

Міністерство освіти і науки України
Рівненський державний гуманітарний університет
Кафедра інформатики та прикладної математики

ДИПЛОМНА РОБОТА

за освітнім рівнем бакалавр

на тему

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗІОЛОГІЧНИХ ЯВИЩ І
ПРОЦЕСІВ ЗАСОБАМИ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

Виконав:

студент IV курсу групи КН-41

спеціальності 112 Комп'ютерні науки

Мазепа А.О.

Науковий керівник:

Сяський В.А., к.т.н., доцент

м. Рівне, 2020 рік

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ ПО МОДЕЛЮВАННЮ РОБОТИ НИРКИ	7
РОЗДІЛ 2. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В СИСТЕМІ КЛАСИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ СИСТЕМ	9
РОЗДІЛ 3. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ З АНАТОМІЇ ТА ФІЗІОЛОГІЇ НИРКИ	14
3.1. Основні функції нирки як органу виділення	14
3.2. Будова нирки	15
3.3. Процес сечоутворення	17
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЬ НИРКИ	21
4.1. Структурно-функціональна модель нирки	21
4.2. Імітаційна модель нирки на основі штучних нейронних мереж	22
РОЗДІЛ 5. ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ НИРКИ	26
5.1. Опис програмної системи	26
5.2. Задання параметрів симуляції	27
5.3. Симуляція роботи нирки	30
5.4. Конструктор нефронів	32
5.5. Особливості роботи програми на різних ЕОМ	36
ВИСНОВКИ	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	39

ВСТУП

Актуальність роботи. Дослідження фізіології органів і систем людини, виникнення і розвитку їх патологій потребує складного медичного та лабораторного обладнання і часто неможливе без хірургічного втручання на живому організмі. Одним із шляхів вирішення проблеми безкровного дослідження людського організму є моделювання фізіологічних процесів за допомогою різноманітних штучних систем. Такий підхід також є зручним для прогнозування перебігу тих чи інших захворювань.

Організм людини є складною багатокомпонентною неперервною системою. Кожен орган у свою чергу теж є складною системою. Очевидно, що моделювання процесу функціонування усього організму є практично невіршуваною задачею в силу саме її складності. Сучасні математичні методи та можливості комп'ютерних систем дозволяють моделювати фізіологічні процеси в окремих органах із задовільною точністю. Застосування різних підходів та методів моделювання складних систем доцільно апробувати на випадках окремих підсистем, структура і поведінка яких в тій чи іншій мірі відтворює функціонування цілої системи.

Функціональний стан організму людини напряду залежить від перебігу метаболічних процесів, серед яких важливе місце посідає процес виділення. В останні роки почастишали випадки функціональних захворювань сечовидільної систем і нирок у людей різного віку. Як наслідок – суттєво погіршується якість життя, адже людина змушена постійно перебувати на гемодіалізі.

Математичне моделювання широко використовується для вирішення багатьох прикладних задач дослідження фізіологічного стану людини при екстремальних факторах впливу (М. Амосов, Р. Григорян, І. Єрмакова, В. Ліщук, К. Лябах, М. Антомонов, А. Котова, Ю. Онопчук, О. Мінцер, В. Новосельцев та ін.). Не є виключенням і дослідження процесів очищення крові та сечоутворення в нирках. Існуючі на сьогоднішній день класичні математичні моделі функціонування нирок, що базуються на описі процесів

фільтрації диференціальними рівняннями, оперують усередненими значеннями концентрацій компонентів крові та продуктів метаболізму в ній. Більшість таких моделей з різних позицій і по своєму трактують складні внутрішньоорганні механізми, а тому мають свої переваги і недоліки. Однак повноцінної, простої і загальноприйнятої в медичній науці і практиці математичної моделі нирки поки що не створено [5].

Більш перспективним підходом в дослідженнях механізмів виникнення, розвитку та лікування патологій різних органів і систем є використання динамічних моделей, що базуються на відтворенні реальних біологічних процесів – функціональних динамічних моделей. В їх основі часто використовується особлива абстракція – «чорний ящик» – деяка функція, що реалізує відображення у багатовимірних просторах. Розробка таких моделей є актуальною та важливою для дослідження динамічного зв'язку між окремими структурними елементами складних живих систем та елементарними процесами в них.

Імітаційне (програмне) моделювання передбачає побудову структурно-функціональної моделі об'єкта дослідження у вигляді певної послідовності дій (алгоритму), що реалізована як комп'ютерна програма та відтворює функціонування досліджуваної системи шляхом послідовного виконання великої кількості елементарних операцій [14]. Зазвичай такий вид моделювання використовують, якщо певні дії відбуваються багаторазово і мають відомі статистичні характеристики. У таких випадках встановити зв'язок між входами й виходами досліджуваної системи у вигляді певної математичної моделі зазвичай буває доволі складно. Навпаки, відтворити за допомогою комп'ютерної імітації послідовність подій, що відбуваються в системі, і отримати у числовому вигляді значення її вихідних параметрів, буває набагато легше. Імітаційний підхід в моделюванні поведінки складних систем дозволяє з достатньо високим ступенем вірогідності прогнозувати динаміку розвитку захворювання органу та процесу його лікування. Тому розробка ефективної

моделі, яка б дозволила досліджувати складні динамічні внутрішні процеси в нирці, є безсумнівно **актуальною** задачею.

