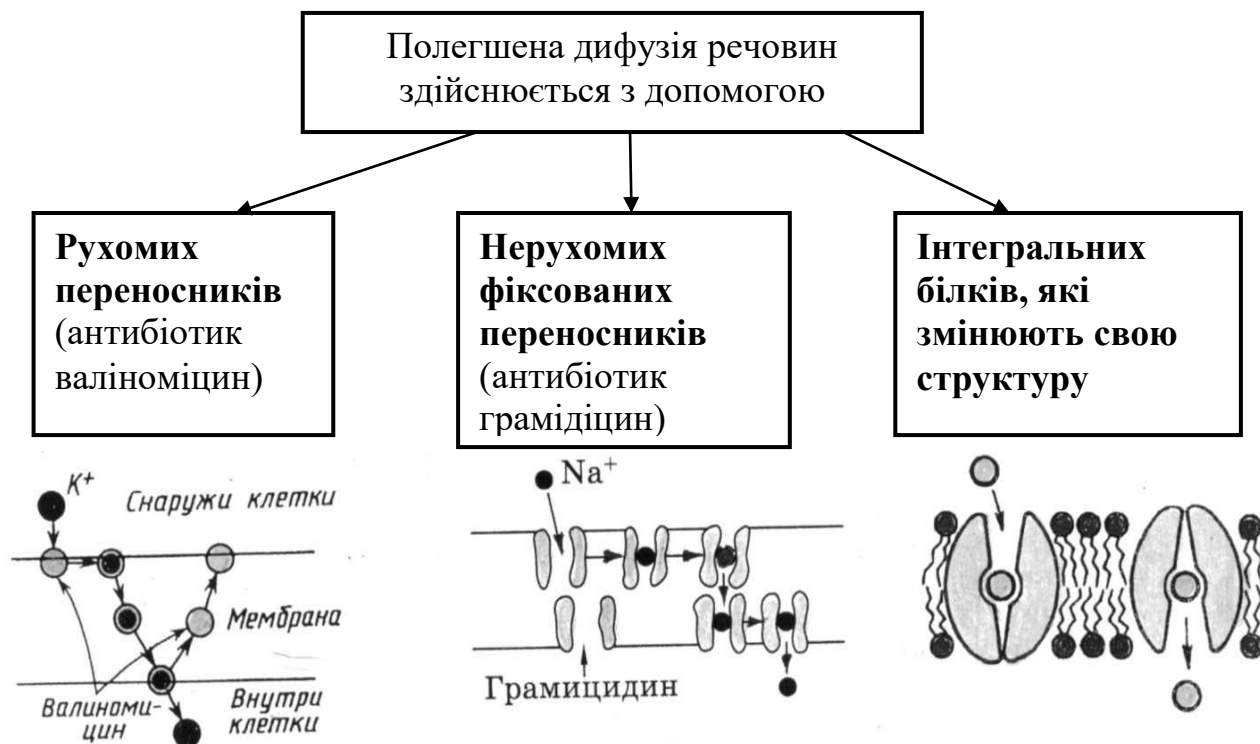


Рис. 9

4.4. Осмос. Фільтрація.

Осмос – вільна дифузія води крізь напівпроникну мембрану з розчину, який має меншу концентрацію розчиненої речовини у розчин з більшою концентрацією (рис. 10). Тиск на мембрану, що виникає при цьому, називається осмотичним. Усі живі клітини здатні регулювати осмотичний тиск, змінюючи концентрацію речовин поза клітиною та всередині клітини. Це явище відіграє велику роль в багатьох біологічних процесах, наприклад гемоліз еритроцитів в гіпотонічних розчинах.

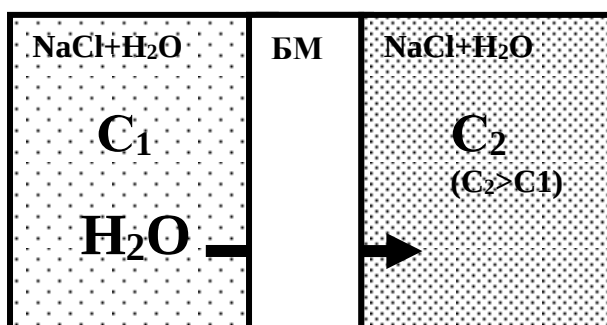


Рис. 10. Вода рухається в сторону більшої концентрації розчину NaCl.

Фільтрація – рух розчину речовини через пори в мембрані під дією градієнту тиску. Наприклад, клубочкова фільтрація. Вона бере участь в сечоутворенні. Внаслідок особливих умов ниркового кровообігу тиск у капілярах клубочків вищий, ніж у капілярах будь-якого іншого органа і досягає приблизно 70 мм рт. ст. Колоїдно-осмотичний тиск білків плазми не перевищує 30 мм рт. ст. За рахунок різниці між гідростатичним і онкотичним тиском частина води плазми разом із усіма розчиненими речовинами відокремлюється від високомолекулярних плазмових білків. Ця відфільтрована фракція становить близько $\frac{1}{5}$ усієї кількості плазми, що проходить через гломерули.

5. Активний транспорт речовин через біологічну мембрану.

Натрій-калієвий насос. Ендоцитоз та екзоцитоз.

Активний транспорт речовин через біологічну мембрану здійснюється із затратою енергії АТФ та за участю мембранних білків АТФаз (іонних насосів) або везикул (рис.11).

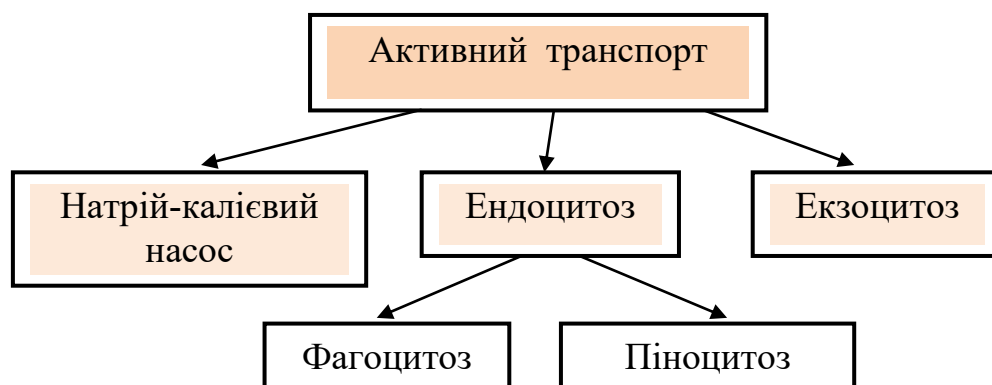


Рис.11

Найбільш поширеними в клітині людини є H^+ -АТФаза, Na^+ , K^+ -АТФаза і Ca^{2+} -АТФаза, що являють собою цілі мембранні комплекси із складною структурою. Функціональне значення біологічних насосів полягає у підтримці всередині клітини постійного іонного складу.

Найбільш вивченими і дуже важливими для розуміння багатьох процесів, які відбуваються у тканинах і органах, є системи активного переносу під назвою

натрій-калієвих насосів (переносник Na^+ , K^+ -АТФаза). Такі насоси сприяють виведенню за один цикл трьох іонів натрію Na^+ з клітини та надходженню двох іонів калію K^+ до клітини за допомогою енергії АТФ.

Розглянемо детально роботу натрій-калієвого насоса: при підвищенні концентрації іонів натрію в клітині збільшується ймовірність зустрічі іона Na^+ і АТФ на поверхні білка. В результаті цього від'єднується один залишок фосфорної кислоти і за рахунок звільненої при цьому енергії три іони Na^+ ідуть з клітини назовні, а два іони K^+ заходять в клітину, причому останній з них від'єднує залишок фосфорної кислоти від білка. Після цього білкові канали закриваються. Все це відбувається у присутності іону Mg^{2+} , роль якого невідома.

Ендоцитоз і екзоцитоз – везикулярний транспорт речовин (за допомогою везикул), пов'язаний із зворотніми конформаційними змінами структури самої мембрани. Ці процеси відбуваються із затратою енергії АТФ.

При ендоцитозі плазматична мембрана охоплює частину своєї позаклітинної рідини (включаючи розчинений в ній матеріал) і утворює вирости, які відщипуються, утворюючи внутрішньоклітинні пухирці (везикули), що містять захоплений клітиною матеріал, - цей процес відбувається із затратою енергії АТФ. Загальна схема ендоцитозу зображена на рис. 12.

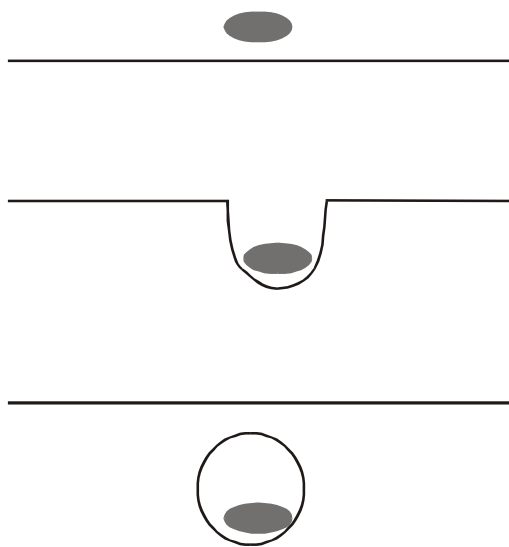


Рис. 12

Існує два основних види ендоцитозу: фагоцитоз і піноцитоз.

- **Фагоцитоз** (клітинне харчування) - це захоплення і поглинання клітиною великих молекул органічних речовин, а також великих твердих часток інших речовин (іноді цілих клітин або їхніх частин), які в мембранній упаковці занурюються в цитоплазму. Наприклад, шляхом ендоцитозу відбувається всмоктування жиру клітинами кишкового епітелію.
- **Піноцитоз** (клітинне пиття) - це процес надходження краплин рідини в клітину через плазматичну мембрану. Цей процес подібний до фагоцитозу: краплина рідини занурюється в цитоплазму в мембранній упаковці і потім під дією ферментів перетравлюється.

Екзоцитоз — це процес виведення з клітини різноманітних речовин крізь мембрану за допомогою везикул із затратою енергії АТФ (механізм цього процесу зворотний ендоцитозу). Шляхом екзоцитозу вивільнюються гормони, жирові краплини, а також медіатори в синапсах при збудженні.

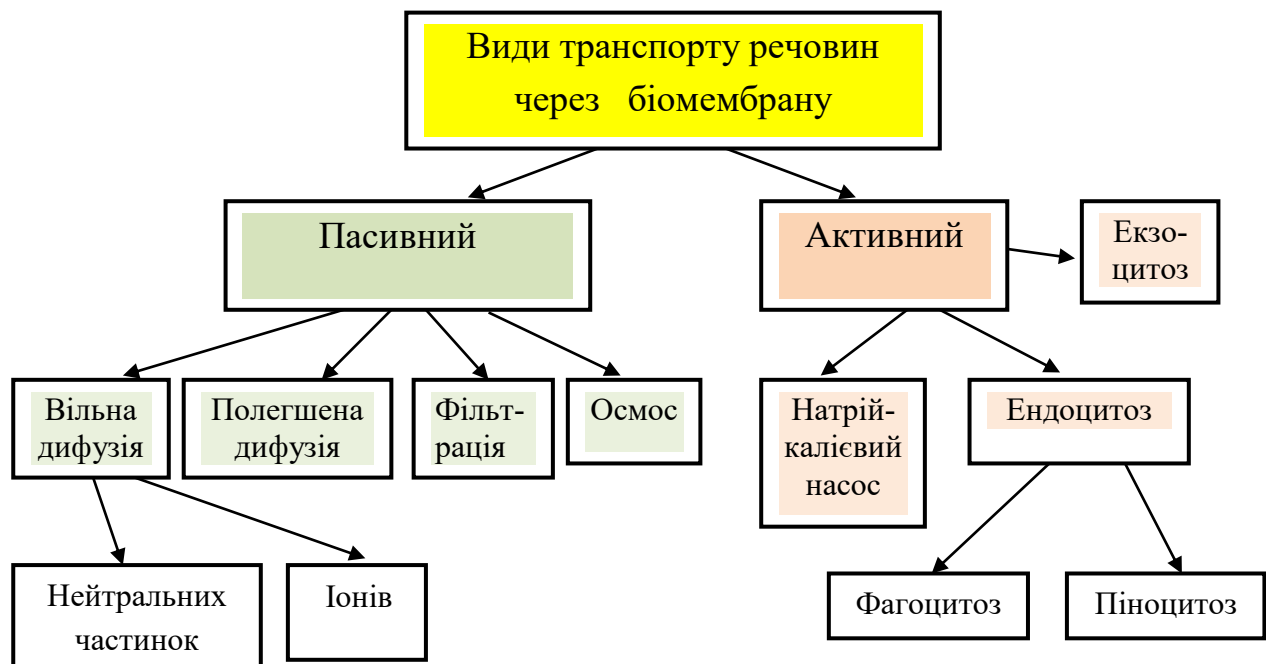
3.3. Перелік основних термінів, характеристик, законів, які повинен засвоїти студент при підготовці до заняття.

Пасивний транспорт речовини	Пасивний транспорт речовини відбувається без затрат енергії проти відповідного градієнту (градієнту концентрації для нейтральних частинок і градієнту електрохімічного потенціалу для заряджених частинок). Тобто, при пасивному транспорті речовини спонтанно переміщуються з області більш високої концентрації в область меншої концентрації
Дифузія нейтральних частинок	Дифузія нейтральних частинок здійснюється проти градієнта концентрації без затрат енергії.
Дифузія заряджених частинок	Дифузія заряджених частинок здійснюється проти градієнта електрохімічного потенціалу без затрат енергії.

Полегшена дифузія	Полегшена дифузія здійснюється проти градієнта концентрації без затрат енергії і за участю молекул речовини-переносника.
Осмоз	Осмоз – вільна дифузія води крізь напівпроникну мембрану з розчину, який має меншу концентрацію розчиненої речовини у розчин з більшою концентрацією.
Активний транспорт	Активний транспорт речовин через біологічну мембрану здійснюється за градієнтом концентрації із затратою енергії АТФ та за участю мембранних білків АТФаз (іонних насосів).
Ендоцитоз	Ендоцитоз – це процес захоплення мембраною молекул речовини зовні клітини (утворюється везикула) і перенесення їх всередину – все це відбувається із затратою енергії АТФ.
Екзоцитоз	Екзоцитоз – це процес захоплення мембраною молекул речовини в середині клітини (утворюється везикула) і перенесення їх назовні - все це відбувається із затратою енергії АТФ.
Фільтрація	Фільтрація – рух розчину речовини через пори в мембрані під дією градієнту тиску.
Ліпосома	Ліпосома – замкнута сферична структура, стінка якої є подвійним шаром фосфоліпідів.
Рівняння Фіка для вільної дифузії нейтральних частинок	Густина потоку нейтральних частинок описується рівнянням Фіка: $J_m = -D \frac{dc}{dx}$
Рівняння Фіка для вільної дифузії нейтральних частинок через мембрану	Густина потоку нейтральних частинок <u>через мембрану</u> описується рівнянням Фіка: $J_m = -P(C_1 - C_2)$

Рівняння Теорелла	Густина потоку заряджених частинок через мембрану описується рівнянням Теорелла: $J_m = -uC \frac{d\mu}{dx}$
Рівняння Нернста-Планка	Густина потоку заряджених частинок через мембрану (при $\mu_0 = \text{const}$) описується рівнянням Нернста-Планка: $J_m = -uRT \frac{dc}{dx} - uCZF \frac{d\varphi}{dx}$

ДОДАТОК ДО ТЕМИ



3.4. Приклади розв'язування задач

Задача 1. Чому дорівнює густина потоку формаміду, якщо його коефіцієнт дифузії складає $1,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$, а градієнт концентрації - $0,225 \cdot 10^3 \frac{\text{моль}}{\text{л} \cdot \text{см}}$?

Дано:

$$\frac{dc}{dx} = 0,225 \cdot 10^3 \frac{\text{моль}}{\text{л} \cdot \text{см}}$$

$$D = 1,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

J - ?

Розв'язання:

Згідно з законом Фіка густина потоку формаміду

дорівнює:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

Підставимо дані в рівняння (1):

$$J = 1,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{см}^2}{\text{с}} \cdot 0,225 \cdot 10^3 \frac{\text{моль}}{\text{л} \cdot \text{см}} = 3,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{моль} \cdot \text{см}}{\text{л} \cdot \text{с}}.$$

$$\text{Відповідь: } J = 3,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{моль} \cdot \text{см}}{\text{л} \cdot \text{с}}$$

Задача 2. Різниця концентрацій речовини всередині і зовні деякої клітини дорівнює $\Delta c = 45$ ммоль/л, густина потоку - $J = 25 \frac{\text{моль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$. Визначити коефіцієнт проникності мембрани.

Дано:

$$J = 25 \frac{\text{моль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

$$\Delta c = 45 \frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$$

P - ?

Розв'язання:

Із рівняння Фіка: $J = P \cdot \Delta c$ маємо:

$$P = \frac{J}{\Delta c} = \frac{25}{45} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 0,55 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\text{Відповідь: } P = 0,55 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

3.5. Розв'язати задачі:

Задача 1. Обчислити коефіцієнт проникності мембрани, густина потоку речовини через яку дорівнює: $J = 5 \frac{\text{моль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$. Концентрація речовини всередині клітини $c_1 = 18 \frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$, а зовні - $c_0 = 3 \cdot \frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$.

$$\text{Відповідь: } P = 0,33 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Задача 2. Чому дорівнює густина потоку метиленового синього через бішарову ліпідну мембрану, якщо його концентрація з однієї сторони мембрани $100 \frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$, а з другої - $40 \frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$ л? Коефіцієнт проникності мембрани дорівнює: 0,43м/с.

Відповідь: $J = 25,8 \frac{\text{моль}}{\text{м}^2 \text{с}}$.

3.6. Завдання для самоконтролю (тести):

1. Які елементи фосфоліпідів – полярні і гідрофільні?
 - а) білки;
 - б) вуглеводи;
 - в) головки фосфоліпідів;
 - г) хвости фосфоліпідів.
2. Які елементи фосфоліпідів – неполярні і гідрофобні?
 - а) вуглеводи;
 - б) хвости фосфоліпідів;
 - в) білки;
 - г) головки фосфоліпідів.
3. При звичайній для клітини температурі ліпідний шар знаходиться в:
 - а) рідкому стані;
 - б) твердому стані;
 - в) кристалічному стані;
 - г) рідко-кристалічному стані.
4. Що є рушійною силою пасивного транспорту нейтральних молекул через мембрану?
 - а) різниця потенціалів;
 - б) градієнт концентрації;
 - в) градієнт тиску;
 - г) енергія АТФ.
5. Як називається транспорт речовин за допомогою білків-переносників?
 - а) фільтрація;
 - б) активний;
 - в) полегшена дифузія;
 - г) осмос.

6. Закон Фіка для пасивного транспорту нейтральних частинок через мембрану:

а) $J = -P(c_1 - c_2)$;

б) $J = -D(c_1 - c_2)$;

в) $J = -D(c_1 + c_2)$;

г) $J = -P(c_1 + c_2)$.

7. Як називається транспорт речовин, що здійснюється через мембрану із затратою енергії АТФ?

а) активний;

б) пасивний;

в) фільтрація;

г) ендоцитоз.

8. Як називається транспорт іонів, що здійснюється через мембрану проти градієнту електрохімічного потенціалу без затрат енергії?

а) вільна дифузія;

б) активний;

в) фільтрація;

г) осмос.

Вірні відповіді: 1–в; 2–б; 3–в; 4–б; 5–в; 6–а; 7–а; 8–а.

4. ЛІТЕРАТУРА

1. Чалий О.В. Медична і біологічна фізика. – К.: 2005.– § 5.3 - 5.4 (с. 384-402).
2. Ємчик Л.Ф., Кміт Я.М. Медична і біологічна фізика. – Л.: Світ, 2003.– Розділ 6. §§ 6.1 – 6.6 (с.171 - 190).