Метою роботи є: побудова і програмна реалізація імітаційної моделі нирки на основі багатопрошаркових штучних нейронних мереж.

Для досягнення сформульованої мети були поставлені та вирішені наступні **завдання**:

- аналіз джерельної бази з анатомії та фізіології сечовидільної системи людини;
- на основі визначальних принципів імітаційного моделювання поведінки складних систем побудувати базову модель нефрона як основного складового компонента нирки та розширену структурно-функціональну модель нирки;
- засобами штучних нейронних мереж реалізувати імітаційну модель процесів очищення крові та сечоутворення в нирці.

Об'єкт дослідження: імітаційне моделювання динамічних процесів у складних фізіологічних системах людського організму.

Предмет дослідження: штучні нейронні мережі як інструмент імітаційного моделювання процесів нефросепарації – очищення крові та сечоутворення в нирці людини.

Для реалізації поставлених завдань було проведено аналіз можливостей, ефективності та областей застосування об'єктно-орієнтованих мов програмування та технологій, що на них базуються [3, 4]. Це дозволило задіяти потужний апарат наслідування, віртуальність методів та поліморфізм при побудові ієрархій класів. Останнє забезпечило належний рівень абстрагування, а отже – максимальну гнучкість системи. Для цього використані наступні мови та засоби програмування: C#, WPF, XAML, JSON [1, 17].

Структура роботи. Дипломна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та переліку використаних джерел. У першому розділі проведено аналіз останніх досліджень та публікацій з проблеми моделювання нирки. Сучасна класифікація видів та методів моделювання складних систем, а

також особливості імітаційного моделювання викладені в другому розділі роботи. Третій розділ містить стислий виклад відомостей з анатомії та фізіології людини про будову та функціонування нирки. Четвертий розділ висвітлює особливості структурно-функціональної та імітаційної моделі нирки, процесів очищення крові і сечоутворення. Особливості програмної реалізації побудованої моделі нирки відображені у п'ятому розділі дослідження. Загальний обсяг роботи становить 40 сторінок. Вона містить 14 рисунків та 1 таблицю. Список використаних джерел включає 17 найменувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ ПО МОДЕЛЮВАННЮ РОБОТИ НИРКИ

Методи математичного моделювання широко використовується при дослідженнях фізіологічного стану організму людини в цілому та окремих його органів і систем. У випадку моделювання роботи нирки можливе застосування різних підходів та методів. Ряд досліджень базується на описі процесів фільтрації диференціальними рівняннями, що оперують усередненими значеннями концентрацій компонентів крові та продуктів метаболізму у ній.

У роботах С.С. Gyenge, В.Д. Bowen та ін. [15] досліджено нирковий модуль, що входить в більшу математичну модель транспорту рідин і розчинів в тілі людини. Модель транспортування рідин і розчинів складається з чотирьох компартментів: плазми, міжклітинної рідини, червоних кров'яних клітин і оточуючої тканини. Всі компартменти вважаються однорідними, з хорошим перемішуванням. Рідина і речовини, які потрапляють, миттєво розподіляються по всьому об'єму. Модель базується на рівняннях масового балансу для рідини і кожного з розчинів (білки та іони), об'єднаних з допоміжними рівняннями транспорту, що описують масообмін або властивості кожного компартмента людини. Параметри, що описують поведінку кожного окремого компартмента, отримані як середнє від складових. Припущення про перемішування та однорідність дозволяє уявити транспорт рідини у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь. Якщо всі транспортні та компартментні властивості відомі, модель може передбачати динамічні зміни вмісту рідини, іонів, білка в плазмі, міжклітинної рідини і клітинах після збурення в системі. У зв'язку зі складністю транспортних процесів такі моделі можуть застосовуватися тільки в тому діапазоні завдань, для якого були побудовані.

Існують моделі, які розглядають транспортування всередині нирки [6, 8]. Рівняння базуються на фізико-хімічних законах і можуть описувати роботу одного нефрона, процеси в окремих його частинах, а також комплекс міжнефронних взаємодій. Такі моделі більш точні, але при цьому є досить

складними. Зазвичай вони описують окрему частину загальнониркових процесів. Часто такі моделі можуть бути складовими частинами більш загальних моделей. Математична модель діяльності нефрона, що є складовою частиною моделі взаємодії серцево-судинної системи і нирок та входить в програмний комплекс віртуальної фізіології Р.Д. Григоряна, К.Л. Атоєва та ін. [6], дозволяє регулювати швидкість клубочкової фільтрації при зміні рівня солей в дистальних каналцях.

У моделі процесу концентрування розчину в петлі Генле (К. Богданов) [2] коліно петлі розбивається на сегменти. При цьому вважається, що всі сегменти петлі мають форму паралелепіпеда, і рух розчину має переривчастий характер. Модель ілюструє процес множення в петлі Генле, приблизно визначаючи концентрацію розчину, і дає можливість оцінити концентруючу здатність в залежності від довжини петлі.

В моделях міжнефронних взаємодій в більшості випадків розглядають і описують тільки процес реабсорбції, без секреції в каналцях. При цьому детально моделюється взаємодія потоків в різних трубках: каналцях і збірних трубках нефронів, кровоносних судинах. Для обліку взаємодії між трубками вводяться вагові коефіцієнти, які визначають розподіл речовин і рідини, що вийшли з трубки, між іншими трубками [16]. Транспортні рівняння зводяться до формалізації потоків рідини і речовин через стінки трубок. Речовини переносяться за допомогою дифузії і спільно з рідиною (за законами осмосу). Така модель фізіологічно досить точно описує структуру та процеси в нирці, однак, як і попередні, не враховує механізм зворотного регулювання.