Тести для перевірки кінцевого рівня знань

1. Товщина біологічної мембрани дорівнює:
а) 60-100 нм; б) 6-100 нм; в) 6-10 нм; г) 1-10 нм.
2. З яких основних речовин складаються біологічні мембрани?
а) вуглеводні сполуки, неорганічні іони, вода;
б) вода і білки;
в) неорганічні іони і фосфоліпіди;
г) фосфоліпіди і білки.
3. Які речовини в невеликій кількості можуть бути присутні в біологічних мембранах?
а) вуглеводні сполуки, неорганічні іони, вода;
б) вода і білки;
в) неорганічні іони і фосфоліпіди;
г) фосфоліпіди і білки.
4. Які функції виконують біомембрани в клітині?
а) бар'єрну і біокаталітичну;
б) транспортну і енергетичну;
в) рецепторну і контактну;
г) всі відповіді правильні.
5. Фосфоліпід біологічної мембрани, що має розмір l_o , складається із головки і 2-х хвостів. Який розмір головки фосфоліпіда?
а) $l_{гол.} = 1/4 l_o$
б) $l_{гол.} = 1/2 l_o$
в) $l_{гол.} = 4/3 l_o$
г) $l_{гол.} = 3/4 l_o$
6. Фосфоліпід біологічної мембрани, що має розмір l_o , складається із головки і 2-х хвостів. Який розмір хвостів фосфоліпіда?
а) $l_{гол.} = 1/4 l_o$
б) $l_{гол.} = 1/2 l_o$
в) $l_{гол.} = 4/3 l_o$
г) $l_{гол.} = 3/4 l_o$

7. Які впорядковані структури можуть створювати фосфоліпіди у водному середовищі під впливом ультразвуку?
- а) моношар ліпідів;
 - б) бішар ліпідів;
 - в) ліпосому;
 - г) всі відповіді правильні.
8. Замкнута сферична структура, стінка якої є подвійним шаром фосфоліпідів – це:
- а) ліпосома;
 - б) бішар ліпідів;
 - в) міцела;
 - г) всі відповіді правильні.
9. Вільна дифузія молекул речовини здійснюється:
- а) без затрат енергії за градієнтом концентрації;
 - б) без затрат енергії проти градієнту концентрації;
 - в) із затратами енергії за градієнтом електрохімічного потенціалу;
 - г) із затратами енергії проти градієнту електрохімічного потенціалу.
10. Що є рухомою силою вільної дифузії нейтральних частинок?
- а) градієнт концентрації;
 - б) градієнт електричного потенціалу;
 - в) осмотичний градієнт;
 - г) градієнт електрохімічного потенціалу.
11. Що є рухомою силою вільної дифузії заряджених частинок?
- а) градієнт тиску;
 - б) градієнт електричного потенціалу;
 - в) осмотичний градієнт;
 - г) градієнт електрохімічного потенціалу.
12. Як називається транспорт нейтральних частинок через мембрану без затрат енергії, зумовлений градієнтом концентрації?
- а) фільтрація;
 - б) активний;
 - в) ендоцитоз;
 - г) вільна дифузія.

13. Пасивний транспорт частинок через мембрану здійснюється:

- а) проти градієнта концентрації без затрат енергії;
- б) за градієнтом концентрації без затрат енергії;
- в) проти градієнта концентрації із затратою енергії; ;
- г) за градієнтом концентрації із затратою енергії. .

14. Що є рухомою силою полегшеної дифузії частинок через мембрану?

- а) градієнт концентрації;
- б) градієнт електричного потенціалу;
- в) градієнт тиску;
- г) градієнт електрохімічного потенціалу.

15. Як називається явище руху частинок із області більшої їх концентрації в область меншої концентрації без затрат енергії?

- а) активний транспорт;
- б) пасивний транспорт;
- в) ендоцитоз;
- г) екзоцитоз.

16. Вкажіть рівняння Фіка для вільної дифузії неелектролітів:

- а) $J_m = -D \frac{dc}{dx}$;
- б) $J_m = -u C \frac{d\mu}{dx}$;
- в) $J_m = -P(C_1 - C_2)$;
- г) $J_m = -D \frac{dc}{dt}$.

17. Вкажіть рівняння Фіка для біомембрани:

- а) $J_m = -D \frac{dc}{dx}$;
- б) $J_m = -u C \frac{d\mu}{dx}$;
- в) $J_m = -P(C_1 - C_2)$;
- г) $J_m = -D \frac{dc}{dt}$.

18. Фільтрація – це процес транспорту речовини крізь пори в мембрані під дією:

- а) градієнту тиску;

- б) градієнту концентрації;
- в) градієнту маси;
- г) градієнту швидкості.

19. Вкажіть рівняння Теорелла:

- а) $J_m = -D \frac{dc}{dx}$;
- б) $J_m = -u C \frac{d\mu}{dx}$;
- в) $J_m = -uRT \frac{dc}{dx} - uCZF \frac{d\varphi}{dx}$;
- г) $J_m = -u C \frac{d\mu}{dt}$.

20. Вкажіть і сформулюйте рівняння Нернста-Планка:

- а) $J_m = -D \frac{dc}{dx}$;
- б) $J_m = -u C \frac{d\mu}{dx}$;
- в) $J_m = -uRT \frac{dc}{dx} - uCZF \frac{d\varphi}{dx}$;
- г) $J_m = -u C \frac{d\mu}{dt}$.

21. Рівняння Теорелла: $J = -uC \frac{d\mu}{dx}$. Як називається величина μ в цьому рівнянні?

- а) електрохімічний потенціал;
- б) молярна маса;
- в) хімічний потенціал;
- г) електричний потенціал.

22. Як називається транспорт речовин за допомогою білків-переносників?

- а) полегшена дифузія;
- б) активний;
- в) фільтрація;
- г) вільна дифузія.

23. Яке співвідношення іонів Na^+ , що виходять з клітини, і іонів K^+ , що входять в клітину, при одному циклі роботи натрій-калієвого насоса:

а) 1 : 3; б) 2 : 1; в) 3 : 2; г) 2 : 3.

24. Великі молекули і частинки речовини можуть проникати в клітину внаслідок:

- а) екзоцитозу;
- б) дифузії;
- в) ендоцитозу;
- г) фільтрації.

25. Порівняно з вільною дифузією при полегшеній дифузії перенесення речовин через мембрану відбувається:

- а) з великими енергетичними затратами;
- б) з більшою швидкістю;
- в) з меншою швидкістю;
- г) за допомогою везикул.

26. Рух розчину речовини через пори в мембрані під дією градієнту тиску – це:

- а) екзоцитоз;
- б) дифузія;
- в) ендоцитоз;
- г) фільтрація.

27. Дифузія молекул розчинника через напівпроникну мембрану – це:

- а) екзоцитоз;
- б) дифузія;
- в) ендоцитоз;
- г) осмос.

28. Везикулярний транспорт речовин – це:

- а) екзоцитоз;
- б) фагоцитоз і піноцитоз;
- в) ендоцитоз;
- г) всі відповіді правильні.

29. Якою системою з точки зору термодинаміки є жива клітина?

- а) закритою;
- б) відкритою;
- в) ізольованою;
- г) всі відповіді правильні.

30. На рис. 1 подана рідкокристалічна модель мембрани. Вказати назву структурних елементів 1, 3, 4:

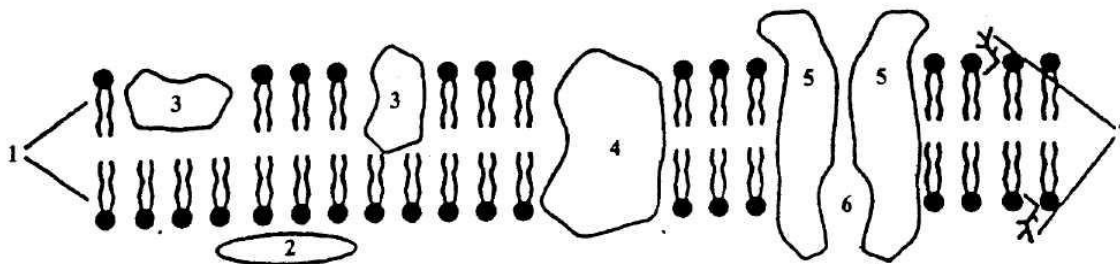


Рис.1.

- | | | |
|-------------------|---------------------------|----------------------|
| а) 1–фосфоліпіди; | 3–напівінтегральні білки; | 4–інтегральні білки; |
| б) 1–фосфоліпіди; | 3–білки; | 4–вуглеводи; |
| в) 1–білки; | 3– вуглеводи; | 4–фосфоліпіди. |

31. На рис. 1 подана рідкокристалічна модель мембрани. Вказати назву структурних елементів 2, 6, 7:

- | | | |
|---------------------------|-------------------|------------------------|
| а) 2 – периферичні білки; | 6 – канал (пора); | 7 – вуглеводи; |
| б) 2 – глікопротеїни; | 6 – канал (пора); | 7 – інтегральні білки; |
| в) 2 – гліколіпіди; | 6 – канал (пора); | 7 – вуглеводи. |

32. Які речовини попадають в клітину за допомогою вільної дифузії?

- а) вода;
 б) білки, вуглеводи;
 в) кисень, вуглекислий газ, деякі лікарські препарати.

33. Які речовини попадають в клітину за допомогою активного транспорту?

- а) вуглекислий газ; б) іони K^+ ; в) вода.

34. Секретуючі клітини виділяють різні продукти (нервові терміналі - медіаторні речовини, клітини травних залоз – ферменти, ендокринні клітини – гормони) завдяки:

- а) екзоцитозу; б) ендоцитозу; в) дифузії.

Тема: ВИВЧЕННЯ МЕМБРАННИХ ПОТЕНЦІАЛІВ СПОКОЮ ТА ДІЇ.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:

Актуальність теми:

Під час функціонування клітин і тканин виникають електричні поля, енергетичною характеристикою яких є різниця потенціалів (біоелектричні потенціали). Біопотенціали – це переважно потенціали, зумовлені нерівномірним розподілом іонів між клітиною і середовищем. Вони пов'язані з метаболічними процесами та фізіологічним станом клітин, а тому є чутливим показником змін у клітинах внаслідок патології.

Потенціал спокою виникає між зовнішньою і внутрішньою поверхнями мембрани в стані фізіологічного спокою, а потенціал дії – в стані порогового і надпорогового збудження клітини. В основі збудливості клітин, регуляції внутрішньоклітинних процесів, роботи нервової системи, регуляції м'язового скорочення лежить генерація і поширення електричних потенціалів.

Електрична активність – це властивість живої матерії. Тому вивчення електричних явищ у живих об'єктах посідає важливе місце в біофізиці.

Отже, теоретичне вивчення фізичних процесів виникнення мембранних потенціалів спокою та дії, а також експериментальне дослідження порогів електрозбудження біомембрани за допомогою фізичної моделі забезпечує формування певних знань і умінь для подальшого навчання. До того ж, отримані фізичні уявлення про електричну активність біомембран можуть бути використанні у медичній діагностиці і терапії.

2. НАВЧАЛЬНІ ЦІЛІ:

Знати:

- Природу потенціалів спокою і потенціалів дії.

Вміти:

- Пояснювати іонну природу мембранного потенціалу спокою (рівноважний потенціал Нернста, стаціонарний потенціал Гольдмана-Ходжкіна-Катца).
- Трактувати механізм виникнення потенціалу дії.

- Досліджувати пороги електрозбудження біомембрани на фізичній моделі.
- Будувати порогову криву електрозбудження електронної моделі біомембрани і визначати реобазу і хронаксію.

3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДОАУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ

3.1. Теоретичні питання:

1. Потенціал спокою. Природа мембранного потенціалу спокою.
Стаціонарний потенціал Гольдмана-Ходжкіна-Катца.
2. Потенціал дії та механізм його виникнення. Характерні властивості потенціалу дії.
3. Електрична модель біомембрани.
4. Графік і рівняння кривої електрозбудливості біомембрани. Реобаза і хронаксія.

1. Потенціал спокою. Природа мембранного потенціалу спокою.

Стаціонарний потенціал Гольдмана-Ходжкіна-Катца

Однією з найважливіших функцій біологічної мембрани є генерація і передача біопотенціалів. Це явище лежить в основі збудження клітин, регуляції внутрішньоклітинних процесів, регуляції скорочення м'язів, рецепції. В медицині на дослідженні електричних полів, які створюються біопотенціалами органів і тканин базуються такі діагностичні методи як електрокардіографія, електроенцефалографія, електроміографія та ін.

Мембранним потенціалом називають різницю потенціалів між внутрішньою (цитоплазматичною) і зовнішньою поверхнями мембрани:

$$\Delta\varphi_m = \varphi_{\text{вн}} - \varphi_{\text{зовн}}.$$

Далі величину $\Delta\varphi_m$ будемо позначати просто як φ_m .

Мембранні потенціали поділяються на потенціали спокою і дії.

Потенціал спокою – стаціонарна різниця електричних потенціалів, яка реєструється між внутрішньою і зовнішньою поверхнями не збудженої мембрани, тобто в стані фізіологічного спокою. При цьому цитоплазма не збудженої клітини має негативний електричний потенціал по відношенню до позаклітинного середовища ($\varphi_{\text{вн}} < \varphi_{\text{зовн}}$), рис.4а.

Потенціал спокою можливо виміряти експериментально. Для цього використовують великі клітини, наприклад, гігантський аксон кальмару (діаметр 0,5 мм). В таку клітину вводять спеціальний скляний мікроелектрод, який являє собою скляну мікропіпетку з розчином електроліту і срібним електродом (рис.1). Другий електрод розташований в розчині біля зовнішньої поверхні клітини (рис.2).

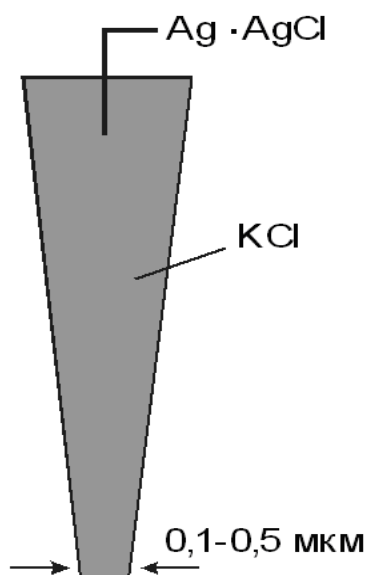


Рис. 1

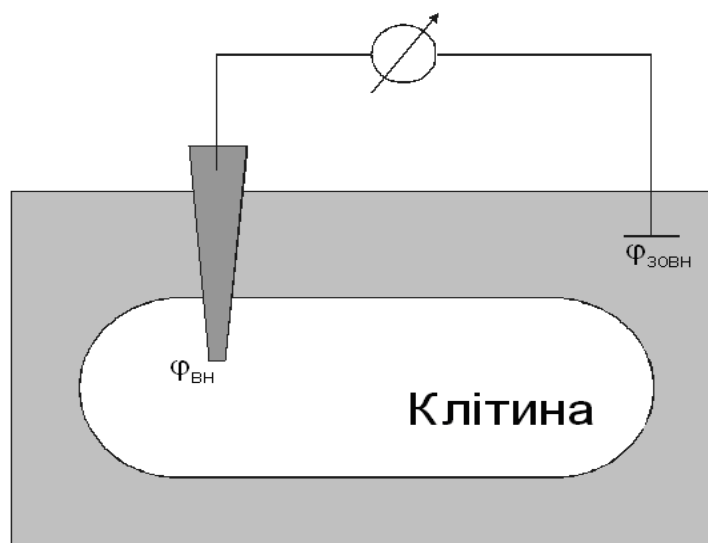


Рис. 2

Для гігантського аксону кальмара було визначено, що $\varphi_{\text{м спокою}} = -60 \text{ мВ}$.

В інших клітинах ця різниця досягає рівня: від -60 мВ до -90 мВ .

Потенціал спокою ($\varphi_{\text{м}}$) зумовлений :

- *по-перше, різною концентрацією іонів по різні сторони мембрани.*

Основний внесок в створення і підтримку потенціалу спокою вносять іони K^+ , Na^+ , Cl^- . Значення концентрацій цих іонів всередині і зовні для гігантського аксону кальмара наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Іон	Концентрація, ммоль/л H ₂ O	
	всередині	зовні
K ⁺	340	10,4
Na ⁺	49	463
Cl ⁻	114	592

- *по-друге, різною проникністю мембрани для різних іонів* (рівняння 1).

В стані спокою при фізіологічних умовах співвідношення коефіцієнтів проникності для гігантського аксону кальмара складає:

$$P_K : P_{Na} : P_{Cl} = 1 : 0,04 : 0,45. \quad (1)$$

Сумарна густина потоку іонів K⁺, Na⁺, Cl⁻ через мембрану з урахуванням їхніх знаків дорівнює:

$$J = J_{K^+} + J_{Na^+} - J_{Cl^-}.$$

В стаціонарному стані сумарна густина потоку, зумовлена потоками всіх іонів, дорівнює J=0, при цьому кожний з потоків відмінний від нуля. Тобто кількість різних іонів, які проходять за одиницю часу через мембрану в середину клітини дорівнює кількості іонів, які виходять з клітини:

$$J_{K^+} + J_{Na^+} - J_{Cl^-} = 0 \quad (2)$$

Підставивши значення густини потоків відповідних іонів в останній вираз, отримують **рівняння стаціонарного потенціалу Гольдмана-Ходжкіна-Катца**, яке ще називають **рівнянням Гольдмана**:

$$\varphi_{\text{м спокою}} = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_{Na}[Na^+]_i + P_K[K^+]_i + P_{Cl}[Cl^-]_0}{P_{Na}[Na^+]_0 + P_K[K^+]_0 + P_{Cl}[Cl^-]_i}, \quad (3)$$

де R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура;

F – число Фарадея;

P_{Na}, P_K, P_{Cl} – проникності мембрани для відповідних іонів;

[Na⁺]_i, [K⁺]_i, [Cl⁻]_i – концентрації відповідних іонів всередині мембрани;

[Na⁺]₀, [K⁺]₀, [Cl⁻]₀ – концентрації відповідних іонів назовні мембрани.

Підставивши в рівняння (3) відповідні значення коефіцієнтів проникності і концентрацію іонів для гігантського аксону кальмара, отримують теоретичне значення мембранного потенціалу спокою: $\varphi_{\text{м спокою}} = 59,7 \text{ мВ}$ при температурі 30°C , що добре узгоджується з експериментальним значенням.

Різні концентрації іонів всередині і назовні клітини створюються іонними насосами – системами активного транспорту, які розглянуті в попередній темі.

2. Потенціал дії та механізм його виникнення. Характерні властивості потенціалу дії.

Потенціалом дії називають швидку зміну різниці потенціалів (електричний імпульс) між клітиною і оточуючим середовищем, яка виникає при збудженні нервових, м'язових і деяких інших клітин.

Збудниками потенціалу дії можуть бути різні подразники: механічний, електричний, нервовий, світловий та ін. Потенціал дії не залежить від сили подразника, важливе лише те, щоб ця сила була не меншою деякої критичної величини, яку називають **порогом збудження**.

Можна виділити декілька фаз виникнення потенціалу дії (рис.3):

- **деполяризація** мембрани – зсув мембранного потенціалу в додатну сторону і зміна його знаку з -60мВ на $+50\text{мВ}$. Ці зміни зумовлені тим, що в місці подразнення збільшується проникність мембрани для іонів Na^+ приблизно в 20 разів у порівнянні з іонами K^+ . Іони Na^+ дифундують (рухаються) всередину клітини (рис. 4 б). Це призводить до зростання потенціалу всередині клітини ($\varphi_{\text{вн}} > \varphi_{\text{зовн}}$), і зсуву мембранного потенціалу в додатну сторону до $+50 \text{ мВ}$. В аксоні кальмара деполяризація триває 6 мс .
- **реверсія** потенціалу – досягнення деякого максимального позитивного значення ($\varphi_{\text{м ревер}}$);

- **реполяризація** мембрани – повернення мембранного потенціалу до початкового значення ($\Phi_{\text{м спокою}}$). Ці зміни зумовлені тим, що збільшується проникність мембрани для іонів K^+ , внаслідок пасивної дифузії вони починають рухатися назовні клітини (рис. 4в).