РОЗДІЛ 2. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В СИСТЕМІ КЛАСИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Моделювання є одним з основних сучасних методів дослідження складних систем. Зазвичай воно передбачає створення концептуальної моделі об'єкта дослідження, її формалізацію та перетворення у математичну або комп'ютерну модель, перевірку адекватності й подальше дослідження отриманої моделі за допомогою аналітичних або чисельних методів і сучасних комп'ютерних технологій. Застосування методів моделювання часто дає змогу отримати більш точні відомості про поведінку й характеристики досліджуваних систем і процесів, ніж при їх безпосередньому вивченні, витрачаючи при цьому менше часу та коштів. Крім того у багатьох випадках використання інших методів дослідження взагалі виявляється неможливим через їх небезпеку, коштовність, тривалість або через відсутність відповідного обладнання і методик.

Сьогодні моделювання складних систем найчастіше реалізують за допомогою сучасних комп'ютерних технологій. Такий підхід передбачає необхідність попередньої формалізації концептуальної моделі об'єкта дослідження та її подання у вигляді, придатному для реалізації тих чи інших алгоритмів чисельного аналізу або комп'ютерної імітації. Обидва підходи передбачають необхідність застосування сучасних методів, що використовуються при конструюванні алгоритмів моделювання. Навіть при застосуванні спеціалізованих пакетів програмного забезпечення досліднику необхідно володіти базовими принципами відповідних методів, оскільки користування такими пакетами зазвичай передбачає необхідність вибору оптимального алгоритму й певних параметрів його реалізації, іноді з декількох десятків можливих варіантів.

Відповідно до класифікації моделей виділяють такі основні різновиди моделювання складних систем [13]:

- *Концептуальне моделювання* за допомогою природних або штучних умов визначає принципові аспекти побудови або функціонування об'єкта дослідження. Прикладами завдань концептуального моделювання є: побудова сценаріїв розвитку організації з метою прийняття стратегічних рішень; вибір інерціальної або неінерціальної системи відліку при записі рівнянь руху у механіці; врахування або неврахування динаміки системи при її вивченні тощо. Відомим з курсу фізики прикладом концептуальної моделі є модель ідеального газу. Згідно з нею ідеальним газом є сукупність молекул, що є матеріальними точками, які не взаємодіють одна з одною інакше, ніж через пружні зіткнення. Як бачимо, ця модель не містить жодних математичних елементів, але, враховуючі відомі поняття й закони фізики, її можна достатньо легко перетворити в математичну модель. Зазвичай, якщо це можливо, слід будувати концептуальну модель так, щоб її можна було формалізувати за допомогою тих чи інших математичних методів. Це дає змогу у подальшому використовувати комп'ютерні технології її дослідження.

- *Інтуїтивне моделювання* передбачає прогнозування поведінки досліджуваної системи на основі уявних експериментів і врахування практичного досвіду дослідника. Класичним прикладом інтуїтивного моделювання через здійснення уявних експериментів є дискусія А. Ейнштейна і Н. Бора стосовно філософських засад квантової механіки. Завдання моделювання на основі практичного досвіду зазвичай вирішують фахівці-практики: інженери, лікарі, агрономи, кваліфіковані робітники тощо. Наприклад, досвідчений сталевар часто може точніше спрогнозувати хід плавки та її результати, ніж це можна зробити на основі певних фізико-хімічних або математичних моделей. Але це стосується лише плавок добре відомих йому марок сталі у стандартних печах.

- *Фізичне (натурне) моделювання* здійснюють шляхом дослідження в якості моделі реального фізичного об'єкта, між яким і об'єктом-оригіналом

встановлені відношення подібності, що ґрунтуються на подібності фізичних процесів, що відбуваються в них. Зокрема при проектуванні гідротехнічних споруд здійснюють попереднє дослідження моделей, що є їх зменшеними аналогами. Іншим прикладом фізичного моделювання є апробація нових лікарських засобів на піддослідних тваринах.

- *Структурно-функціональне моделювання* передбачає побудову і використання як моделей графіків, таблиць, блок-схем тощо, для яких встановлено певні правила їх об'єднання й перетворення. Прикладами структурно-функціонального моделювання є: розробка блок-схем алгоритмів роботи комп'ютерних програм; побудова й перетворення електричних схем; створення класифікаційних схем; розробка розкладів занять у навчальних закладах і т. ін.

- *Математичне (логіко-математичне) моделювання* передбачає побудову й дослідження моделей математичними та логічними засобами. Прикладами математичних моделей є: рівняння коливань як модель циклічного процесу; логістична крива як модель кривої зростання; рівняння рівномірного та рівноприскореного руху тощо.