Для гігантського аксону кальмара процес виникнення потенціалу дії має вигляд (рис. 3):

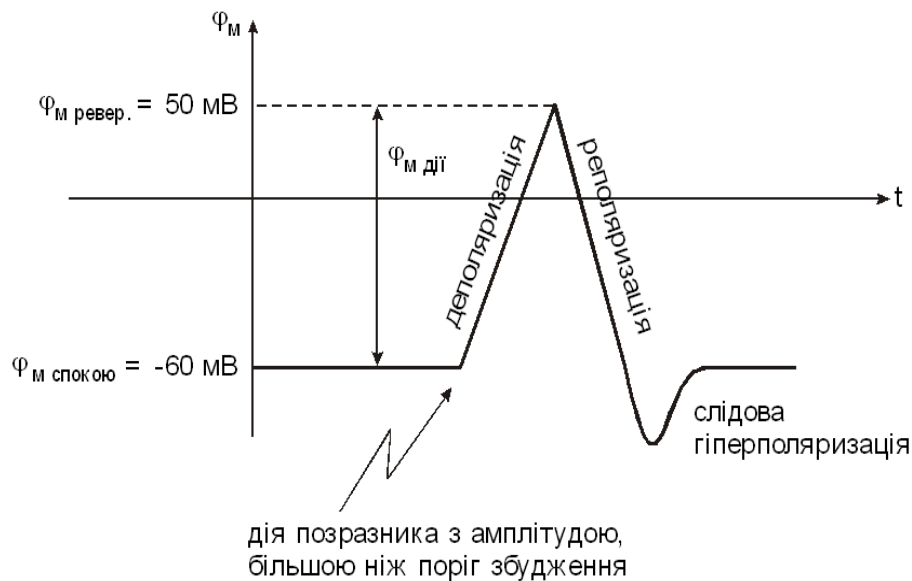


Рис.3

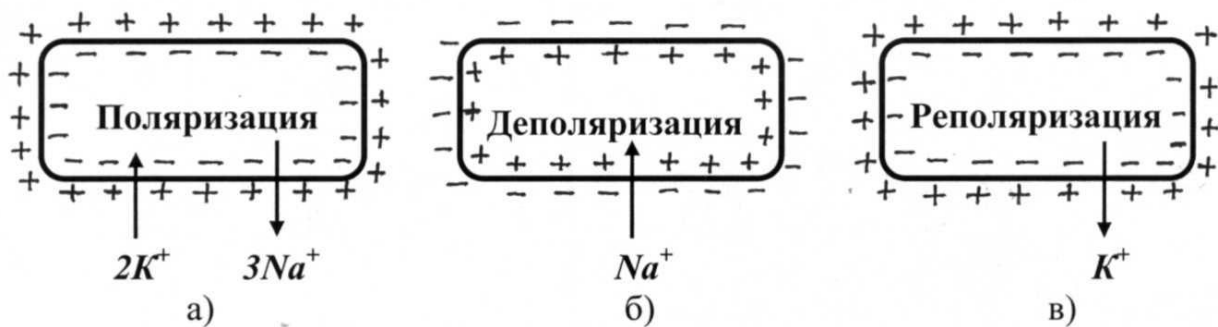


Рис. 4.

Амплітудне значення потенціалу дії дорівнює:

$$\Phi_{\text{м дії}} = |\Phi_{\text{м спокою}}| + \Phi_{\text{м ревер.}}$$

В нервових волокнах і скелетних м'язах тривалість потенціалу дії становить близько 1 мс, а в серцевому м'язі – 300 мс.

Після потенціалу дії спостерігається **слідова гіперполяризація**, яка триває від 0,5 до 2 $мс$ – це період незбудження (рефрактерності) мембрани, під час якого не може виникнути наступний потенціал дії. За цей час внаслідок роботи Na^+-K^+ -насоса відбувається відновлення початкових значень концентрацій іонів Na^+ і K^{++} , тобто за допомогою енергії АТФ натрій-калієвий насос сприяє виведенню за один цикл трьох іонів натрію Na^+ з клітини та надходженню двох іонів калію K^+ до клітини. Отже, подразник може викликати утворення нового потенціалу дії тільки після повного повернення мембрани в стан спокою.

Характерні властивості потенціалу дії:

- ♦ ***наявність порогового значення деполяризуючого потенціалу:***
 - якщо деполяризуючий потенціал більше (або дорівнює) порогу збудження мембрани – виникає потенціал дії;
 - якщо деполяризуючий потенціал менше порогу збудження – потенціал дії не виникає;
 - амплітуда потенціалу дії не залежить від амплітуди сигналу збудника.
- ♦ ***наявність періоду рефрактерності*** (протягом якого мембрана не збуджується);
- ♦ ***різке зменшення опору мембрани при збудженні:*** від $0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ в спокої до $0,0025 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ при збудженні у гігантського аксону кальмара

3. Електрична модель біомембрани

Електричні властивості мембрани можна відобразити електричними еквівалентами. На рис 5 зображена еквівалентна електрична схема мембрани.

- Клеми 1 моделюють зв'язок мембрани з внутрішньоклітинним і позаклітинним середовищем.
- V_m - електричний потенціал мембрани.
- Джерела електричної енергії E_K , E_{Na} і E_{Cl} моделюють рівноважні потенціали іонів K^+ , Na^+ , Cl^- .

- Опори R_K , R_{Na} і R_{Cl} моделюють, відповідно, електропровідності g_K , g_{Na} і g_{Cl} речовини для трьох струмів, створених іонами K^+ , Na^+ , Cl^- .
- Na^+-K^+ -насос, що володіє електрогенераторними властивостями, тобто здатний породжувати свій власний струм через мембрану, створюючи потенціал спокою.

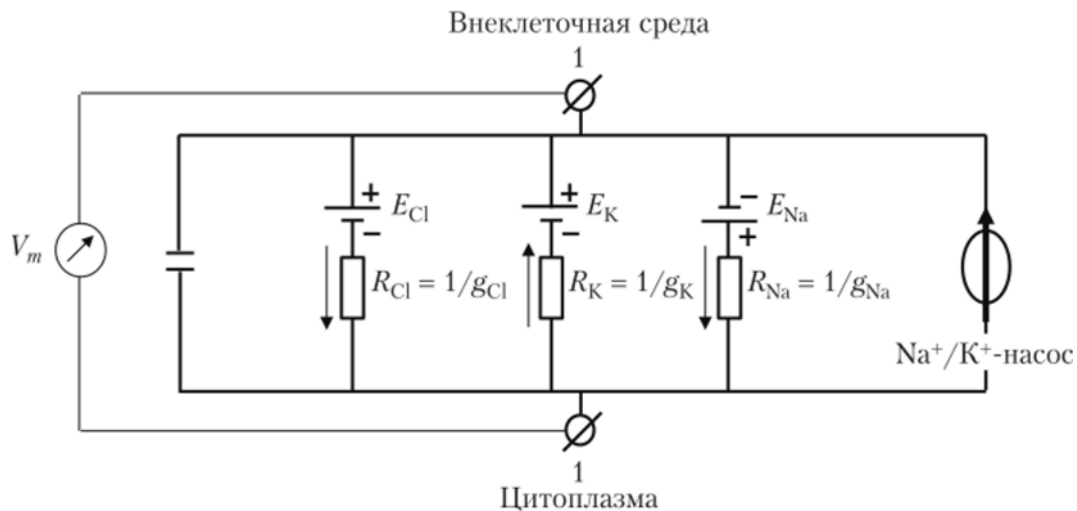


Рис. 5.

4. Графік і рівняння кривої електрозбудливості біомембрани. Реобаза і хронаксія.

Подразнення електричним струмом певного характеру і сили в більшості тканин і органів викликає таку ж реакцію, як і природне збудження. Застосування електричного струму для збудження тканин і органів називається **електростимуляцією**. Найчастіше для цього використовують імпульсні струми.

Електричний імпульс – це короткочасна зміна струму або напруги. Послідовність імпульсів певної частоти називається **імпульсним струмом**.

Найчастіше використовують прямокутні імпульси. Ідеальний прямокутний імпульсний струм зображений на рис. 6.

Характеристики прямокутного імпульсного струму:

t_i – тривалість імпульсу,

t_n – тривалість паузи,

$T = t_i + t_n$ – період імпульсного струму,

U – амплітуда.

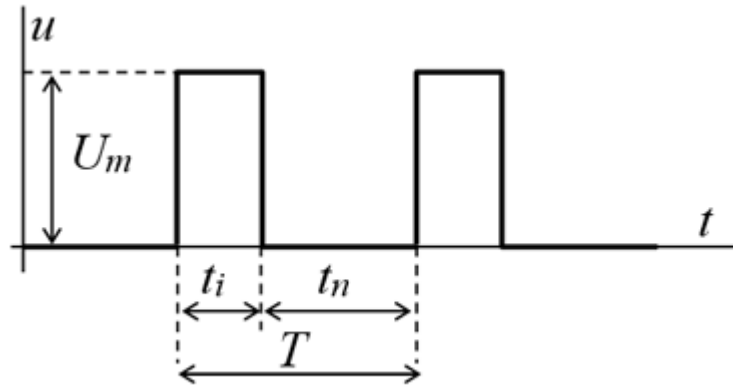


Рис. 6.

В тканинах і органах імпульси викликають швидке зміщення (перерозподіл) іонів і за рахунок цього чинять подразнюючу дію. Подразнююча дія прямокутних імпульсів в значній мірі пов'язана з їх тривалістю, яка обумовлює найбільше зміщення іонів за час дії імпульсу. Ця залежність виражається рівнянням Вейса-Лапіка:

$$I_n = \frac{a}{t_i} + b,$$

де I_n – порогова сила імпульсного струму – мінімальна амплітуда імпульсу, яка викликає збудження тканини;

t_i – тривалість імпульсу;

a, b – коефіцієнти, які залежать від природи збудженої тканини і її функціонального стану.

У графічному вигляді цей закон зображений на рис. 7.

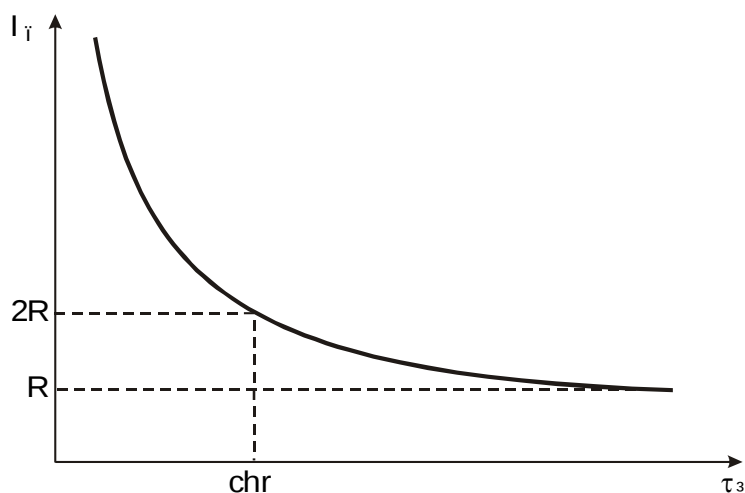


Рис. 7. Крива $I_n = f(t_i)$ порогу збудження мембрани.

За графіком $I_n=f(t_i)$ знаходять такі фізіологічні показники:

R – реобаза – значення порогового струму, яке не залежить від тривалості імпульсу;

chr – хронаксія – значення тривалості імпульсу, яке на кривій порогу збудження мембрани відповідає подвійній реобазі.

Реобаз і хронаксія – фізіологічні показники, які характеризують функціональний стан тканини і можуть бути діагностичною ознакою при їх ушкодженні.

3.3. Перелік основних термінів, характеристик, законів, які повинен засвоїти студент при підготовці до заняття.

Потенціал спокою	Потенціал спокою – це різниця потенціалів, яка виникає між зовнішньою та внутрішньою поверхнями мембрани клітини в стані її фізіологічного спокою.
Потенціал дії	Потенціал дії - швидка зміна різниці потенціалів (електричний імпульс) між клітиною і оточуючим середовищем, яка виникає при збудженні нервових, м'язових і деяких інших клітин.
Реобаз	Реобаз - амплітуда постійного електричного струму, збуджуюча дія якого на мембрану не залежить від часу його тривання. .
Хронаксія	Хронаксія – значення тривалості імпульсу, яке на кривій порогу збудження мембрани відповідає подвійній реобазі
Рівняння Гольдмана	Рівняння стаціонарного потенціалу Гольдмана-Ходжкіна-Катца: $\varphi_{\text{м спокою}} = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_{Na}[Na^+]_i + P_K[K^+]_i + P_{Cl}[Cl^-]_0}{P_{Na}[Na^+]_0 + P_K[K^+]_0 + P_{Cl}[Cl^-]_i}$
Рівняння Вейса-Ланіка	Рівняння Вейса-Ланіка: $I_n = \frac{a}{t_i} + b$

3.4. Написати в зошиті протокол лабораторної роботи №18

Протокол повинен містити: назву роботи, мету, прилади і матеріали, стислу теоретичну частину, назву завдань, таблиці, формули для розрахунків.

3.5. Завдання для самоконтролю (тести):

- Біоелектричні потенціали виникають внаслідок:
 - різної концентрації іонів з обох боків клітинної мембрани;
 - однакової концентрації іонів Ca^{+2} і Cl^- ;
 - дифузії іонів;
 - різної концентрації іонів Na^+ і K^+ .
- Як співвідносяться між собою у стані спокою проникності мембрани аксона кальмара?
 - $P_K : P_{Na} : P_{Cl} = 1 : 0,4 : 0,5$;
 - $P_K : P_{Na} : P_{Cl} = 1 : 4 : 5$;
 - $P_K : P_{Na} : P_{Cl} = 1 : 0,04 : 2$;
 - $P_K : P_{Na} : P_{Cl} = 1 : 0,04 : 0,045$.
- Рівняння Гольдмана-Ходжкіна-Катца для стаціонарного потенціалу спокою має вигляд:

$$\varphi_{\text{спокою}} = \frac{R \cdot T}{F} \ln \frac{P_K [K^+]_i + P_{Na} \cdot [Na^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_0}{P_K [K^+]_0 + P_{Na} [Na^+]_0 + P_{Cl} [Cl^-]_i}$$

Як називаються величини $[K^+]_i$, $[Na^+]_i$, $[Cl^-]_i$ у цьому рівнянні?

- концентрації відповідних іонів всередині клітини;
 - концентрації відповідних іонів зовні клітини;
 - молярні маси відповідних іонів;
 - кількість відповідних іонів, що рухаються через мембрану.
- Рівняння Гольдмана-Ходжкіна-Катца для стаціонарного потенціалу спокою має вигляд:

$$\varphi_{\text{спокою}} = \frac{R \cdot T}{F} \ln \frac{P_K [K^+]_i + P_{Na} \cdot [Na]_i + P_{Cl} [Cl]_0}{P_K [K^+]_0 + P_{Na} [Na^+]_0 + P_{Cl} [Cl^-]_i}$$

Як називаються величини $[K^+]_0$, $[Na^+]_0$, $[Cl^-]_0$ у цьому рівнянні?

- а) молярні маси відповідних іонів;
 - б) концентрації відповідних іонів зовні клітини;
 - в) концентрації відповідних іонів всередині клітини;
 - г) кількість відповідних іонів, що рухаються через мембрану.
5. Яка причина виникнення потенціалу дії при збудженні клітини:
- а) зміна проникності мембрани для іонів Na^+ ;
 - б) зміна товщини мембрани;
 - в) рух іонів з клітини;
 - г) зміна проникності мембрани для іонів K^+ .
6. При збудженні клітини проникності мембрани для іонів K^+ і Na^+ співвідносяться як:
- а) $P_K : P_{Na} = 2 : 3$;
 - б) $P_K : P_{Na} = 20 : 1$;
 - в) $P_K : P_{Na} = 1 : 10$;
 - г) $P_K : P_{Na} = 1 : 20$.
7. Що виникне у нормально збудливій клітині при пороговому подразненні?
- а) метаболічний потенціал;
 - б) мембранний потенціал спокою;
 - в) локальний потенціал;
 - г) потенціал дії .
8. Головну роль у генерації потенціалу дії відіграють іони:
- а) K^+ ; б) Na^+ ; в) K^+ і Na^+ ; г) K^+ , Na^+ , Cl^- .
9. В другій фазі потенціалу дії (фазі реполяризації) відбувається повернення мембранного потенціалу до початкового значення. Дифузним потоком яких іонів зумовлена ця фаза:
- а) Cl^- ; б) Na^+ ; в) K^+ ; г) Mg^{2+} .
10. Який іонний процес зумовлює фазу реполяризації?
- а) вхід K^+ у клітину;
 - б) вихід Ca^{++} з клітини;
 - в) вихід Na^+ з клітину;
 - г) вихід K^+ з клітини.

Правильні відповіді: 1–а; 2–г; 3–а; 4–б; 5–а; 6–г; 7–г; 8–б; 9–в; 10–г.

4. ЛІТЕРАТУРА

1. Чалий О.В. Медична і біологічна фізика. – К.: 2005.– § 5.5 (с. 402-414).
2. Дяков В.А. і співавтори. Лабораторний практикум з медичної і біологічної фізики. –В.: ВДМУ, 2010.– Лабораторна робота № 18.

Тести для перевірки кінцевого рівня знань

1. В першій фазі потенціалу дії (деполяризація мембрани) відбувається різка зміна мембранного потенціалу в додатну сторону. Дифузним потоком яких іонів зумовлена ця фаза:
а) Cl^- ; б) K^+ ; в) Ca^{2+} ; г) Na^+ .
2. Яким іонним процесом викликана деполяризація?
а) входом Na^+ у клітину;
б) входом K^+ у клітину;
в) виходом K^+ з клітини;
г) виходом Na^+ з клітини.
3. Потенціал спокою нервового волокна кальмара дорівнює -60мВ. В результаті збудження цього волокна виникає потенціал дії +35mВ. Яким іонним процесом це викликано?
а) рухом іонів Na^+ всередину клітини;
в) рухом іонів K^+ всередину клітини;
б) рухом іонів K^+ з клітини;
г) рухом іонів Na^+ з клітини.
4. Потенціал дії нервового волокна кальмара дорівнює +35 мВ, потім він повертається до свого початкового значення - 60 мВ. Яким іонним процесом це зумовлено?
а) рухом іонів K^+ з клітини;
б) рухом іонів K^+ всередину клітини;
в) рухом іонів Na^+ в клітину;
г) рухом іонів Na^+ з клітини.
5. У збудливій клітині заблокували іонні канали, внаслідок чого клітина з часом повністю втратила потенціал спокою. Які канали

заблокували?

а) кальцієві; б) натрієві; в) натрій-калієві насоси; г) калієві.

6. У збудливій клітині заблокували іонні канали. Це не змінило суттєво рівень потенціалу спокою, але клітина втратила здатність до генерації потенціалу дії. Які канали заблокували?

а) хлорні; б) калієві; в) натрієві; г) натрій-калієві насоси.

7. Які умови потрібні, щоб виник потенціал дії в нормально збудливій клітині?

а) допорогове подразнення;

б) порогове подразнення;

в) потенціал спокою;

г) мембранний потенціал.

8. Амплітуда постійного електричного струму, збуджуюча дія якого на мембрану не залежить від часу його тривання, називається:

а) хронаксією; б) реобазою; в) лабільністю; г) акомодациєю.

9. Тривалість порогового струму, амплітуда якого відповідає подвійній реобазі, називається:

а) хронаксією;

б) реобазою;

в) лабільністю;

г) акомодациєю.

10. У клітині заблокували роботу натрій-калієвих насосів.

Безпосередньо внаслідок цього в клітині зникне:

а) рух іонів;

б) потенціал спокою;

в) потенціал дії;

г) збудливість.

11. Різниця потенціалів, яка виникає між зовнішньою та внутрішньою поверхнями мембрани клітини в стані її фізіологічного спокою, називається:

а) мембранною напругою;

б) потенціалом спокою;

в) потенціалом дії;

г) збудливістю.

12. Що виникне у нормально збудливій клітині при пороговому подразненні?

- а) метаболічний потенціал;
- б) мембранний потенціал спокою;
- в) локальний потенціал;
- г) потенціал дії.

13. Які іони відіграють головну роль у генерації потенціалу дії ?

г) потенціал дії .

- а) K^+ ; б) Na^+ ; в) K^+ і Na^+ ; г) K^+ , Na^+ , Cl^- .

14. В першій фазі потенціалу дії (деполяризація мембрани) відбувається різка зміна мембранного потенціалу в додатну сторону. Дифузним потоком яких іонів зумовлена ця фаза:

- а) Cl^- ; б) K^+ ; в) Ca^{2+} ; г) Na^+ .

15. Яким іонним процесом викликана деполяризація?

- а) входом Na^+ у клітину;
- б) входом K^+ у клітину;
- в) виходом K^+ з клітини;
- г) виходом Na^+ з клітини.

16. Який іонний процес зумовлює фазу реполяризації?