- *Імітаційне (програмне) моделювання* передбачає побудову моделі об'єкта дослідження у вигляді певної послідовності дій (алгоритму), що реалізована як комп'ютерна програма. Зазвичай такий вид моделювання використовують, якщо певні дії відбуваються багаторазово і мають певні відомі статистичні характеристики. У таких випадках встановити зв'язок між входами й виходами досліджуваної системи у вигляді певної математичної моделі зазвичай буває доволі складно. Навпаки, відтворити за допомогою комп'ютерної імітації послідовність подій, що відбуваються в системі, і отримати у числовому вигляді значення її вихідних параметрів, буває набагато легше. Початковим етапом дослідження складної системи є побудова моделі «чорного ящика». При формальному описі вона задає множини вхідних та вихідних змінних системи, але не містить ніякої інформації про відношення між цими двома множинами. Під вхідними змінними (входами) розуміють впливи навколишнього

середовища на досліджувану систему, а під вихідними змінними (виходами) – її впливи на навколишнє середовище. До вихідних змінних зокрема належать ті, що відображають контрольовані за допомогою вимірювальних приладів характеристики реальної системи, а до вхідних – контрольовані управляючі впливи на неї та неконтрольовані впливи зовнішнього середовища. Побудова моделі «чорного ящика» є нетривіальним завданням, оскільки в реальних системах існує велика кількість входів та виходів, і, залежно від мети моделювання, деякі з них можуть виявитися суттєвими, а інші – несуттєвими. Завданням дослідника при побудові моделі «чорного ящика» є визначення обмеженої кількості тих входів і виходів, суттєвих з погляду реалізації цілей моделювання. Окрім того, завжди є невідомі дослідникові, а тому невраховані ним впливи навколишнього середовища на досліджувану систему і навпаки – системи на навколишнє середовище. У багатьох випадках модель «чорного ящика» є єдиною можливою моделлю системи. Зокрема, така ситуація виникає у випадках, коли внутрішня будова системи є невідомою (наприклад, при дослідженні елементарних частинок), а також якщо необхідно мінімізувати вплив дослідження на систему (наприклад, коли вивчається психіка людини).

Для вивчення динаміки систем, моделлю яких є «чорний ящик», часто застосовують методи аналізу часових рядів, рівні яких формують показники системи, що цікавлять дослідника. Наступним етапом є побудова моделей складу та структури системи, а також її структурної схеми. При цьому необхідно мати на увазі, що для кожної системи можна побудувати багато таких моделей. Проте існує певна оптимальна модель, яка залежить від мети дослідження і дає змогу досягти цієї мети з найменшими витратами ресурсів дослідника. Моделлю складу є перелік основних компонентів (складових частин) досліджуваної системи. При цьому вирізняють два типи компонентів – елементи, які розглядають як неподільні складові, та підсистеми – складові, що з погляду досягнення цілей моделювання мають розглядатися як утворення, що складаються з інших компонентів. При побудові моделі складу необхідно виявити всі підсистеми та елементи, які суттєво впливають на досліджувані

характеристики і параметри системи. Модель складу відображає неоднорідність досліджуваної системи. У моделі структури треба описати всі зв'язки між підсистемами та окремими елементами, та зв'язки всередині підсистем, що є важливими для досягнення мети аналізу. Якщо це можливо, зв'язки необхідно подати у математичному вигляді. Після цього будують структурну схему досліджуваної системи, яка є сукупністю моделей «чорного ящика», складу та структури. В ній вказують всі важливі компоненти системи, зв'язки між ними, зв'язки компонентів системи із зовнішнім середовищем (входи та виходи системи). Побудова структурної схеми дає можливість виявити тип структури (лінійна, деревоподібна, матрична, сітьова тощо) і наявність зворотних зв'язків, що має суттєве значення для обрання методу подальшого аналізу системи.

РОЗДІЛ 3. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ З АНАТОМІЇ ТА ФІЗІОЛОГІЇ НИРКИ

У процесі життєдіяльності в організмі людини утворюються значні кількості продуктів обміну, що вже не використовуються клітинами і повинні бути видалені з організму. Крім того, організм повинен бути звільнений від токсичних і чужорідних речовин, від надлишку води, солей, лікарських препаратів. Органи, що здійснюють видільні функції, називаються видільними, або екскреторними. Головне призначення органів виділення – це підтримання сталості внутрішнього середовища організму. Екскреторні органи функціонально взаємопов'язані між собою. Зрушення функціонального стану одного з цих органів змінює активність іншого. Порушення процесів виділення неминує веде до появи патологічних зрушень гомеостазу аж до загибелі організму.

3.1. Основні функції нирки як органу виділення

Як відомо нирки є основним органом виділення [7]. Вони виконують в організмі багато функцій. Одні з них прямо або опосередковано пов'язані з процесами виділення, інші – не мають такого зв'язку. Серед основних функцій варто виділити ті, що є суттєвими на обраному рівні абстрагування при побудові моделі нирки:

- видільна, чи екскреторна, функція: нирки виводять з організму надлишок води, неорганічних і органічних речовин, продукти азотистого обміну і чужорідні речовини: сечовину, сечову кислоту, креатинін, лікарські препарати;
- регулювання водного балансу і відповідно обсягу крові, поза- і внутрішньоклітинної рідини за рахунок зміни обсягу води, що виводиться з сечею;
- регулювання іонного складу рідин внутрішнього середовища та іонного балансу організму шляхом вибіркової зміни екскреції іонів з сечею (іонна регулювання);

- регуляція кислотно-лужного балансу шляхом екскреції водневих іонів, нелетких кислот і основ;
- захисна функція: видалення з внутрішнього середовища організму чужорідних, часто токсичних речовин.