- а) вхід K^+ у клітину;
- б) вихід Ca^{++} з клітини;
- в) вихід Na^+ з клітину;
- г) вихід K^+ з клітини .

17. Потенціал спокою нервового волокна кальмара дорівнює -60мВ. В

результаті збудження цього волокна виникає потенціал дії +35mВ. Яким іонним процесом це зумовлено?

- а) рухом іонів Na^+ всередину клітини;
- в) рухом іонів K^+ всередину клітини;
- б) рухом іонів K^+ з клітини;
- г) рухом іонів Na^+ з клітини.

18. Потенціал дії нервового волокна кальмара дорівнює +35 мВ, потім він повертається до свого початкового значення - 60 мВ. Яким іонним процесом це зумовлено?

- а) рухом іонів K^+ з клітини;
 - б) рухом іонів K^+ всередину клітини;
 - в) рухом іонів Na^+ в клітину;
 - г) рухом іонів Na^+ з клітини.
19. У збудливій клітині заблокували роботу натрій-калієвих насосів. Безпосередньо внаслідок цього в клітині зникне:
- а) іонний градієнт;
 - б) потенціал спокою;
 - в) потенціал дії;
 - г) збудливість.
20. Які умови потрібні, щоб виник потенціал дії в нормально збудливій клітині?
- а) допорогове подразнення;
 - б) порогове подразнення;
 - в) потенціал спокою;
 - г) мембранний потенціал.
21. До чого призводить збільшення під час генерації потенціалу дії (ПД) активованих калієвих каналів?
- а) до зменшення амплітуди ПД;
 - б) до зменшення тривалості ПД;
 - в) до зменшення амплітуди і тривалості ПД;
 - г) до збільшення амплітуди і тривалості ПД
22. При виникненні потенціалу дії потенціал клітин скелетних м'язів жаби змінюється від -85 мВ до $+55$ мВ. Яка амплітуда потенціалу дії?
- а) 50 мВ; б) 140 мВ; в) 70 мВ; г) -30 мВ.
23. Амплітуда постійного електричного струму, збуджуюча дія якого на мембрану не залежить від часу його тривання, називається:
- а) хронаксією; б) реобазою; в) лабільністю; г) акомодациєю.
24. Тривалість порогового струму, амплітуда якого відповідає подвійній реобазі, називається:
- а) хронаксією; б) реобазою; в) лабільністю; г) акомодациєю.

Лабораторна робота №18

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОГУ ЗБУДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ МОДЕЛІ БІОМЕМБРАНИ

Мета роботи:

1. З'ясувати механізм електрозбудження біологічної мембрани.
2. Одержати порогову криву електрозбудження електронної моделі біомембрани, визначити реобазу і хронаксію.

Опис лабораторної установки

Структурна схема установки, що використовується в даній лабораторній роботі зображена на рис.1.

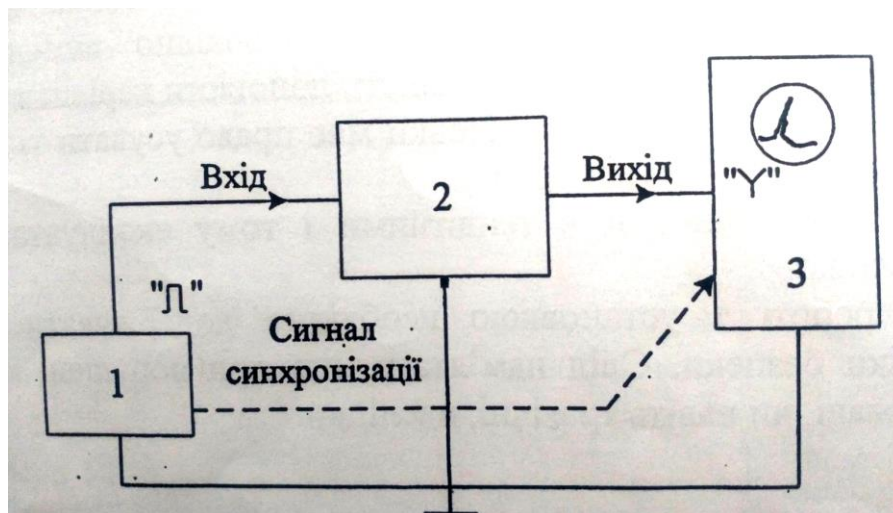


Рис.1

До її складу входять:

- **генератор 1 прямокутних електричних імпульсів** заданої тривалості t_i (0,03-2,00с) і амплітуди U_n (0,00-9,90 В), які подаються на вхід електронної моделі 2. Значення вибраних параметрів електричних імпульсів, виводиться на індикаторні цифрові табло генератора.
- **електронна модель 2 електрозбудливої біомембрани**, електричний опір якої 2000 Ом, відтворює допороговий електричний процес (потенціал спокою) і електрозбудження при дії порогових значень електричних

імпульсів (потенціал дії). Вихідні сигнали функціонування електронної моделі подаються на осцилограф.

- **електронний осцилограф 3** призначений для візуального спостереження електричних сигналів (потенціалів спокою і дії), що знімаються з виходу електронної моделі електрозбудливої біомембрани.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Завдання 1. Дослідження електрозбудливості моделі біомембрани.

- 1.1. Під'єднати шнури електричних пристроїв лабораторної установки до мережі $\sim 220\text{В}$.
- 1.2. На індикаторному табло «ТРИВАЛІСТЬ» генератора прямокутних імпульсів встановити регулятором «РЕГ. t_i » тривалість імпульсу $t_i = 1,5\text{мс}$.
- 1.3. Регулятором «РЕГ. U_n » підібрати таке значення амплітуди електричного імпульсу, при якому електронна модель біомембрани генеруватиме потенціал дії, зображення якого появиться на екрані осцилографа.
- 1.4. Отримані порогові значення тривалості t_i і амплітуди U_n занести в таблицю.
- 1.5. Виконати аналогічно визначення амплітуд порогових напруг електричних імпульсів, тривалість яких вказана в таблиці.

Таблиця

$t_i, \text{мс}$	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
$U_n, \text{В}$											
$i_n, \text{мВ}$											

0,4	0,35	0,30	0,25	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12

- 1.6. Розрахувати порогове значення струму i_n (мВ) моделі біомембрани за формулою:

$$i_n = \frac{U_n}{R_{ex}},$$

де $R_{ex} = 2000 \text{ Ом}$ - вхідний опір моделі біомембрани.

1.7. Значення i_n записати в таблицю.

1.8. Побудувати порогову криву $i_n = f(t_i)$ електрозбудження електронної моделі біомембрани.

1.9. За побудованим графіком визначити реобазу b і хронаксію t_{chr} .

1.10. Обчислити константу a за формулою:

$$a = b \cdot t_{chr}.$$

1.11. Зробити загальний висновок про можливість застосування вивченого методу в медичній практиці для діагностики фізіологічного стану біотканин.

Тема: ВИВЧЕННЯ БІОФІЗИЧНИХ ОСНОВ ЕЛЕКТРО-ТА ВЕКТОРКАРДІОГРАФІЇ

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:

Органи, тканини, окремі клітини та їхні складники є електрично-активними, тобто процес їхнього функціонування супроводжується появою у навколишньому середовищі змінного електричного поля, характеристики якого (різницю потенціалів, напруженість, зумовлені ним струми тощо) можна зареєструвати. Отриману інформацію використовують з діагностичною метою та з метою вивчення природи електричних явищ у біологічних тканинах. Реєстрацію різниці потенціалів між точками середовища, яке оточує електрично-активні тканини, називають електрографією, а графік залежності цієї різниці потенціалів від часу – електрограмою (ЕГ).

Електрографічний метод застосовують для клінічної діагностики серця (електрокардіографія), м'язів (електроміографія), головного мозку (електроенцефалографія), сітківки ока (електроретинографія) тощо. У медичній практиці найбільшого поширення набуло дослідження електричної активності серця – електрокардіографія.

2. НАВЧАЛЬНІ ЦІЛІ:

Знати:

- Електричні характеристики серця.
- Біофізичні основи електро- та векторкардіографії.

Вміти:

- Тракувати генез електрокардіограми на підставі аналізу основних концепцій електрокардіографії.
- Знімати ЕКГ в стандартних відведеннях, визначати амплітуди зубців і часові характеристики ЕКГ.

3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДОАУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ

3.1. Теоретичні питання:

1. Електрична активність органів. Принцип еквівалентного генератора.

Електричний зарядовий диполь. Струмовий диполь.

2. Дипольний еквівалентний генератор серця. Теорія Ейнтховена.
3. Генез електрокардіограми в рамках моделі струмового диполю серця.
4. Векторкардіографія.
5. Блок-схема запису електрокардіограми.
6. Калібрування електрокардіографа, ціна поділки калібрування.
7. Визначення параметрів електрокардіограм: амплітуди зубців P, Q, R, S, T в мВ, протяжності серцевого циклу і частоти скорочень серця.

3.2. Зміст теми

1. Електрична активність органів. Принцип еквівалентного генератора. Електричний зарядовий диполь. Струмовий диполь

Функціонування живих клітин супроводжується виникненням мембранних електричних потенціалів. Клітини утворюють орган і відповідно формують складну картину його електричної активності. Електрична активність органу визначається електричною активністю окремих клітин, взаємодією між ними, будовою самого органу, процесами регуляції і цілим рядом інших причин.

Реєстрацію різниці потенціалів між точками середовища, яке оточує електрично активні тканини, називають **електрографією**. Графік залежності цієї різниці потенціалів від часу $\Delta\varphi=f(t)$ називають **електрограмою**.

Електрографічний метод застосовують для клінічної діагностики:

- серця (електрокардіографія);
- головного мозку (електроенцефалографія);
- м'язів (електроміографія);
- сітківки ока (електроретинографія) та ін.

Для оцінки функціонального стану органу та його електричної активності використовується **принцип еквівалентного генератора**. Він полягає в тому, що досліджуваний орган, який складається з множини клітин, уявляється моделлю єдиного еквівалентного електричного генератора, що умовно знаходиться в

організм і створює на поверхні тіла електричне поле, яке змінюється у відповідності зі змінами електричної активності досліджуваного органа.

Таким чином, термін “еквівалентний” означає, що розподіл потенціалів, які створюються органом на поверхні тіла і їх зміна за часом повинні бути близькими до тих, що створюються гіпотетичним (уявним) генератором.

В якості моделей, якими уявляються органи і тканини при генерації електрограм, використовують електричні диполі.

Електричним зарядовим диполем (або просто диполем) називають систему, яка складається з двох рівних за величиною і протилежних за знаком зарядів, розташованих на невеликій відстані l один від одного (рис. 1).

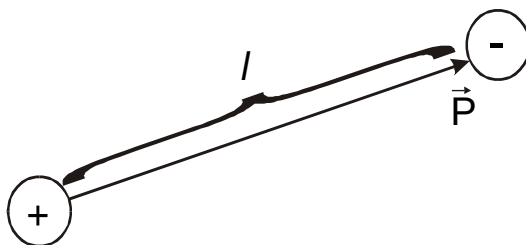


Рис. 1

Основна характеристика диполя – це **момент електричного диполя**, він дорівнює добутку заряду q на відстань l між зарядами і напрямлений від негативного заряду до позитивного:

$$\vec{P} = q \cdot \vec{l} \quad (1)$$

Електричний диполь сам по собі є джерелом електричного поля. Значення потенціалу цього поля в деякій точці А (рис.2), що розташована на відстані r від диполя, дорівнює:

$$\varphi_A = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{P \cdot \cos\alpha}{r^2} \quad (2)$$

де ϵ – діелектрична проникність середовища,

ϵ_0 – електрична стала,

α – кут між вектором $\mathbf{P}$ і напрямком r .

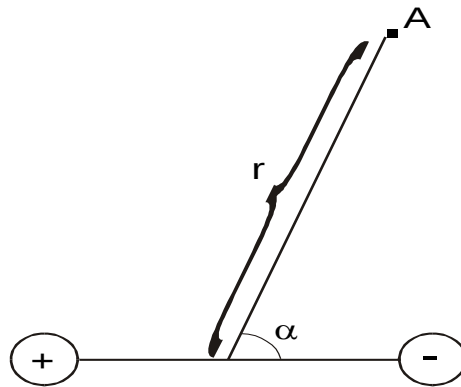


Рис. 2

Якщо електричний диполь знаходиться в провідному середовищі (там де є вільні заряди), то заряди цього середовища під дією електричного поля диполю будуть рухатись у відповідних напрямках, тобто почне протікати електричний струм. Рух цих зарядів швидко нейтралізує диполь, але якщо до нього під'єднати джерело напруги, то диполь буде зберігатись.

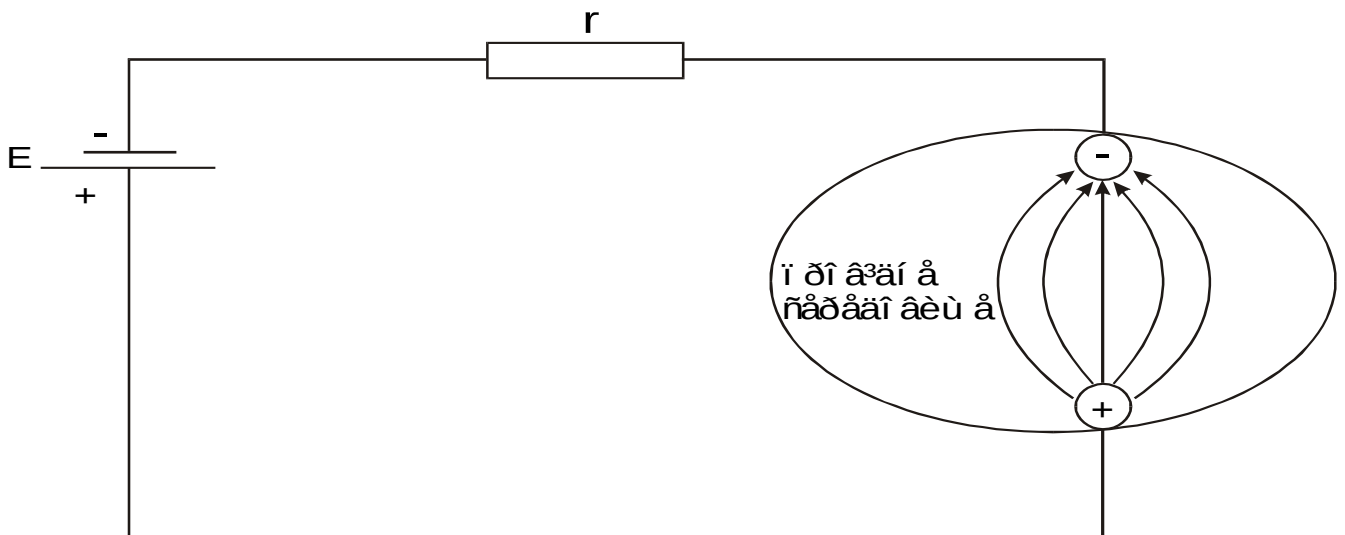


Рис. 3

Схема еквівалентного генератора струму у провідному середовищі подана на рис. 3, де r і R , відповідно, внутрішній опір генератора та опір зовнішньої ділянки кола (середовища).

За законом Ома (для повного кола) сила струму дорівнює:

$$I = \frac{E}{R + r}, \quad (3)$$

де E – електрорушійна сила джерела напруги.

Оскільки $r \gg R$, то $I = \frac{E}{r}$. В такому випадку струм в зовнішньому середовищі буде залишатись постійним, тобто незалежним від властивостей середовища. Отже, така система, яка складається з додатного полюса (витоку струму) і від'ємного полюса (стоку струму), які розташовані на невеликій відстані l один від одного називається дипольним електричним генератором або **струмовим диполем**.

Характеристики струмового диполя легко отримати, якщо замінити в формулі (1) q на I , а в формулі (2) $\varepsilon\varepsilon_0$ на γ , тоді:

- Момент струмового диполя: $\vec{P}_{cmp} = I \cdot \vec{l}$, (4)
- Потенціал в точці А, що розташована на відстані r від струмового диполя:

$$\varphi_A = \frac{1}{4\pi\gamma} \cdot \frac{P_{cmp} \cdot \cos \alpha}{r^2}. \quad (5)$$

де γ – питома електрична провідність середовища.

Збуджена клітина є прикладом струмового диполя.

2. Дипольний еквівалентний генератор серця. Теорія Ейнтховена.

На поверхні провідника під час функціонування еквівалентного електричного генератора будуть виникати електричні потенціали. Експериментально було встановлено, що у процесі серцевої діяльності на поверхні тіла людини також виникають електричні потенціали. Припускають, що середовище, котре оточує серце, безмежне й однорідне з питомою електричною провідністю γ . У цьому разі для знаходження електричного потенціалу можна обмежитися дипольним наближенням.

Якщо диполь, що створює електричне поле, знаходиться в центрі рівностороннього трикутника ABC (рис. 4), то можна довести, що напруги (різниці потенціалів) на сторонах цього трикутника відносяться між собою, як проекції електричного моменту диполя на сторони цього трикутника:

$$U_{AB} : U_{BC} : U_{AC} = P_{AB} : P_{BC} : P_{AC}$$

або $U_{AB} \sim P_{AB}$; $U_{BC} \sim P_{BC}$; $U_{AC} \sim P_{AC}$.

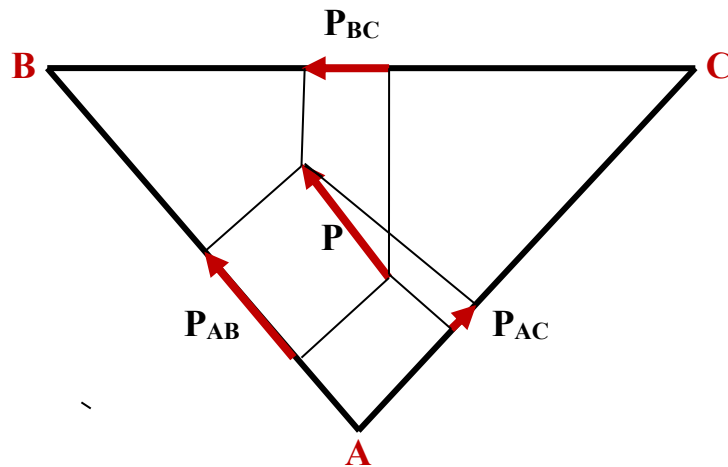


Рис. 4

На цьому положенні базується **теорія Ейнтховена**, голандського вченого, засновника електрокардіографії, Нобелівського лауреата 1924 р. Основні постулати теорії Ейнтховена:

1. Електричне поле серця уявляється як електричне поле струмового диполя (рис. 5). Цей диполь називають **дипольним еквівалентним генератором серця**, а його момент $\vec{E}$ - **інтегральним електричним вектором серця** (ІЕВС). ІЕВС складається з моментів диполів різних ділянок серця, що містять певну множину збуджених клітин (елементарних диполів):

$$\vec{E} = \sum \vec{P}_{стр.i};$$

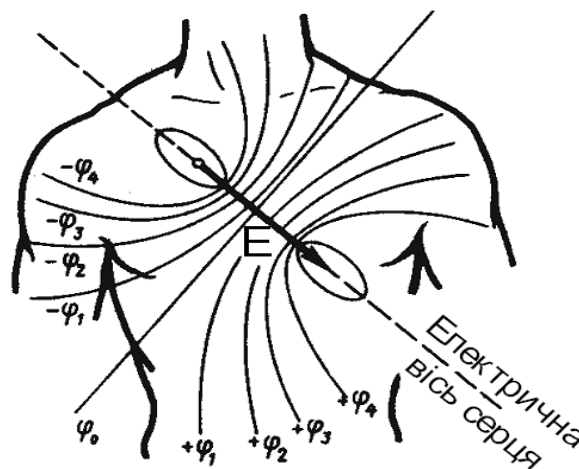


Рис. 5

2. Генератор струму знаходиться в однорідному ізотропному провідному середовищі нескінченно великих розмірів, роль якого відіграють тканини організму;

3. ІЕВС змінюється за величиною і напрямком в процесі роботи серця.

Початок цього вектора вважають нерухомим і розміщеним в атріовентрикулярному вузлі, а кінець за цикл серцевої діяльності (у нормі) описує у просторі криву, яка складається з трьох петель: P, QRS і T. На рис. 6 показана ця крива і її проєкції на фронтальну і сагітальну площини.