3.2. Будова нирки

Основною структурно-функціональною одиницею нирки є *нефрон*, в якому відбувається очищення крові та утворення сечі [7]. У зрілій нирці дорослої людини міститься близько 1-1,3 млн. нефронів (Рис. 3.1).

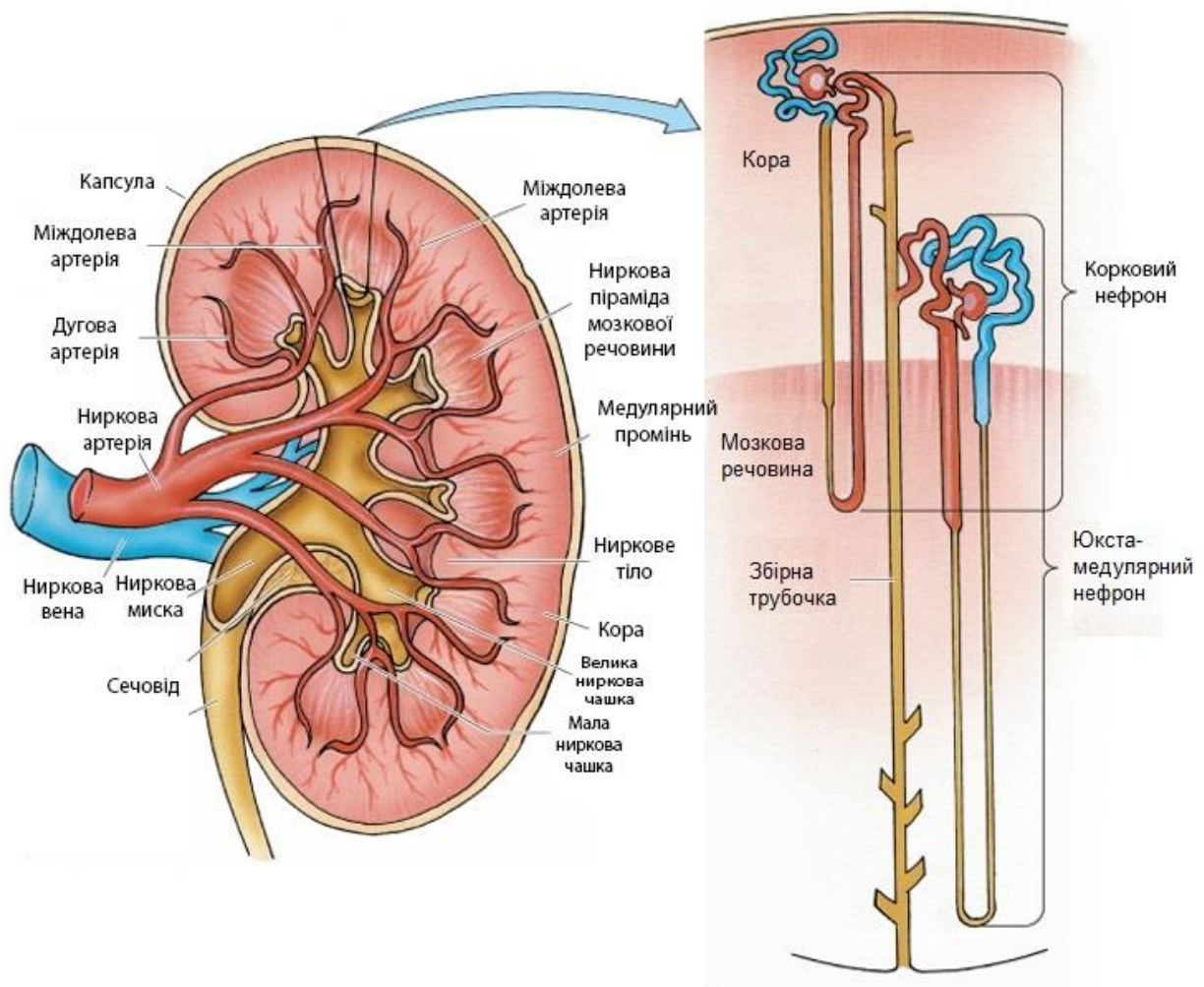


Рис. 3.1. Нирка і окремі нефрони

Нефрон складається з декількох послідовно з'єднаних відділів (Рис. 3.2).

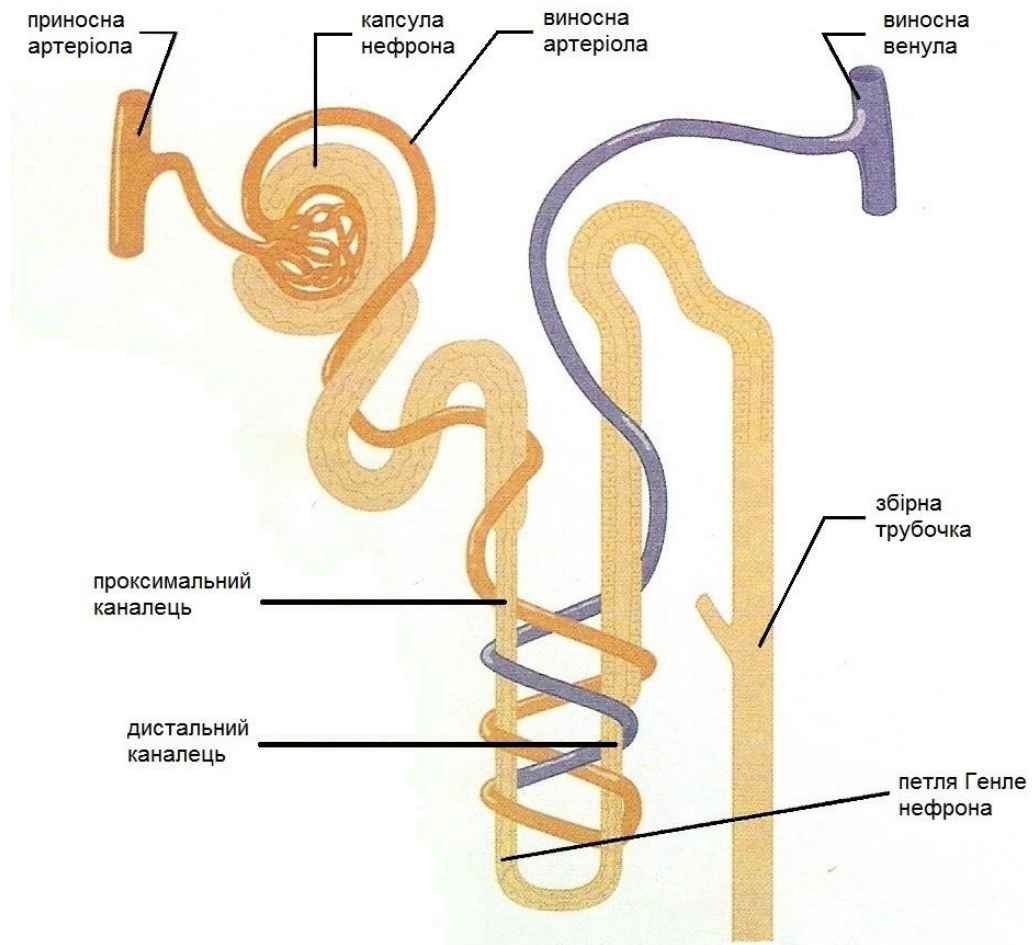


Рис. 3.2. Будова нефрона

Починається нефрон з *ниркового (мальпігієвого) тільця*, яке містить *клубочок кровоносних капілярів*. Зовні клубочки вкриті *капсулою нефрона (капсула Шумлянського-Боумена)*. Від капсули відходить довга звивиста трубочка, яка складається із послідовності відділів: *проксимальний звивистий каналець, проксимальний прямий каналець, петля Генле, дистальтний прямий каналець, дистальний звивистий каналець*. Дистальні звивисті каналці через короткий *сполучний відділ* в корі нирок впадають у *збірні трубочки*. Збірні трубочки опускаються з коркової речовини нирки в глиб мозкової речовини, зливаються у *вивідні протоки* і відкриваються в порожнині *ниркової миски*. Ниркові миски відкриваються в *сечоводи*, що впадають в *сечовий міхур*.

За особливостями локалізації капсул з клубочком капілярів у нирковому тілі, будови каналців і особливостям кровопостачання розрізняють три основних типи нефронів: *коркові, мозкові та юкстамедулярні*.

Відмінною особливістю кровопостачання нирок є те, що кров використовується не тільки для живлення органа, але й для утворення сечі. Нирки одержують кров з коротких *ниркових артерій*, які відходять від *черевного відділу аорти*. У нирці артерія ділиться на велику кількість дрібних *судин-артеріол*, що приносять кров до клубочків. *Приносна (аферентна) артеріола* входить в клубочок і розпадається на *капіляри*, які, потім зливаючись, утворюють *виносну (еферентну) артеріолу*. Виносна артеріола знову розпадається на мережу капілярів навколо проксимальних і дистальних каналців. Артеріальні капіляри переходять у венозні, які, зливаючись у вени, віддають кров у *нижню порожнисту вену*. Отже, кров у нирках послідовно долає дві капілярні сітки: капілярних клубочків і капілярів, які обплітають каналці. Капіляри клубочків виконують лише функцію *сечоутворення*.

3.3. Процес сечоутворення

Сечоутворення в нирці здійснюється за рахунок трьох основних процесів [7] (Рис. 3.3):

- *Клубочкова фільтрація* відбувається в ниркових тільцях нефрону, які виконують функцію фільтра. Приносна артеріола заходить у капсулу нефрона й утворює там клубочок капілярів. Діаметр приносячої артеріоли майже в 2 рази більший, ніж виносної, що створює умови для підтримання досить високого тиску крові в капілярах клубочка. Завдяки цьому плазма крові разом із розчиненими в ній речовинами витискається крізь тонкі стінки капілярів в порожнину капсули. При цьому відфільтровуються всі компоненти плазми крові, за винятком білків. Також не проходять через фільтр форменні елементи крові (еритроцити, лейкоцити, тромбоцити тощо). У результаті фільтрації в порожнині капсули нефрону утворюється рідина, яку називають

ультрафільтратом або *первинною сечею*. За добу в людини через нирки проходить близько 1600 л крові, що призводить до утворення 160-180 л первинної сечі. Основним чинником, що сприяє процесу фільтрації, є гідростатичний тиск крові в капілярах клубочків. Протидіють фільтрації онкотичний тиск білків плазми крові та тиск рідини в порожнині капсули клубочка, тобто первинної сечі. В нормі фільтраційний тиск становить приблизно 20 мм рт.ст. Кількісною характеристикою процесу фільтрації є *швидкість клубочкової фільтрації (ШКФ)*. У нормі в чоловіків ШКФ становить 125 мл/хв., а в жінок – 110 мл/хв.