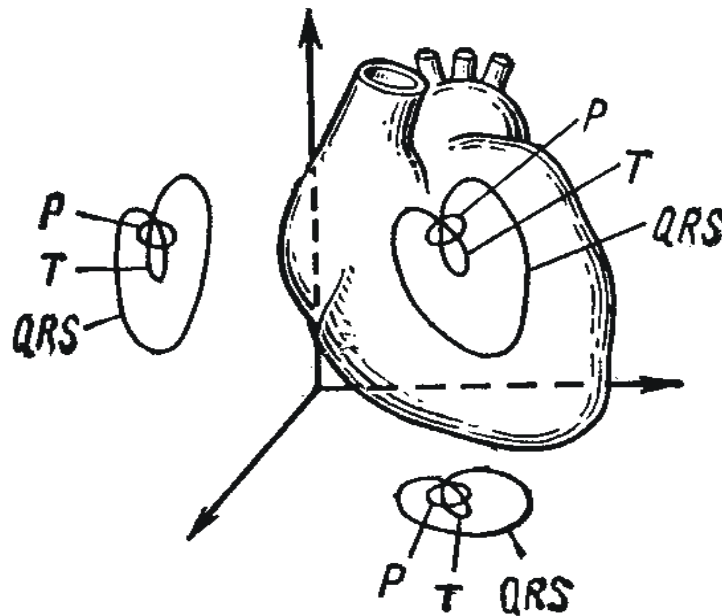


Рис. 6

4. Потенціал електричного поля в кожній точці середовища, достатньо віддаленій від інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС), визначається за формулою:

$$\varphi_A \approx \frac{1}{4\pi\gamma} \cdot \frac{E \cdot \cos \alpha}{r^2},$$

де r – відстань від центру ІЕВС до даної точки А,

α – кут між вектором E і напрямком r ,

γ – питома електрична провідність середовища.

5. Вибір стандартної системи відведень. Ейнтховен запропонував вимірювати різниці потенціалів на поверхні тіла між вершинами рівностороннього трикутника, в центрі якого знаходиться вектор E (рис. 7).

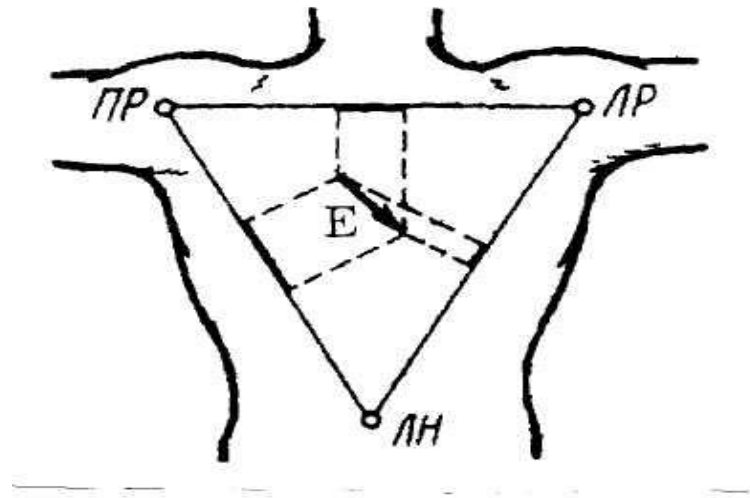


Рис. 7

Сторони трикутника в теорії Ейнтховена називають **відведеннями**:

I відведення: права рука – ліва рука (ПР-ЛР),

II відведення: права рука – ліва нога (ПР-ЛН),

III відведення: ліва рука – ліва нога (ЛР-ЛН).

Руки і ноги розглядаються як провідники, які відводять потенціали від вершин трикутника Ейнтховена, тому на практиці різницю потенціалів U_I вимірюють між правою і лівою рукою (перше відведення), U_{II} - правою рукою і лівою ногою (друге відведення), U_{III} - лівою рукою і лівою ногою (третє відведення).

Різниці потенціалів U у кожному із стандартних відведень прямо пропорційні проекції вектора $\mathbf{E}$ на лінію відповідного відведення (рис.7):

$$U_I \sim E_I; \quad U_{II} \sim E_2; \quad U_{III} \sim E_3.$$

Отже, різниці потенціалів у кожному із стандартних відведень відносяться між собою, як проекції ІЕВС на відповідні сторони цього трикутника.

$$U_I : U_{II} : U_{III} = E_1 : E_2 : E_3$$

Електрокардіограма (ЕКГ) – це графік залежності різниці потенціалів у певному відведенні від часу за повний серцевий цикл (рис.8).

Електрокардіограма записується на спеціальному папері, на який нанесені клітинки розміром 1х1 мм.



Рис.8.

Процес запису (ЕКГ) — електрокардіографія, а пристрій для запису — електрокардіограф.

Сучасні електрокардіографи дозволяють здійснити як одноканальний, так і багатоканальний запис ЕКГ. В останньому випадку синхронно реєструються кілька різних електрокардіографічних відведень (від 2 до 6–8), що значно скорочує період дослідження і дає можливість отримати більш точну інформацію про електричне поле серця.

3. Генез електрокардіограми в рамках моделі струмового диполю серця.

Генез електрокардіограми у рамках моделі Ейнтховена можна уявити таким чином, як показано в таблиці 1.

Таблиця 1

Момент часу t_0 , збуджена певна ділянка серця, що можна уявити у вигляді виникнення певної кількості елементарних струмових диполів $\vec{P}_{стр.i}$:	Інтегральний електричний вектор серця: $\vec{E} = \sum \vec{P}_{стр.i}$	Проекція ІЕВС на деякий напрям:
		

Момент часу t_1 , збуджена інша ділянка серця, виникли інші елементарні струмові диполі:	Зміна величини і напрямку ІЕВС:	Проекція ІЕВС на деякий напрям:
		
Момент часу t_2 , процес збудження продовжується:	Чергова зміна величини і напрямку ІЕВС:	Проекція ІЕВС на деякий напрям:
		
• • •	• • •	• • •

Якщо побудувати всі отримані проекції ІЕВС послідовно у часі, отримаємо електрокардіограму (ЕКГ) – графік залежності різниці потенціалів певного відведення від часу за повний серцевий цикл:

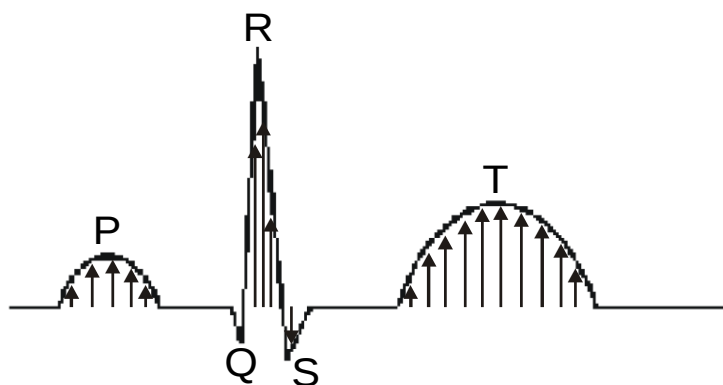


Рис.9

На кривій ЕКГ чітко видно зубець Р, комплекс зубців Q, R, S і зубець Т, які відображають фази серцевого циклу і функціональний стан органу.

Зубці та інтервали ЕКГ складають два комплекси:

- передсерцевий (зубець Р і інтервал Р-Q);
- шлуночковий (QRS, інтервал S-T, зубець Т).

Зубці ЕКГ мають різну величину и напрямок, оскільки відповідають різним стадіям роботи серця:

P – скорочення передсердя	} систола,
QRS – скорочення шлуночків	
ST – діастола.	

Зубці P, R – завжди додатні.

Зубці Q, S – завжди від'ємні.

Зубець T – додатній, крім: у відведенні LVR – від'ємний, в третьому стандартному відведенні і в V_1 – може бути слабо від'ємний.

Недолік ЕКГ: не дає уяви про просторову орієнтацію вектора E (ІЕВС).

4. Векторкардіографія

Векторкардіографія – методика, яка дозволяє зареєструвати проекцію кривої у просторі, яку описує кінець ІЕВС за цикл роботи серця (див. рис. 5).

Векторелектрокардіограма (ВЕКГ) - це графічне зображення траєкторії руху кінця інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС) у вигляді петель P , QRS і T , які утворюються в результаті взаємно перпендикулярного складення двох електрокардіограм.

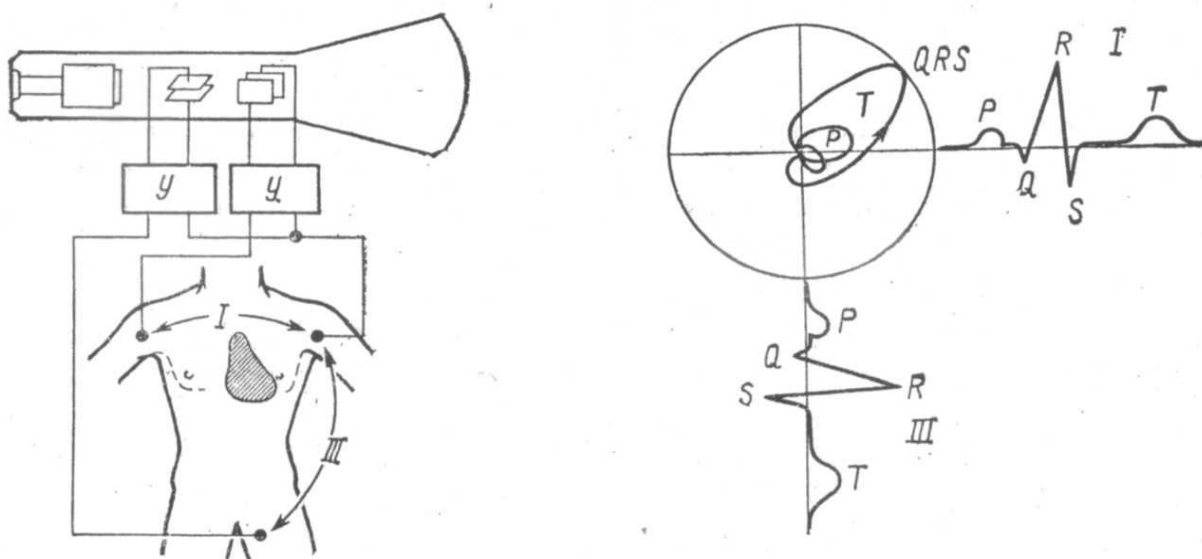


Рис.10

Для отримання ВЕКГ використовують електронний осцилограф. На горизонтально відхиляючі пластини осцилографа подається різниця потенціалів

з I-го відведення, а на вертикально відхиляючі пластини – з II-го (рис.10). Таким чином, відбувається додавання двох взаємно перпендикулярних коливань і, як наслідок, реєструється результуюче складне коливання – ВЕКГ.

5. Блок-схема запису електрокардіограми

Реєстрація біопотенціалів серця здійснюється за допомогою електрокардіографа, який складається в основному з двох блоків: підсилювача і реєструючого пристрою.

Блок-схема запису електрокардіограми в стандартних відведеннях Ейнтховена зображена на рис. 11. До неї входять:

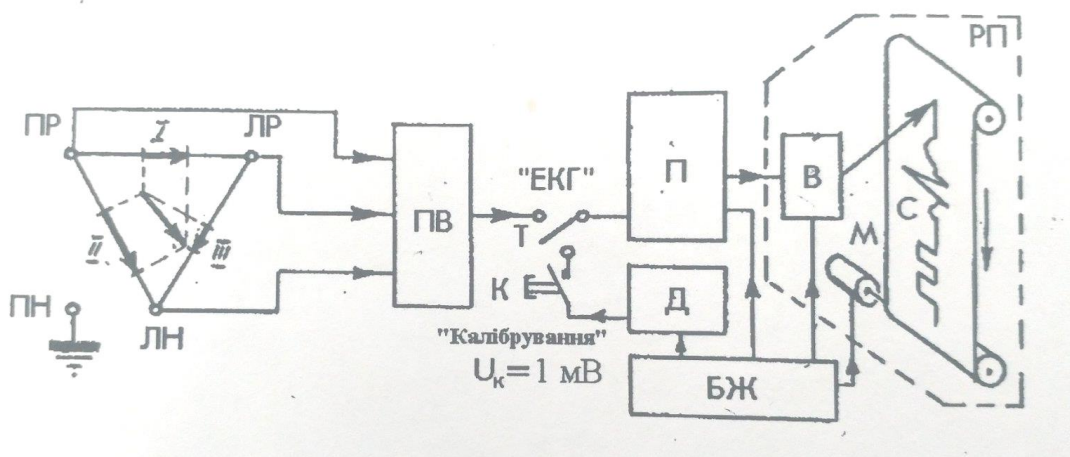


Рис.11

- **електроди**, які накладаються на кінцівки пацієнта;
- **перемикач відведень** (ПВ) призначений для під'єднання потрібного відведення до входу підсилювача П;
- **підсилювач** П підсилює в багато разів мале значення напруги, що отримане на електродах, і подає в реєстратор.
- **реєструючий пристрій** (РП) перетворює електричні коливання в механічні зміщення якоря електромагніту (електромеханічний вібратор В). До якоря прикріплене теплове перо, яке реєструє його механічні зміщення на стрічці С;
- **стрічкопротягувальний механізм** М;
- **джерело** Д калібрувальної напруги 1 мВ;
- **перемикач** Т **режимів роботи**: калібрування або запис ЕКГ;
- **блок живлення** БЖ.

В сучасній практиці застосовують тепловий спосіб запису ЕКГ пером, яке підігрівається мініатюрним електронагрівником. Запис здійснюється на спеціальну стрічку, основа якої виготовляється з чорного паперу, що покривається білим легкоплавким шаром суміші воску і крейди. При русі по ній нагрітого пера, верхній білий шар плавиться і з'являється чорний колір її основи. Цей спосіб реєстрації дає можливість зразу спостерігати запис ЕКГ в прямокутній системі координат.

6. Калібрування електрокардіографа

Незалежно від технічної конструкції кожен електрокардіограф має пристрій для регулювання і контролю підсилення. Для цього на підсилювач подається стандартна калібрувальна напруга, що дорівнює 1 mV. Підсилення електрокардіографа встановлюється таким чином, щоб ця напруга викликала відхилення системи, що реєструє, на 5 або 10 або 20 мм.

Перш ніж починати запис ЕКГ, перемикач відведень встановлюється в положення «калібровка». Цим забезпечується можливість подачі на підсилювач стандартної калібрувальної напруги 1 мВ.

Потім встановлюється необхідна чутливість підсилювача вибором одного із вказаних нижче значень:

- «10 мм/мВ» - калібрувальна напруга 1 мВ викликає відхилення теплового пера на паперовій стрічці на 10 мм (рис. 12);
 - забезпечує стандартне підсилення сигналу кожного відведення;
- «5 мм/мВ» - калібрувальна напруга 1 мВ викликає відхилення теплового пера на паперовій стрічці на 5 мм;
 - забезпечує зменшення підсилення (при занадто великій амплітуді зубців ЕКГ);
- «20 мм/мВ» - калібрувальна напруга 1 мВ викликає відхилення теплового пера на паперовій стрічці на 20 мм;
 - забезпечує збільшення підсилення (при малій амплітуді зубців ЕКГ);

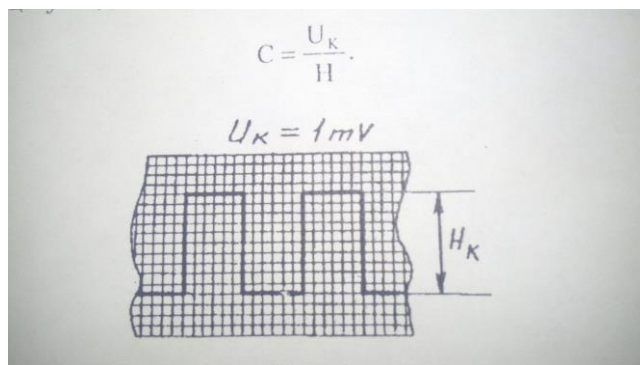


Рис. 12. Калібрувальний сигнал.

Такі сигнали (рис.12) користувач створює в режимі калібрування шляхом короткочасного (декілька разів в секунду) натискування на кнопку «1 мВ».

Знаючи величину калібрувальної напруги U_K і висоту калібрувального сигналу H_K , записаного на стрічку, обчислюють ціну поділки паперової стрічки за формулою:

$$C = \frac{U_K}{H_K}.$$

Калібрування електрокардіографа напругою 1 мВ дозволяє порівнювати між собою ЕКГ пацієнта, зареєстровані в різний час і різними приладами.

7. Визначення параметрів електрокардіограм:

амплітуди зубців Р, Q, R, S, Т в мВ, протяжності серцевого циклу і частоти скорочень серця

* Знаючи ціну поділки паперової стрічки, обчислюють амплітуди (в мВ) зубців Р, Q, R, S, Т за формулою:

$$U = CH,$$

де H – висота відповідного зубця в поділках (мм).

* Тривалість (в секундах) серцевого циклу: $\tau = \frac{l}{v},$

де l – довжина (в мм) переміщення стрічки за час серцевого циклу,

v – швидкість (в мм/с) руху стрічки.

Примітка: . Стрічкопротягувальний механізм в електрокардіографі забезпечує рух паперової стрічки з різною швидкістю: 25, 50 мм/с.

* Частота (в скор./хв.) скорочень серця (частоту пульсу):

$$\nu = \frac{60}{\tau}.$$

3.3. Перелік основних термінів, характеристик, законів, які повинен засвоїти студент при підготовці до заняття.

Електричний диполь	Електричний диполь (або просто диполь) - система, яка складається з двох рівних за величиною і протилежних за знаком зарядів, розташованих на невеликій відстані l один від одного.
Електричний момент диполя	Електричний момент диполя дорівнює добутку заряду на відстань між зарядами і напрямлений від негативного заряду до позитивного: $\vec{P} = q \cdot \vec{l}$.
Струмовий диполь	Струмовим диполем (дипольним електричним генератором) називається така система, яка складається з додатного полюса (витоку струму) і від'ємного полюса (стоку струму), які розташовані на невеликій відстані l один від одного.
Момент струмового диполя	Момент струмового диполя: $\vec{P}_{стр} = I \cdot \vec{l}$
Інтегральний електричний вектор серця (ІЕВС)	Інтегральний електричний вектор серця (ІЕВС) – це векторна сума дипольних моментів струмових диполів усього об'єму серця: $\vec{E} = \sum \vec{P}_{стр.i}$ У ході серцевого скорочення ІЕВС змінюється як за величиною, так і за напрямом в просторі.
Електрокардіограма (ЕКГ)	Електрокардіограма (ЕКГ) – це графічне зображення залежності різниці потенціалів у відповідному відведенні від часу за повний серцевий цикл.

Векторелектрокардіограма (ВЕКГ)	Векторелектрокардіограма (ВЕКГ) - це графічне зображення траєкторії руху кінця інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС) у вигляді петель <i>P</i> , <i>QRS</i> і <i>T</i> , які утворюються в результаті взаємно перпендикулярного складання двох електрокардіограм.
--	--

3.4. Написати в зошиті протокол лабораторної роботи № 20

Протокол повинен містити: назву роботи, мету, прилади і матеріали, стислу теоретичну частину, назву завдань, таблиці, формули для розрахунків.

3.5. Завдання для самоконтролю (тести):

1. Залежність різниці потенціалів у певному відведенні від часу за повний серцевий цикл називається:
 - а) електрограмою;
 - б) векторкардіограмою;
 - в) електрокардіограмою;
 - г) еквівалентним електричним вектором серця.
2. Струмовий диполь – це система, яка складається з:
 - а) рівних за величиною, але протилежних за знаком електричних зарядів;
 - б) електричних зарядів протилежного знаку, розташованих на невеликій відстані;
 - в) полюсів генератора, між якими існує електричний струм;
 - г) не має вірної відповіді.
3. Електричний момент зарядового диполя (P) – основна характеристика зарядового диполя і визначається за формулою:
 - а) $P = q - l$;
 - б) $P = q / l$;
 - в) $P = q + l$;
 - г) $P = q \cdot l$.
4. Електричний момент струмового диполя – основна характеристика струмового диполя і визначається за формулою:

- а) $P_{стр} = I / l$;
- б) $P_{стр} = I \cdot l$;
- в) $P_{стр} = I + l$;
- г) $P_{стр} = I - l$.

5. Яке з тверджень відноситься до постулатів теорії Ейнштейна?

- а) серце – генератор струму, що розташований в об'ємному провіднику;
- б) ІЕВС знаходиться в однорідному ізотропному провідному середовищі;
- в) інтегральний електричний вектор серця (ІЕВС) змінюється за величиною і напрямком в процесі роботи серця;
- г) всі відповіді вірні.

6. Як утворюються три стандартні відведення?

- а) I відведення – (ПР–ЛР); II відведення – (ПР–ЛН); III відведення – (ЛР–ЛН).
- б) I відведення – (ПР–ЛР); II відведення – (ЛР–ЛН); III відведення – (ПР–ЛН).
- в) I відведення – (ПР–ЛН); II відведення – (ЛР–ЛН); III відведення – (ПР–ЛР).

7. Електрокардіограф складається з двох основних блоків:

- а) підсилювач, реєструючий пристрій;
- б) перемикач відведень, реєструючий пристрій;
- в) перемикач відведень, підсилювач;
- г) електроди, підсилювач.

8. Електрокардіограма (ЕКГ) - це графічне зображення:

- а) залежності різниці потенціалів у певному відведенні від часу за повний серцевий цикл;
- б) величини дипольного моменту інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС);
- в) миттєвих значень орієнтації інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС) протягом повного серцевого циклу;
- г) петель Р, QRS і Т руху кінця інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС);

9. Графічне зображення проекції кривої у просторі, яку описує кінець інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС) у вигляді петель Р, QRS і Т, називається:

- а) векторелектрокардіограмою;
- б) електрокардіограмою двох відведень;

- в) біопотенціалом серця;
- г) інтегральним електричним вектором серця.

10. Якого кольору штекер кабелю відведень під'єднують до електроду правої руки (ПР), лівої руки (ЛР), лівої ноги (ЛН), правої ноги (ПН)?
- а) ПР – жовтий; ЛР – зелений; ЛН – чорний; ПН – червоний;
 - б) ПР – чорний; ЛР – червоний; ЛН – жовтий; ПН – зелений;
 - в) ПР – червоний; ЛР – жовтий; ЛН – зелений; ПН – чорний.
 - г) ПР – зелений; ЛР – червоний; ЛН – жовтий; ПН – чорний;

Правильні відповіді: 1–в; 2–в; 3–г; 4–б; 5–г; 6–а; 7–г; 8–а; 9–а; 10–в.

4. ЛІТЕРАТУРА

1. Чалий О.В., Агапон Б.Т., Цехмістер Я.В. та ін. Медична і біологічна фізика: Підручник для студентів ВМЗО III-IV рівнів акредитації. - К.: Книга плюс, 2005. - с. 219 – 228.
2. Дяков В.А. і співавтори. Лабораторний практикум з медичної і біологічної фізики. –В.: ВДМУ, 2010.– Лабораторна робота № 20, с. 10-176.

Тести для перевірки кінцевого рівня знань

1. Електричним зарядовим диполем називається система, яка складається із двох:
 - а) рівних за величиною і протилежних за знаком точкових електричних зарядів, які знаходяться на невеликій відстані l один від одного;
 - б) точкових протилежних за знаком електричних зарядів, розташованих на деякій відстані l один від одного;
 - в) точкових електричних зарядів, розташованих на певній відстані один від одного;
 - г) однакових за знаком і величиною точкових електричних зарядів, які знаходяться на відстані один від одного.
2. За якою формулою визначається потенціал в точці A , що знаходиться на відстані r від електричного диполя?

а)
$$\varphi_A = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot l \cdot \cos\alpha}{r^2};$$

$$\text{б)} \quad \varphi_A = \frac{1}{4\pi\gamma} \cdot \frac{I \cdot l \cdot \cos\alpha}{r^2};$$

$$\text{в)} \quad \varphi_A = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q \cdot I \cdot \cos\alpha}{r^2}.$$

3. В якому середовищі повинен знаходитись електричний диполь?

- а) провідник;
- б) діелектрик;
- в) електроліт;
- г) всі відповіді вірні.

4. На рис. 1 зображено струмовий диполь.

За якою формулою визначається потенціал його поля в точці А?

$$\text{а)} \quad \varphi_A = \frac{1}{4\pi\gamma} \cdot \frac{I \cdot l \cdot \cos\alpha}{r^2};$$

$$\text{б)} \quad \varphi_A = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot l \cdot \cos\alpha}{r^2};$$

$$\text{в)} \quad \varphi_A = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q \cdot I \cdot \cos\alpha}{r^2}.$$

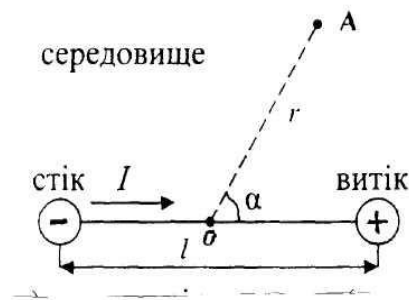


Рис.1

5. В якому середовищі повинен знаходитись струмовий диполь?

- а) діелектрик;
- б) електроліт;
- в) вакуум або сухе повітря;
- г) всі відповіді вірні.

6. На рис. 2 зображено трикутник Ейнтховена. Як утворюються три стандартні відведення?

- а) I відведення – (ПР – ЛР);
II відведення – (ПР – ЛН);
III відведення – (ЛР – ЛН).
- б) I відведення – (ПР – ЛР);
II відведення – (ЛР – ЛН);
III відведення – (ПР – ЛН).
- в) I відведення – (ПР – ЛН);
II відведення – (ЛР – ЛН);
III відведення – (ПР – ЛР).

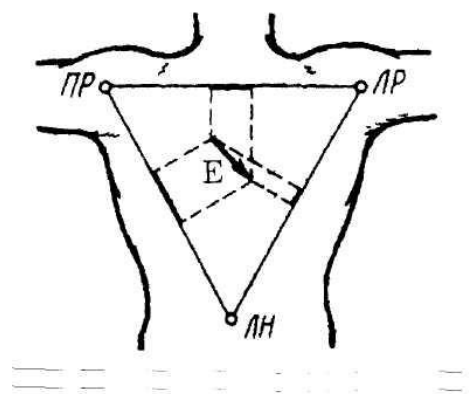


Рис. 2.

7. Графічне зображення проекції кривої у просторі, яку описує кінець інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС) у вигляді петель Р, QRS і Т, називається:

- а) векторелектрокардіограмою;

- б) електрокардіограмою двох відведень;
- в) біопотенціалом серця;
- г) інтегральним електричним вектором серця.

8. Якого кольору штекер кабелю відведень під'єднують до електроду правої руки (ПР), лівої руки (ЛР), лівої ноги (ЛН), правої ноги (ПН)?

- а) ПР – жовтий; ЛР – зелений;
ЛН – чорний; ПН – червоний;
- б) ПР – чорний; ЛР – червоний;
ЛН – жовтий; ПН – зелений;
- в) ПР – червоний; ЛР – жовтий;
ЛН – зелений; ПН – чорний.

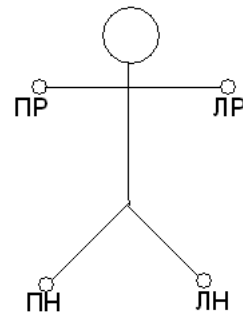


Рис. 3

9. Залежність різниці потенціалів від часу, зареєстровану графічно від відповідних органів, називають:

- а) електрограма;
- б) реограма;
- в) томограма;
- г) копрограма.

10. Виберіть варіант відповіді, у якому правильно вказано приклади електрограм:

- а) фонокардіограма, електрокардіограма, магнітокардіограма;
- б) електроенцефалограма, електроміограма;
- в) реограма, електрокардіограма, томограма;
- г) копрограма, томограма, електрокардіограма.

11. Систему, яка складається з двох протилежних за знаком і рівних за величиною зарядів, розташованих на невеликій відстані один від одного, називають:

- а) електричним диполем;
- б) електричним полем;
- в) струмовим диполем;
- г) електричним зарядом.

12. Зубці електрокардіограми позначають такими літерами:

- а) G, R, S, T, U; б) O, P, Q, R, S; в) P, G, R, S, T; г) P, Q, R, S, T.

13. Вектор-електрокардіограма (ВЕКГ) - це графічне зображення:

- а) миттєвих значень дипольного моменту інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС);
- б) проєкцій величини дипольного моменту інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС);
- в) траєкторії руху кінця інтегрального електричного вектора серця (ІЕВС) у вигляді петель (Р , QRS , Т), які отримують шляхом геометричного додавання двох електрокардіограм ;
- г) залежності різниці потенціалів від часу у певному відведенні за повний серцевий цикл.

14. Де розміщені вершини трикутника Ейнтховена?

- а) права рука, ліва рука, ліва нога;
- б) права рука, права нога, ліва нога;
- в) права нога, ліва нога, ліва рука;
- г) права рука, ліва рука, права нога.

15. Струмовий диполь – це система, яка складається з...

- а) рівних за величиною, але протилежних за знаком електричних зарядів;
- б) електричних зарядів протилежного знаку, розташованих на невеликій відстані;
- в) полюсів генератора, між якими існує електричний струм;
- г) не має вірної відповіді.

16. На рис. 4 зображена блок-схема електрокардіографа. Як називаються блоки?

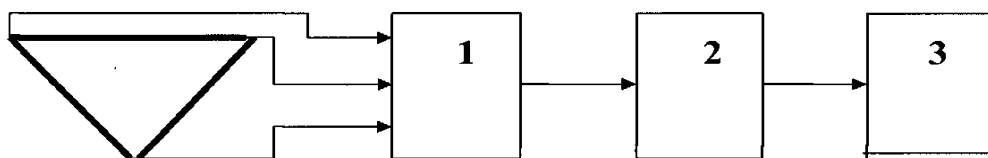


Рис. 4.

- а) 1 - підсилювач; 2 - перемикач відведень; 3 - реєструючий пристрій;
- б) 2 - підсилювач; 3 - перемикач відведень; 1 - реєструючий пристрій;
- в) 3 - підсилювач; 1 - перемикач відведень; 2 - реєструючий пристрій;
- г) 2 - підсилювач; 1 - перемикач відведень; 3 - реєструючий пристрій.

Лабораторна робота №20

ВИВЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ОСНОВ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЇ

Мета:

1. Вивчити електричні характеристики серця.
2. З'ясувати фізичні основи методу електрокардіографії.
3. Навчитися знімати ЕКГ, визначати амплітуди зубців і часові характеристики електрокардіограм.

Прилади і матеріали:

1. Електрокардіограф ЭК1Т – 04 "АКСИОН".
2. Інструкція до електрокардіографа.
3. Фізіологічний розчин.
4. Спирт.
5. Марлеві прокладки.

Опис приладу

В лабораторній роботі використовується електрокардіограф ЭК1Т – 04 «АКСИОН».

♦ **Призначення електрокардіографа:** Електрокардіограф ЭК1Т-04 "АКСИОН" - це портативний одноканальний прилад, який призначений для ручного чи автоматичного запису біоелектричних потенціалів серця від певних відведень на рухому термочутливу стрічку з міліметровою сіткою. Він використовується для діагностики функціонального стану серцевосудинної системи людини, як у стаціонарі (лікарні), так і в польових умовах при наданні швидкої допомоги.

♦ **Будова електрокардіографа.** Він складається з двох основних блоків: підсилювач, реєструючий пристрій. Спрощена блок - схема запису електрокардіограми в стандартних відведеннях Ейнтховена зображена на рис.1.

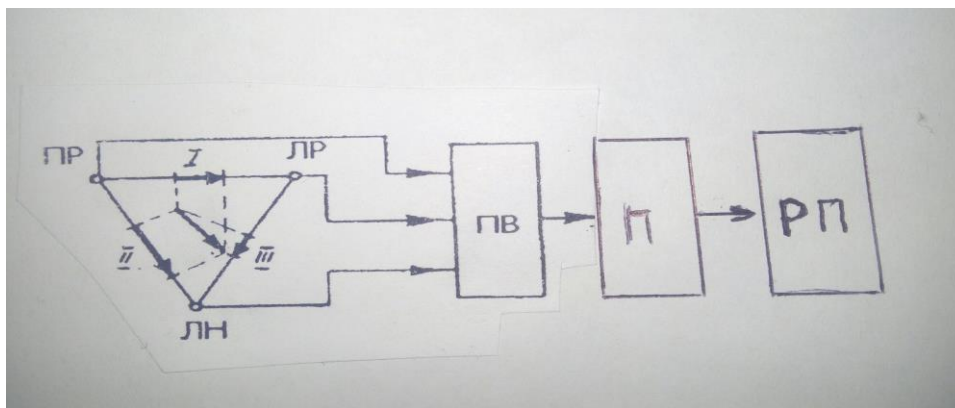


Рис.1. ПВ - перемикач відведень, П - підсилювач, РП – реєструючий пристрій.

♦ **Принцип роботи електрокардіографа.** Мале значення напруги, що отримане за допомогою електродів в певному відведенні, подається в підсилювач П, який підсилює її в багато разів і подає в реєструючий пристрій РП. Регістратор перетворює ці електричні коливання в механічні, які реєструються тепловим пером на паперовій стрічці.

♦ **Основні технічні дані:**

- Чутливість підсилювача: 5; 10; 20 мм/мВ.
- Швидкість руху стрічки: 25 / 50 мм/с.
- Спосіб запису сигналів тепловий.
- Режим запису сигналів ручний / автоматичний.
- Час установа робочого режиму не більше 1хв.
- Напруга живлення приладу: від електромережі $\sim (220 \pm 22)$ В, 50Гц.

♦ **Особливості експлуатації електрокардіографа (заходи безпеки):**

- Під час роботи електрокардіограф повинен бути заземлений.
- Не встановлювати надмірну ступінь розжарення кінчика теплового пера, оскільки можна вивести з ладу його нагрівний елемент;
- Не експлуатувати електрокардіограф у разі значного дрижання теплового пера (при великих амплітудах дрижання робота приладу блокується автоматично), а тому слід перевірити якість контуру заземлення ($\perp$) і електричного контакту електродів зі шкірою пацієнта.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Завдання 1. Вивчення призначення, будови та особливостей експлуатації електрокардіографа ЕКІТ – 04 «АКСИОН» за інструкцією.

Завдання 2. Калібрування електрокардіографа та запис ЕКГ в трьох стандартних відведеннях.

- 2.1. Підготувати пацієнта для запису ЕКГ в 3-х стандартних відведеннях.
- 2.2. Під'єднати шнур до електромережі ~ 220 В та увімкнути блок живлення.
- 2.3. Увімкнути електрокардіограф, при цьому засвітяться індикатори режимів: «CAL», «10 mm/mV», «50 mm/s», «> 0 <».

- 2.4. Встановити теплове перо посередині ширини стрічки регулятором, що розміщений на правій панелі вверху.
- 2.5. Увімкнути антитреморний режим, натиснувши кнопку «ФИЛЬТР», при цьому його індикатор засвітиться.
- 2.6. Вибрати швидкість руху стрічки 25 мм/с, натиснувши кнопку «25, 50 mm/s».
- 2.7. Відключити режим заспокоєння підсилювача, натиснувши кнопку «> 0 <», при цьому його індикатор погасне.
- 2.8. Зеленою кнопкою «СТАРТ/СТОП» увімкнути стрічкопротягувальний механізм і, натискуючи короткочасно декілька раз кнопку «1mV», записати на стрічку сигнали калібрування.
- 2.9. Не вимикаючи стрічкопротягувальний механізм і використовуючи кнопку «Ї», записати ЕКГ пацієнта в 3-х стандартних відведеннях.
- 2.10. Закінчивши запис ЕКГ, кнопкою «СТАРТ/СТОП» вимкнути стрічкопротягувальний механізм.
- 2.11. Перевести прилад у вихідний стан, натиснувши кнопку «СБРОС».
- 2.12. Від'єднати прилад від електромережі.

Завдання 3. Обробка результатів вимірювань.

3.1. Обчислити ціну поділки калібровки: $C = U_K / H_K$, де $U_K = 1$ мВ, $H_K = 10$ мм.

3.2. Визначити амплітуду зубців ЕКГ:

$$U_P = C \cdot H_P, \quad U_Q = C \cdot H_Q, \quad U_R = C \cdot H_R, \quad U_S = C \cdot H_S, \quad U_T = C \cdot H_T.$$

3.3. Визначити тривалість серцевого циклу: $\tau = \frac{l}{v}$, де $v = 25$ мм/с.

Примітка: l – відстань між вершинами двох сусідніх R зубців.

3.4. Визначити частоту пульсу: $\nu = \frac{60}{\tau}$.

3.5. Результати обчислень занести в таблицю.

№ стандартного відведення	τ , с	v , скор/хв	U_P мВ	U_Q мВ	U_R мВ	U_S мВ	U_T мВ
1							
2							
3							

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСІЇ ІМПЕДАНСУ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:

Актуальність теми:

Усі біологічні об'єкти, як тваринного так і рослинного походження, проявляють при дії на них постійного чи змінного електричних полів електропровідні та діелектричні властивості. Цитоплазма клітин, кров, лімфа та інші біологічні рідини є порівняно хорошими провідниками електричного струму. Мембрани клітин, епідерміс шкіри, кістки, різноманітні біополімери і деякі інші речовини організму, навпаки, дуже погано проводять або майже не проводять електричний струм, тобто поведуть себе як діелектрики (ізолятори). Електричні властивості біооб'єктів є пасивними і оцінюються електропровідністю, діелектричною проникністю, тангенсом кута діелектричних втрат, повним опором (імпедансом) та іншими. Ці параметри залежать від фізіологічного стану організму і використовуються в медичній практиці для діагностики кровонаповнення серцево-судинної системи та капілярної мережі легенів, нирок, кінцівок і т.д., а також для контролю життєздатності консервованих трансплантантів (шкіри, кісток, рогівок, крові та інших).

Критерієм життєздатності тканин і органів є також частотна залежність (дисперсія) імпедансу. В міру відмирання тканин спостерігається зменшення низькочастотного опору, тому коефіцієнт поляризації наближається до одиниці.

2. НАВЧАЛЬНІ ЦІЛІ:

Знати:

- Механізм електропровідності біотканин при дії постійного і змінного електричних полів.

Вміти:

- Пояснювати фізичні основи дії постійного і змінного електричних полів на

організм людини.

- Аналізувати еквівалентні електричні схеми біотканин, дисперсії імпедансу біотканин в нормі і при патології.
- Досліджувати частотну залежність імпедансу біооб'єкта.

3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДОАУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ

3.1. Теоретичні питання:

1. Електричний струм, його властивості і характеристики. Види струму.
2. Електропровідність біологічних тканин і рідин.
3. Діелектричні властивості біоб'єктів. Поляризація. Види поляризацій в біологічних об'єктах.
4. Дія постійного струму на біологічні тканини. Закон Ома для ділянки кола з біооб'єктом. Гальванізація. Електрофорез.
5. Електропровідність біологічних об'єктів при дії змінного електричного поля. Електричні моделі біооб'єктів. Імпеданс (повний опір) біооб'єктів при змінному струмі.
6. Дисперсія імпедансу. Коефіцієнт поляризації. Реографія.

3.2. Зміст теми

1. Електричний струм, його властивості і характеристики. Види струму

Електричний струм – це впорядкований (направлений) рух електричних зарядів.

Властивості електричного струму:

- теплова дія (відсутня у напівпровідниках);
- хімічна дія (проявляється переважно в електролітах);
- магнітна дія (проявляється в усіх провідниках).

Кількісні характеристики електричного струму:

- **Сила струму** – відношення кількості заряду dq , який переноситься через переріз провідника, до часу dt , за який цей заряд переноситься:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad [I] = \frac{Kл}{c} = A \text{ (Ампер)}.$$

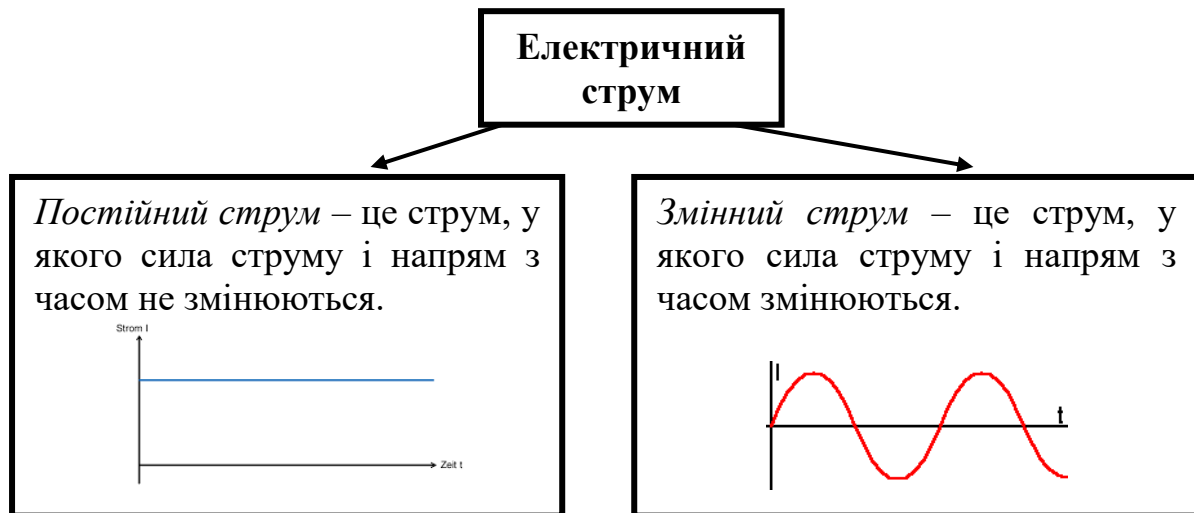
Сила струму – скалярна величина.