- *Канальцева реабсорбція*. Первинна сеча перетворюється у кінцеву завдяки процесам, які відбуваються в ниркових канальцях і збірних трубочках. У нирці людини за добу утворюється близько 180 л ультрафільтрату, а виділяється лише 1,0-1,8 л сечі, тобто не більше 1% від загальної кількості первинної сечі. Канальцева реабсорбція – це процес зворотного всмоктування води і речовин з вмісту ультрафільтрату через капілярну сітку, що обплітає канальці, назад у лімфу і кров. Основний сенс реабсорбції полягає в тому, щоб зберегти організму всі життєво важливі речовини у необхідних кількостях. З первинної сечі назад у кров всмоктуються всі потрібні організму речовини: глюкоза, амінокислоти, вітаміни, мінеральні солі, значна кількість води (99%). При цьому в різних відділах канальців одні речовини (глюкоза, амінокислоти) всмоктуються повністю, інші (мінеральні солі, вода) – у потрібних організмові кількостях, а решта виводиться назовні. За нормальної роботи нирок у сечі відсутні білок і глюкоза. Якщо вони з'являються, це свідчить про порушення роботи нирок та обміну речовин в організмі.

- *Канальцева секреція* – це транспорт речовин з крові в просвіт канальців, тобто в сечу. Канальцева секреція дозволяє швидко екскретувати деякі іони, наприклад калію, органічні кислоти (сечова кислота) та основи (холін, гуанідин), включаючи ряд чужорідних організму речовин, таких як антибіотики, рентгеноконтрастні речовини, барвники тощо. Фаза секреції фактично відбувається одночасно із реабсорбцією практично у всіх відділах

каналців нефрона. Принципова відмінність між цими процесами полягає у протилежності напрямів переносу речовин.

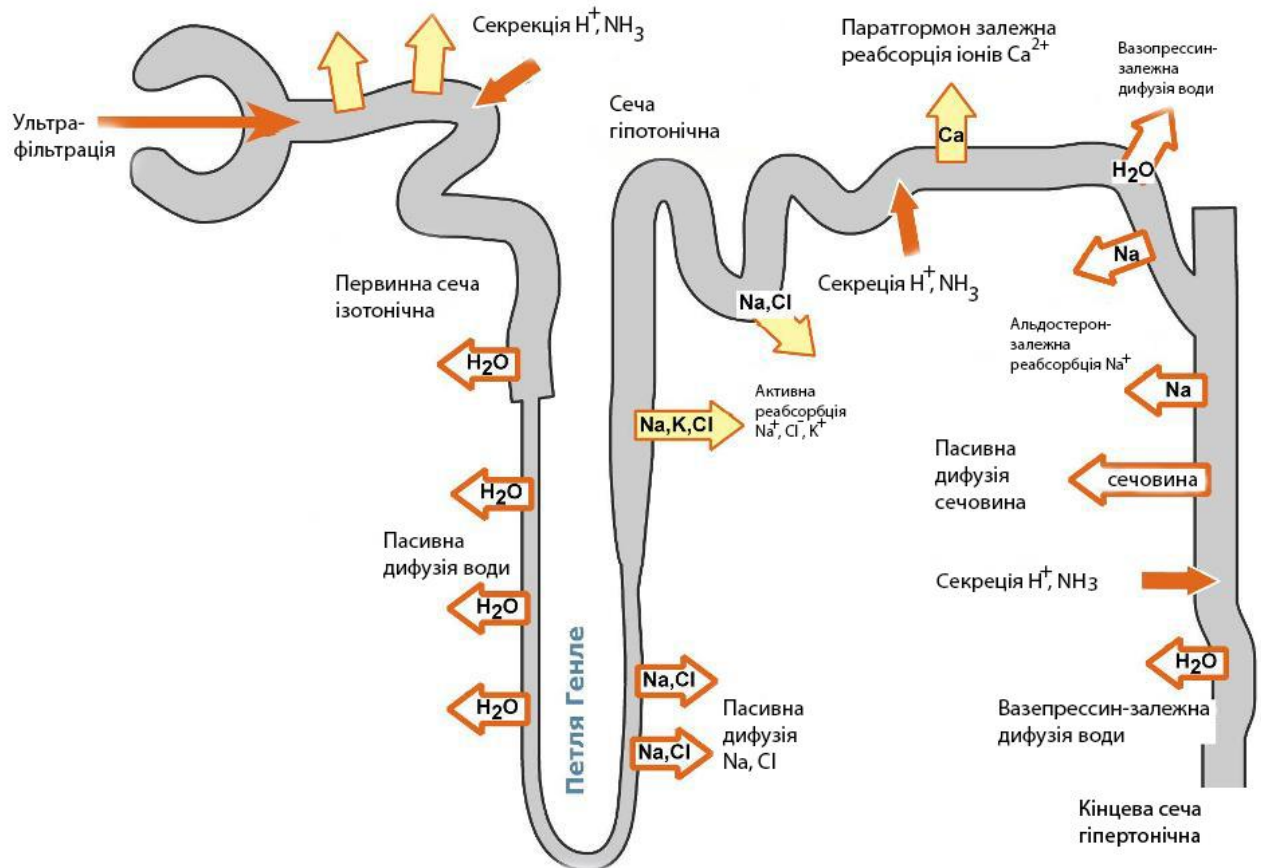


Рис. 3.3. Механізм сечоутворення в нирці

За добу людина виділяє в середньому близько 1,5 л сечі. Після рясного пиття, споживання білкової їжі діурез зростає. При споживанні невеликої кількості води, при посиленому потовиділенні діурез знижується. Інтенсивність сечоутворення коливається протягом доби. Вночі сечоутворення менше, ніж вдень.