- Густина струму – відношенню сили струму dI до площі поперечного перерізу провідника dS , через яку цей струм проходить:

$$j = \frac{dI}{dS}, \quad [j] = \frac{A}{m^2}.$$

Густина струму – векторна величина: вектор густини струму збігається з напрямом струму, тобто із швидкістю впорядкованого руху позитивних носіїв струму.

Види електричного струму:



Вид струму	Сила струму (I)	Напрямок	Назва електродів
постійний	const	const	Катод (-); Анод (+)
змінний	змінюється ($\sim$)	змінюється ($\sim$)	Електрод; Електрод

Усі біологічні об'єкти при дії на них постійного чи змінного електричних полів проявляють електропровідні та діелектричні властивості.

Властивості біооб'єктів (БО) <i>(при дії на них постійного чи змінного електричних струмів)</i>	
Електропровідні (БО проводять електричний струм)	Діелектричні (БО не проводять електричний струм)
• Кров • Лімфа • Ліквор • Цитоплазма клітин та інші біологічні рідини.	• Мембрани клітин • Епідерміс шкіри • Кістки • Біополімери та ін.

2. Електропровідність біологічних тканин і рідин

Електропровідні властивості біологічних рідин забезпечуються, головним чином, різноманітними неорганічними електролітами, молекули яких здатні дисоціювати на іони з протилежними знаками зарядів, наприклад, Na^+ і Cl^- , H^+ і OH^- та ін. Крім того, іонний склад біологічних електролітів доповнюється органічними іонами. Останні утворюються молекулами білків, амінокислот та іншими високомолекулярними сполуками, які в залежності від рН середовища здатні приймати додатній або від'ємний знаки електричного заряду.

Вільні іони біологічних електролітів під дією зовнішнього електричного поля переміщуються направлено, утворюючи **струм провідності**.

Електропровідністю називається здатність провідника (речовини біооб'єкта) проводити електричний струм під дією зовнішнього постійного чи змінного електричних полів. Вона кількісно оцінюється фізичною величиною G , яка обернено пропорційна до опору R провідника:

$$G = \frac{1}{R}, \quad [G] = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{Ом}^{-1} = \text{См} \text{ (сіменс)}$$

Електричний опір R речовини біооб'єкта залежить від питомого опору ρ , довжини l і поперечного перерізу S цього провідника:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad [R] = \text{Ом}.$$

Величина σ , яка обернено пропорційна до питомого електричного опору речовини біооб'єкта, називається **питомою електропровідністю**:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \quad [\sigma] = \frac{\text{См}}{\text{м}} \text{ (сіменс поділений на метр)}.$$

Питома електропровідність однорідного електроліту описується формулою:

$$\sigma = \alpha n q_0 (b_+ + b_-) \quad \text{при } t = \text{const}.$$

Видно, що електропровідність однорідного електроліту збільшується відповідно до збільшення таких характеристик: коефіцієнта дисоціації α ,

концентрації молекул електроліту n , заряду носіїв q_0 , рухливості іонів b_+ і b_- .

З підвищенням температури електропровідність електроліту також зростає, оскільки зменшується питомий опір електролітів. Це відбувається завдяки:

- збільшенню дисоціації зі збільшенням температури;
- зменшенню в'язкості рідини, в результаті чого збільшується рухливість іонів.

3. Діелектричні властивості біоб'єктів. Поляризація. Види поляризації в біологічних об'єктах.

Діелектрики (ізолятори) – це тіла, які не проводять електричний струм, оскільки в них немає вільних електричних зарядів. Вони складаються з нейтральних атомів або молекул. В залежності від молекулярної будови діелектрики бувають: з полярними молекулами, з неполярними молекулами, кристалічні.

У молекул *полярних діелектриків* (наприклад, H_2O , SO_2 , CO) несиметрична будова і, як наслідок, вони мають дипольний момент $\vec{P}_i$ при відсутності зовнішнього електричного поля. Внаслідок теплового руху дипольні моменти полярних молекул орієнтовані у просторі хаотично і їх результуючий момент дорівнює 0.

У молекул *неполярних діелектриків* (наприклад, N_2 , H_2 , O_2 , CO_2) симетрична будова і за відсутності зовнішнього електричного поля дипольний момент $\Sigma \vec{P}_i = 0$.

Іонні діелектрики (наприклад, KCl , $NaCl$) являють собою *просторові ґратки* з чередуванням іонів різних знаків.

У всіх видів діелектриків під дією зовнішнього електричного поля відбувається явище поляризації. **Поляризація діелектриків** – це процес орієнтації диполів або поява під дією зовнішнього електричного поля орієнтованих за полем диполів.

При дії постійного електричного поля різноманітні поляризації в біоб'єкті розпочинаються одночасно, але завершуються за різні проміжки часу. Тому кожний вид поляризації описується не тільки відповідним механізмом, але і **часом релаксації** τ_p – часом, необхідним для встановлення динамічної рівноваги стану молекулярної системи, що збуджена електричним полем.

Розглянемо деякі види поляризації,

що мають місце в біологічних системах:

- **електронна поляризація** відбувається в діелектриках з неполярними молекулами і являє собою процес зміщення електронів на своїх орбітах відносно ядер під дією зовнішнього електричного поля. При цьому електронейтральна система атомів перетворюється в індукований диполь $\vec{P}_i$ (рис. 1). Час релаксації $\tau_p = 10^{-15} - 10^{-14}$ с.

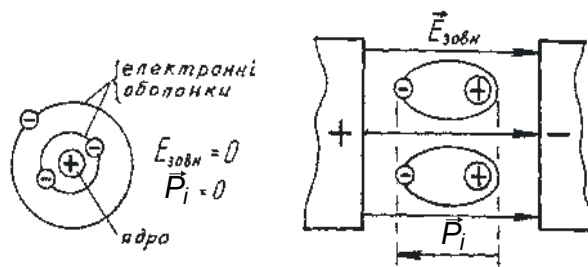


Рис. 1

- **дипольна поляризація** відбувається в діелектриках з полярними молекулами і являє собою орієнтацію молекул в зовнішньому електричному полі і утворення власного протидіючого електричного поля (рис. 2). Час релаксації $\tau_p = 10^{-13} - 10^{-7}$ с.

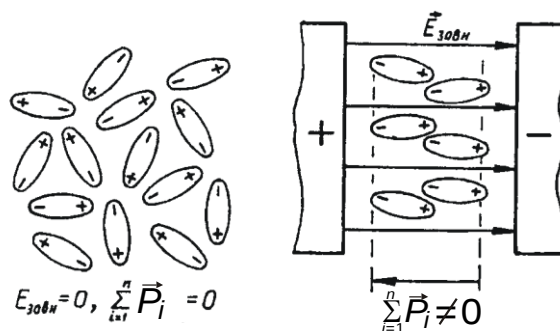


Рис. 2

- **іонна поляризація** – зміщення іонів відносно кристалічної ґратки під дією зовнішнього електричного поля, внаслідок чого іон перетворюється на індукований диполь (рис. 3). Час релаксації $\tau_p = 10^{-14} - 10^{-11}$ с.

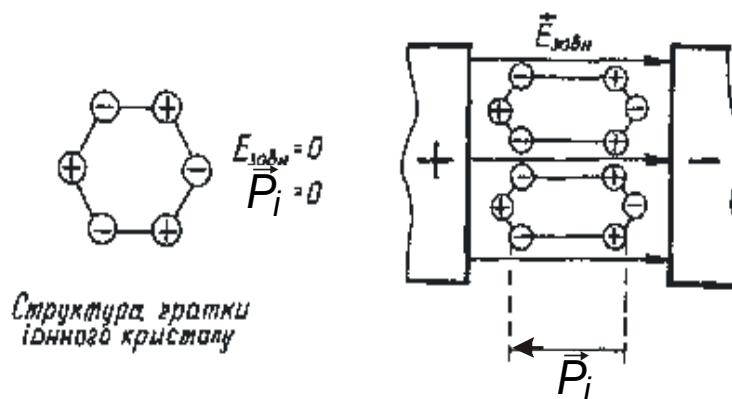


Рис. 3

- **макроструктурна поляризація** – це процес відносного зміщення в протилежних напрямках вільних різнойменних зарядів як в клітинних структурах (ядрах, мітохондріях та ін.), так і в самій клітині під дією зовнішнього електричного поля. Внаслідок цього вільні іони поляризують протилежні поверхні обмежуючих діелектричних оболонок і тим самим утворюють власне електричне поле, яке протилежне зовнішньому (рис. 4). Час релаксації $\tau_p = 10^{-8} - 10^{-3}$ с.

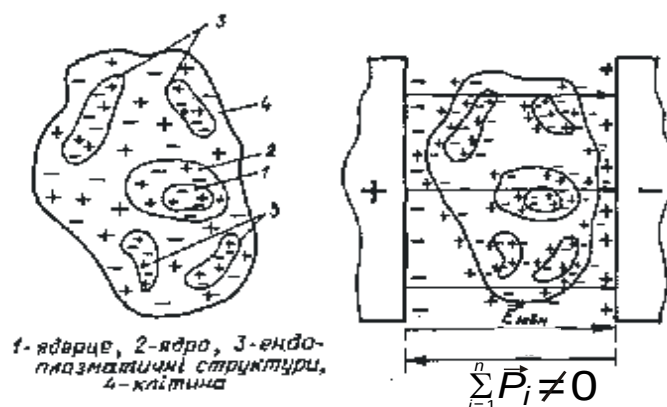


Рис. 4

- **структурна поляризація** (рис. 5) – це взаємне зміщення полярних ланцюгів складної молекули (наприклад, білка) під дією зовнішнього електричного поля. В результаті змінюється вторинна структура макромолекули, а, отже, електричні і хімічні властивості. Час релаксації в

залежності від внутрішнього молекулярного стану може приймати значення в досить широких межах

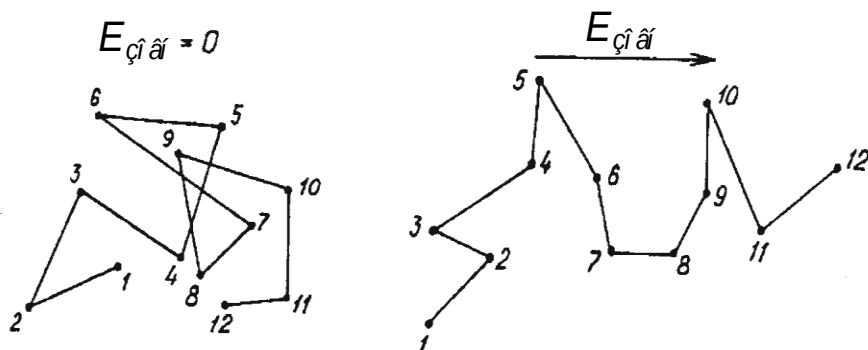


Рис. 5

- **електролітична поляризація** – це процес перерозподілу протилежних іонів електроліту біля електродів під дією електричного поля. Внаслідок цього в приелектродних шарах збільшується концентрація іонів певного знаку, які створюють в електроліті власне електричне поле протилежного напрямку. Час релаксації $\tau_p = 10^{-4} - 10^{-2}$ с.

Описані види поляризаційних процесів притаманні усім біологічним об'єктам. Найбільш сильно проявляють себе дипольна, структурна і макроструктурна поляризації.

4. Дія постійного струму на біологічні тканини. Закон Ома для ділянки кола з біоб'єктом. Гальванізація. Електрофорез

Фізичні основи дії постійного струму на біологічні тканини базуються на розглянутих вище електричних властивостях органів і тканин.

При проходженні постійного електричного струму через біоб'єкти виникають явища, характерні як для електролітів (струми провідності), так і для діелектриків (поляризація).

Первина дія постійного струму на організм зумовлена двома процесами:

- рухом заряджених частинок (іонів);
- поляризацією (виникненням дипольного моменту в тканинах).

Поляризаційні процеси є причиною утворення електрорушійної сили (е.р.с.) поляризації E_n , електричне поле якої протилежне за напрямком до зовнішнього електричного поля. При цьому напруга U , що подається на біоб'єкт, не змінюється ($U=const$), а е.р.с. поляризації E_n з часом зростає від 0 до E_{max} — це зумовлює зменшення значення сили струму від I_{max} до I_{min} в замкнутому електричному колі.

В результаті вищенаведеного закон Ома для біотканини буде мати вигляд:

$$I = \frac{U - E_n}{R} \quad \text{при } t = const.$$

де R — опір біотканини, t — температура.

Графічно це можна зобразити таким чином (рис. 6):

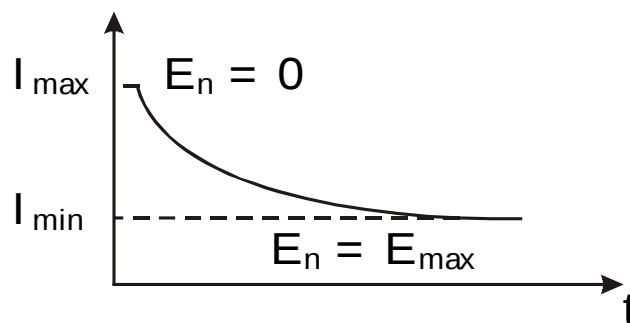


Рис.6

Поява іонів і зміна їх концентрації призводять до порушення нормального розподілу зарядів в середині і зовні клітини і, як наслідок, її функції. Відбуваються конформаційні зміни біомолекул.

Найкращу провідність мають нервові волокна, тому навіть слабкий струм може вразити нервову систему. Велику небезпеку становить проходження струму через серце і мозок. Збільшення частоти струму зменшує його шкідливу дію.

До фізіотерапевтичних методик з використанням постійних іонних струмів відносять гальванізацію і електрофорез.

Гальванізація — лікувальна методика, за допомогою якої на біоб'єкт діють постійним струмом низької напруги (до 60 В) малої сили (до 50 mA) через

пластинчасті електроди, приєднані до тіла людини. Постійний струм у процесі проведення процедури гальванізації подразнює шкірні рецептори. Цей імпульс передається в кору головного мозку, а звідти повертається у вигляді певного рефлексу (судинорозширювального). У фізіотерапії гальванізація спрямована на регуляцію функцій ендокринної та нервової систем, покращення секреції залоз, стимулювання обміну речовин, нормалізацію моторики травного тракту, підвищення імунних сил організму. До лікувальних властивостей гальванізації можна віднести протизапальну, знеболювальну, метаболічну, заспокійливу дію на організм людини. Крім того, після такої процедури підвищуються захисні функції шкіри, поліпшується кровообіг, поступово відновлюються уражені тканини.

Електрофорез – локальне введення лікарських препаратів під дією постійного електричного струму. При проведенні електрофорезу під один з електродів підкладають прокладку з розчином відповідного лікарського препарату. Препарат у розчині розпадається на іони, які рухаються у відповідних напрямках. Ліки вводять з того електроду, заряд якого вони мають: аніони вводять з катоду, катіони – з аноду. Наприклад, з катоду вводять хлор, бром, йод, пеніцилін, з аноду – кальцій, новокаїн, хінін.

6. Електропровідність біологічних об'єктів при дії змінного струму. Електричні моделі біоб'єктів. Імпеданс (повний опір) біоб'єктів при змінному струмі.

Поляризаційні процеси досить сильно змінюють електропровідні властивості досліджуваних біоб'єктів, тому для зменшення їх впливу на результати електричних вимірювань застосовують змінний електричний струм.

Найбільш повну інформацію про механізм електропровідності біологічного об'єкту можна отримати, якщо його досліджувати за допомогою змінного електричного струму.

Електропровідність біологічних тканин при змінному струмі визначається активним (омічним) і ємнісним опорами. Ємнісні властивості проявляються за рахунок мембран, які можна уявити у вигляді конденсаторів.

В залежності від структури тканини для пояснення її електропровідності при змінному струмі використовується певна еквівалентна схема, наприклад: клітини, шкіри, м'язів (рис. 7).

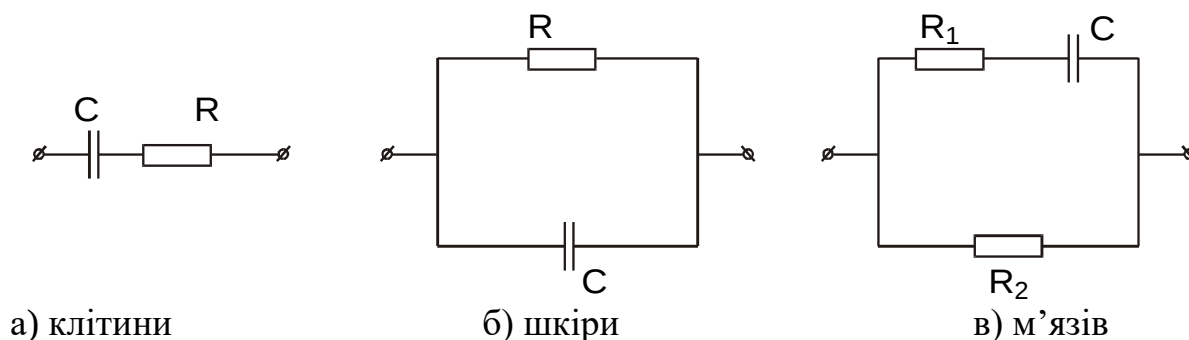


Рис. 7

Повний опір тканини при змінному струмі називається **імпедансом**. Наведемо значення імпедансів в залежності від відповідної еквівалентної схеми:

а) для клітини:
$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

б) для шкіри:
$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2}},$$

в) для м'язів:
$$Z = \frac{R_2 \sqrt{R_1^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}},$$

де $X_c = \frac{1}{\omega C}$ – значення ємнісного опору.

7. Дисперсія імпедансу. Коефіцієнт поляризації. Реографія

Як видно з наведених вище формул, імпеданс залежить від частоти. Залежність імпедансу від частоти $Z = \varphi(\nu)$ змінного струму називається

дисперсією імпедансу. На рис. 8 наведено криві дисперсії імпедансу біологічної тканини в нормі і у разі її руйнування термічною обробкою.

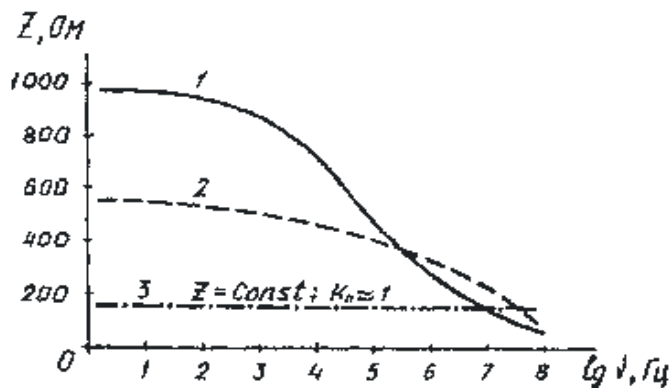


Рис. 8

- Крива 1 відображає стан живої біологічної тканини в нормі. Її імпеданс має виражену дисперсію в області частот 10^3 - 10^6 Гц, що наближено описується моделлю для м'язів (рис. 7в).
- Крива 2 дисперсії імпедансу відображає стан біотканини після дії на неї температурним фактором ($t = 50^\circ\text{C}$) протягом 2 хв.
- Крива 3 дисперсії імпедансу відповідає стану біотканини після її термічної обробки ($t = 100^\circ\text{C}$) протягом 20 хв.

Отже, частотна залежність імпедансу біотканини (крива 1) в основному забезпечується цілісністю її мембран. При руйнуванні їх нагріванням дисперсія імпедансу менш виражена або зовсім відсутня (крива 3). Це пояснюється зміною електроємнісних властивостей біотканини, які визначають значення її ємнісного опору $X_c = \frac{1}{\omega C}$.

Для використання дисперсії імпедансу в медичній практиці використовується діагностичний критерій, який запропонував Б.Н. Тарусов. Цей критерій оцінюється **коефіцієнтом поляризації** (K_p) і визначається співвідношенням імпедансів біооб'єкта за формулою:

$$K_p = \frac{Z_1}{Z_2},$$

де Z_1 – імпеданс біоб'єкта при $\nu_1 = 10^4$ Гц,

Z_2 – імпеданс біоб'єкта при $\nu_2 = 10^6$ - 10^7 Гц.

В залежності від стану живого біоб'єкта коефіцієнт поляризації може приймати числові значення в досить широких межах ($K_{\pi} \gg 1$). Значення $K_{\pi} \approx 1$ відповідає стану зруйнування біоб'єкта, для якого характерна крива 3 на рис. 8. Коефіцієнт поляризації, як діагностичний критерій, застосовують в трансплантаційній хірургії для визначення життєздатності консервантів (шкіри, кісток, крові тощо).

Фізичні основи реографії

Імпеданс тканин і органів залежить від їх функціонального стану. Так, при кровонаповненні судин їх імпеданс змінюється в залежності від стану серцево-судинної діяльності.

Діагностичний метод, за допомогою якого реєструються зміни імпедансу тканин в процесі серцево-судинної діяльності називають **реографією**. Електропровідність тканин в такому випадку зумовлена пульсуючою течією крові в артеріях і рівномірним рухом крові в артеріолах, капілярах, мілких венах.

Серед всіх структур нашого організму кров має найвищу електропровідність. Це означає, що під час систолічного скорочення серця, коли кров приливає в довколишні органи, електропровідність цих ділянок тіла буде високою, а в момент розслаблення серцевого м'яза (діастоли), навпаки - низькою. На підставі показань реографа виводиться крива пульсових коливань, так звана реограма. Між змінами імпедансу ділянки тіла, що досліджується і пульсовими коливаннями об'єму крові існує лінійна залежність. Вимірювання проводять на частоті 30 кГц.

Даний метод має високу чутливість. Реографія дозволяє оцінити загальний стан кровопостачання виявити порушення кровопостачання як окремого органу (наприклад, головний мозок, нирки або печінку), так і всього організму.

Реографія судин або реовазографія (РВГ) дозволяє: оцінити кровоток в судинах верхніх кінцівок (плеча, передпліччя, кисті) і нижніх кінцівок (стегна,

гомілки, стопи); виявити втрату тонусу, еластичності, звуження просвіту або навіть закупорку периферійних судин.

3.3. Перелік основних термінів, характеристик, законів, які повинен засвоїти студент при підготовці до заняття.

Електричний струм	Електричний струм – це впорядкований (напрямлений) рух електричних зарядів
Сила струму	Сила струму визначається відношенням кількості заряду dq , який переноситься через переріз провідника, до часу t , за який цей заряд переноситься: $I = \frac{dq}{dt}$.
Густина струму	Густина струму – величина, яка дорівнює відношенню сили струму до площі поперечного перерізу провідника dS , через яку цей струм проходить: $j = \frac{dI}{dS}$.
Постійний струм	Постійний струм – це струм, у якого сила струму і напрям з часом не змінюються
Змінний струм	Змінний струм – це струм, у якого сила струму і напрям з часом змінюються.
Імпеданс	Імпеданс - повний опір тканини при змінному струмі називається імпедансом .
Дисперсія імпедансу	Дисперсія імпедансу – це залежність імпедансу тканин від частоти змінного струму, тобто $Z=f(\nu)$.
Гальванізація	Гальванізація – лікувальна методика, за допомогою якої на біооб'єкт діють постійним струмом низької напруги (до 60 В) малої сили (до 50 mA).
Електрофорез	Електрофорез – локальне введення лікарських препаратів під дією постійного електричного струму.
Реографія	Реографія - діагностичний метод, за допомогою якого реєструють зміни імпедансу тканин в процесі серцево-судинної діяльності.

Коефіцієнт поляризації	Коефіцієнтом поляризації (K_p) і визначається співвідношенням імпедансів біооб'єкта за формулою: $K_p = \frac{Z_1}{Z_2}$, де Z_1 – імпеданс біооб'єкта при $\nu_1 = 10^4$ Гц, Z_2 – імпеданс біооб'єкта при $\nu_2 = 10^6$-10^7 Гц.
-------------------------------	--

3.4. Написати в зошиті протокол лабораторної роботи №14

Протокол повинен містити: назву роботи, мету, прилади і матеріали, стислу теоретичну частину, назву завдань, таблиці, формули для розрахунків.

3.6. Завдання для самоконтролю (тести):

- Як називається явище зменшення повного опору біооб'єкту при збільшенні частоти змінного струму?
 - реографія;
 - дисперсія імпедансу;
 - релаксація;
 - поляризація.
- Чому при дії ушкоджуючих чинників та відмирання тканин дисперсія імпедансу зменшується?
 - збільшується проникність мембран;
 - збільшуються іонні потоки;
 - послаблюються поляризаційні процеси;
 - всі відповіді правильні.
- В яких об'єктах спостерігається дисперсія імпедансу:
 - жива біотканина;
 - резистор;
 - мертва біотканина;
 - зварена тканина рослинного походження.
- Чому при дії ушкоджуючих чинників та відмирання тканин коефіцієнт поляризації зменшується?

- а) послаблюються поляризаційні процеси;
- б) збільшуються іонні потоки;
- в) збільшується проникність мембран;
- г) всі відповіді вірні.

5. Метод реєстрації зміни імпедансу органів під час їх кровонаповнення називають:

- а) кардіографією;
- б) реографією;
- в) енцефалографією.
- г) фонокардіографією

6. В результаті дослідження було з'ясовано, що опір тканини рослинного походження при змінному струмі менший, ніж при постійному. Чому?

- а) при змінному струмі в біооб'єкті зникають ті види поляризації, для яких їх час релаксації більший, ніж півперіод змінного струму;
- б) при змінному струмі послаблюються поляризаційні процеси внаслідок інерції іонів за високих частот;
- в) при змінному струмі ємнісний опір має обернено пропорційну залежність від частоти струму;
- г) всі відповіді вірні.

7. В результаті дослідження було з'ясовано, що опір тканини рослинного походження зменшується при збільшенні частоти змінного струму.

Чим зумовлене це явище?

- а) залежністю ємнісного опору від частоти
- б) зменшенням поляризаційних процесів внаслідок інерції іонів за високих частот;
- в) зникненням тих видів поляризації, для яких їх час релаксації більший, ніж півперіод змінного струму.
- г) всі відповіді вірні.

8. Як називається явище набуття діелектриком полярності?

- а) п'єзоефект
- б) іонізація;
- в) орієнтація
- г) поляризація.

9. Повертання полярних молекул речовини під дією зовнішнього електричного поля називається:
- а) дипольною поляризацією;
 - б) поляризацією;
 - в) іонною поляризацією;
 - г) електронною поляризацією.
10. Процес зміщення електронів на своїх орбітах відносно ядер під дією зовнішнього електричного поля називається:
- а) полярною поляризацією;
 - б) поляризацією;
 - в) іонною поляризацією;
 - г) електронною поляризацією.

Правильні відповіді: 1–б; 2–г; 3–а; 4–г; 5–б; 6–г; 7–г; 8–г; 9–а; 10–г.

4. ЛІТЕРАТУРА

1. Чалий О.В., Агапон Б.Т., Цехмістер Я.В. та ін. Медична і біологічна фізика: Підручник для студентів ВМЗО III-IV рівнів акредитації. - К.: Книга плюс, 2005.- с. 214 – 219, 228 -230.
2. Чалий О.В. Медична і біологічна фізика. - Вінниця: Нова книга, 2017, с. 166-174.

Тести для перевірки кінцевого рівня знань

1. Що є носіями струму в біологічних рідинах?
 - а) електрони;
 - б) іони;
 - в) електрони і іони;
 - г) диполі.
2. Які біологічні середовища добре проводять електричний струм?
 - а) жирова тканина;
 - б) кров, спинномозкова рідина, лімфа;
 - в) шкіра;
 - г) всі відповіді правильні.

3. Які опори властиві біологічним об'єктам при проходженні через них постійного струму?

- а) ємнісний;
- б) активний і ємнісний;
- в) активний;
- г) індуктивний.

4. Які опори, властиві біологічним об'єктам при проходженні через них змінного струму?

- а) ємнісний;
- б) активний і ємнісний;
- в) активний;
- г) індуктивний.

5. Електропровідність біотканин при постійному струмі визначається:

- а) активним опором;
- б) імпедансом;
- ; в) активним і ємнісним опорами;
- г) ємнісним.

6. Електропровідність біотканин при змінному струмі визначається:

- а) ємнісним опором;
- б) імпедансом;
- в) активним і індуктивним опорами;
- г) активним опором.

7. На рис.1 зображено еквівалентні електричні схеми різних біооб'єктів. Яка із цих схем є електричною моделлю шкіри?

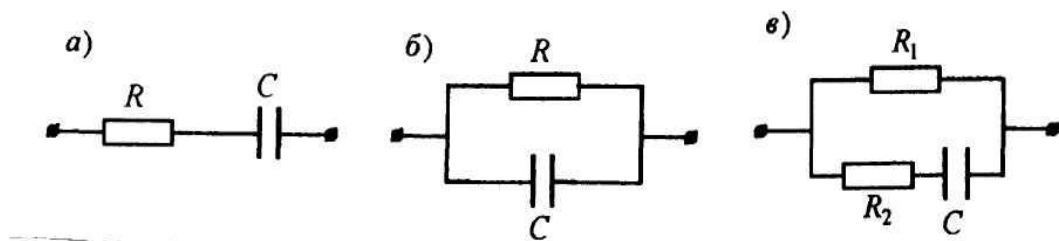


Рис. 1

а); б); в).

8. На рис. 1 зображено еквівалентні електричні схеми різних

біоб'єктів. Яка із цих схем є електричною моделлю клітини?

а); б); в) .

9. За якою формулою визначається повний опір біоб'єкта, еквівалентна електрична схема якого зображена на рис. 1б ?

а) $Z = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega \cdot c}\right)^2}$;

б) $\frac{1}{Z} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot c}\right)^2}$;

в) $\frac{1}{Z} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega \cdot c)^2}$

10. За якою формулою визначається повний опір біоб'єкта, еквівалентна електрична схема якого зображена на рис. 1а ?

а) $Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot c}\right)^2}$;

б) $Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot c)^2}$;

в) $Z = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega \cdot c}\right)^2}$.

11. Дисперсія імпедансу біотканини – це залежність повного опору біотканини від:

- а) ємнісного опору;
- б) активного опору;
- в) тривалості дії змінного струму;
- г) частоти змінного струму.

12. Як називається явище зменшення повного опору біоб'єкта при збільшенні частоти змінного струму?

- а) реографія;
- б) дисперсія імпедансу;
- в) релаксація;
- г) поляризація.

13. Метод реєстрації зміни імпедансу органів під час їх кровонаповнення називається:

- а) кардіографією;

- б) реографією;
- в) енцефалографією;
- г) біографією.

14. Коефіцієнт поляризації здорової біотканини:

- а) $k = 1$; б) $k > 0$; в) $k < 1$; г) $k > 1$.

15. Коефіцієнт поляризації мертвої біотканини:

- а) $k = 1$; б) $k > 0$; в) $k < 1$; г) $k > 1$.

16. Які тканини людського організму мають найбільшу електропровідність?

- а) кров, лімфа, ліквор;
- б) м'язова і легенева тканини;
- в) легеневі альвеоли;
- г) кістки.

17. Зміна опору тканин електричному струму пов'язана із змінним кровонаповненням, яке залежить:

- а) від фази серцевого циклу;
- б) від швидкості поширення пульсової хвилі;
- в) від фази серцевого циклу і швидкості поширення пульсової хвилі;
- г) від електропровідності тканин і органів.

18. Чому під час вдиху відзначається зростання опору тканин людського організму електричному струму, під час видиху – зменшення опору?

- а) під час вдиху наповнення вен кров'ю збільшується,
а при видиху – зменшується;
- б) під час вдиху наповнення вен кров'ю зменшується,
а при видиху – зростає;
- в) під час вдиху наповнення вен кров'ю не змінюється,
а при видиху – зростає;
- г) під час вдиху наповнення вен кров'ю зменшується,
а при видиху – не змінюється.

20. На частоті 10 кГц опір серцевого м'яза 600 Ом, а на частоті 1 МГц - 200 Ом.

Чому дорівнює коефіцієнт поляризації?

- а) $k = 3$; б) $k = 1/3$; в) $k = 1,5$; г) $k = 0,4$.

Лабораторна робота №14

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Мета роботи:

1. З'ясувати механізми електропровідності біоб'єктів при дії постійного чи змінного електричних полів.
2. Оволодіти методикою визначення активного опору і дослідження частотної залежності імпедансу живої і мертвої тканин рослинного походження.

Прилади і матеріали:

1. Електровимірювальні прилади: омметр, вольтметр, міліамперметр.
2. Звуковий генератор.
3. Електроди.
4. Зразки живої і мертвої тканини рослинного походження (картопля).

Опис установки і методу

Електрична схема установки для дослідження електропровідності і дисперсії імпедансу біотканин рослинного походження (картоплі) зображена на рис. 1. Вона складається з омметра Ω , міліамперметра mA , вольтметра V , звукового генератора Γ , перемикача $Кл$, електродів E_1 і E_2 , прокладок ГП та біоб'єкта.

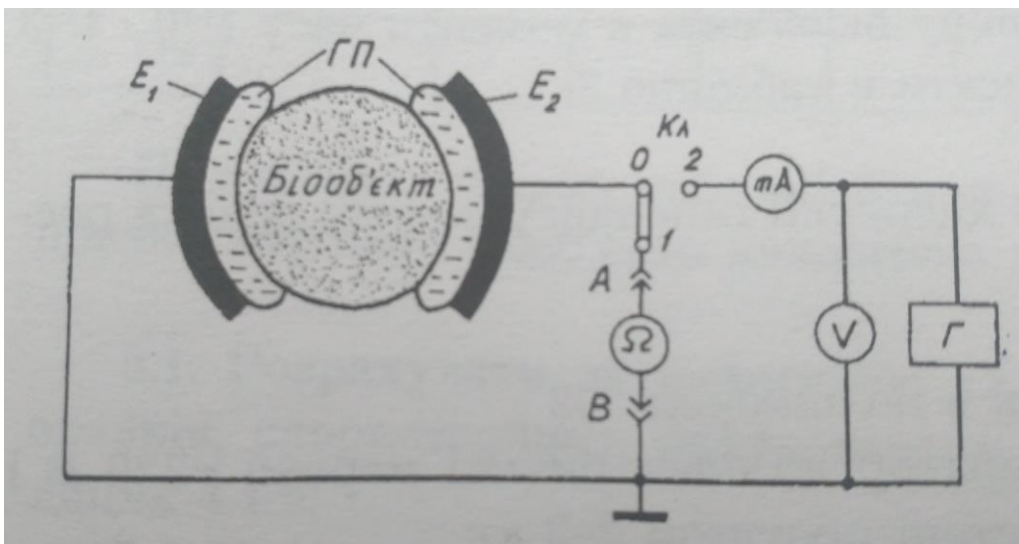


Рис. 1

Перемикач КЛ в положенні:

- «01» під'єднує електроди E_1 і E_2 з біооб'єктом до омметра Ω , який забезпечує прямі вимірювання електричного опору біооб'єкта постійному струму.
- «02» під'єднує електроди E_1 і E_2 з біооб'єктом до другої частини схеми, яка складається з генератора Γ змінного струму, міліамперметра mA та вольтметра V .

Імпеданс (повний опір) досліджуваного біооб'єкта змінному струму розраховується за формулою:

$$Z = \frac{U_{ef}}{I_{ef}}, \quad (1)$$

де U_{ef} і I_{ef} – відповідно, ефективні значення напруги і сили змінного струму в електричному колі.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Завдання 1. Вимірювання опору живого біооб'єкта рослинного походження постійному струму.

- 1.1. Під'єднати електроди E_1 і E_2 до живого біооб'єкта (сирої картоплі).
- 1.2. Перемикач КЛ встановити в положення «01».
- 1.3. Під'єднати омметр до ділянки АВ електричного кола і виміряти опір досліджуваного живого біооб'єкта в моменти часу $t=0$ і $t=3\text{хв}$. Результати вимірювань записати в таблицю 1.

Таблиця 1

Електричний опір	R, Ом ($t = 0$)	R, Ом ($t = 3 \text{ хв}$)
Для живого біооб'єкта		
Для мертвого біооб'єкта		

Завдання 2. Дослідження дисперсії імпедансу живого біооб'єкта рослинного походження.

- 2.1. Перемикач КЛ встановити в положення «02».
- 2.2. Увімкнути звуковий генератор в електричну мережу ~ 220 В.
- 2.3. Встановити значення частоти $\nu = 20000$ Гц і вихідної напруги $U = 0,8$ В.
- 2.4. Виміряти міліамперметром значення сили змінного електричного струму.
- 2.5. Виконати аналогічні вимірювання сили струму при $U = 0,8$ В для частот, значення яких вказані в таблиці 2.
- 2.6. Результати вимірювань записати в таблицю 2.
- 2.7. Вимкнути генератор.

Таблиця 2

Для <u>живого</u> біооб'єкта рослинного походження.											
ν , Гц	50	100	150	200	500	1000	2000	5000	10000	15000	20000
I_{gv}	1,7	2	2,18	2,3	2,7	3	3,3	3,7	4	4,18	4,3
U, В											
I, мА											
Z, Ом											

Завдання 3. Вимірювання опору мертвого біооб'єкта рослинного походження постійному струму.

- 3.1. Під'єднати електроди E_1 і E_2 до мертвого біооб'єкта (вареної картоплі).
- 3.2. Перемикач КЛ встановити в положення «01».
- 3.3. Під'єднати омметр до ділянки АВ електричного кола і виміряти опір досліджуваного мертвого біооб'єкта в моменти часу $t=0$ і $t=3x_{\text{в}}$. Результати вимірювань записати в таблицю 1.

Завдання 4. Дослідження дисперсії імпедансу мертвого біооб'єкта рослинного походження.

- 4.1. Перемикач КЛ встановити в положення «02».
- 4.2. Увімкнути звуковий генератор в електричну мережу ~ 220 В.
- 4.3. Встановити значення частоти $\nu = 20000$ Гц і вихідної напруги $U = 0,4$ В.
- 4.4. Виміряти міліамперметром значення сили змінного електричного струму.
- 4.5. Виконати аналогічні вимірювання сили струму при $U = 0,4$ В для частот, значення яких вказані в таблиці 3.
- 4.6. Результати вимірювань записати в таблицю 3.
- 4.7. Вимкнути генератор.

Таблиця 3

Для <u>мертвого</u> біооб'єкта рослинного походження.											
ν , Гц	50	100	150	200	500	1000	2000	5000	10000	15000	20000
$\lg \nu$	1,7	2	2,18	2,3	2,7	3	3,3	3,7	4	4,18	4,3
U, В											
I, мА											
Z, Ом											

Обробка результатів досліджень

1. Розрахувати імпеданси Z живого і мертвого біооб'єктів рослинного походження (скориставшись результатами досліджень, що записані в таблицях 2 і 3) за формулою:

$$Z = \frac{U}{I}$$

2. Побудувати графіки дисперсії імпедансів $Z = f(\lg \nu)$ для живого і мертвого біооб'єктів рослинного походження в одній системі координат.
3. Проаналізувати результати досліджень і зробити відповідні висновки про цінність одержаної інформації для медичної практики.

Перелік використаної літератури:

1. Чалий О.В., Агапон Б.Т., Цехмістер Я.В. та ін. Медична і біологічна фізика: Підручник для студентів ВМЗО III-IV рівнів акредитації. - К.: Книга плюс, 2005.
2. Чалий О.В. Медична і біологічна фізика. - Вінниця: Нова книга, 2017.
2. Дяков В.А. і співавтори. Лабораторний практикум з медичної і біологічної фізики. –В.: ВДМУ, 2010.