Сеча окрім води містить сечовину, сечову кислоту, солі амонію, пуринові основи, креатинін; в невеликій кількості – похідні продуктів гниття білків у кишківнику. У сечі здорової людини білки відсутні, або визначаються їх сліди. Серед органічних сполук небілкового походження в сечі зустрічаються солі щавлевої кислоти, молочної кислоти, кетонів тіла. Глюкози в сечі в звичайних

умовах не повинно бути. У склад сечі входять пігменти (уробілін, урохром), які визначають її колір. Із сечею виділяються електроліти (Na^+ , K^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} та ін.). Також у сечі містяться гормони та їх метаболіти, ферменти, вітаміни. Еритроцити з'являються в сечі (гематурія) при захворюваннях нирок і сечовивідних органів.

На основі даних з анатомії та фізіології людини [7] для обраного рівня абстрагування склад плазми крові, добової сечі та кількість переміщених компонентів на різних фазах сечоутворення у здорової дорослої людини масою близько 70 кг, що застосовує звичайну дієту, відображені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Склад плазми крові, добової сечі та кількість переміщених компонентів на різних фазах сечоутворення

Речовина	Вміст у плазмі крові (у 3,5 л)	Фільтрація (частка речовини, що переходить з потоку крові у потік сечі)	Реабсорбція (частка речовини, що повертається з потоку сечі у потік крові)	Секреція (частка речовини, що додатково переходить з потоку крові у потік сечі)	Екскреція – кінцева сеча (за 24 год.)
Вода	3185 мл	17,7%	99,4%	-	1000 мл
Na^+	525 мекв	15,5%	99,4%	-	150 мекв
K^+	16,1 мекв	11,7%	93,3%	0,98%	90 мекв
Cl^-	346,5 мекв	16,2%	99,2%	-	150 мекв
HCO_3^-	86,8 мекв	17,6%	100%	-	-
Глюкоза	17,15 ммоль	14,6%	100%	-	-
Сечовина	17,5 ммоль	15,5%	52,9%	-	410 ммоль
Сечова кислота	1,085 ммоль	14,4%	98%	1,16%	5 ммоль
Креатинін	0,3255 ммоль	11,6%	8%	1,07%	12 ммоль

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЬ НИРКИ

4.1. Структурно-функціональна модель нирки

Відповідно до визначального принципу імітаційного моделювання [14] спочатку побудовано структурно-функціональну модель нирки та процесів очищення крові та сечоутворення в ній. Кожному структурному елементу моделі поставлено у відповідність певний функціонал – реалізацію його поведінки якомога ближче до функціонування біологічного прототипу.

Біологічна нирка фактично є сукупністю нефронів, що сполучені паралельно. Практично всі біологічні нефрони виконують однакову функцію – очищують кров від кінцевих продуктів життєдіяльності людського організму.

В якості базового структурного елемента моделі нирки використано *штучний нефрон* – особливий «чорний ящик», який перетворює вхідний інформаційний потік *моделі неочищеної крові* на два вихідні інформаційні потоки *моделі очищеної крові* та *моделі сечі*. Перелік компонентів у всіх потоках буде однаковим, але кількісний їх склад суттєво відрізнятиметься: склад неочищеної крові розділиться на склад очищеної крові та склад сечі. Оскільки склад крові, як і склад сечі людини, охоплює сотні і тисячі різних компонентів, то, базуючись на принципі абстрагування, обирається деяка скінченна кількість N основних компонентів, що є найбільш важливими з точки зору нормального функціонування організму людини.

Як вже відомо, функціонування біологічного нефрона по очищенню крові та сечоутворенню охоплює три основні процеси: клубочкову фільтрацію, каналцеву реабсорбцію, каналцеву секрецію. Хоча процеси реабсорбції та секреції фактично відбуваються одночасно після фільтрації, проте їх можна розглядати послідовно саме в такому порядку. На кожній із цих фаз відбувається перетворення складу крові та сечі. Тому ці процеси розглядаються як окремі менші «чорні ящики», що сполучені послідовно.

Таким чином, модель нирки являє собою «великий чорний ящик», що

перетворює багатокomпонентний інформаційний потік моделі неочищеної крові у два інформаційні потоки моделей очищеної крові та сечі. Структурно «великий чорний ящик» утворений сукупністю сполучених паралельно «середніх чорних ящиків», що моделюють функціонування окремих нефронів. Останні в свою чергу складаються із трьох послідовно сполучених «малих чорних ящиків», кожен з яких моделює окремі фази процесів очищення крові та формування сечі і по своєму перетворює відповідні інформаційні потоки.

4.2. Імітаційна модель нирки на основі штучних нейронних мереж

Функціонування «малих чорних ящиків» можна ефективно відтворити за допомогою моделей *штучних нейронів* [9, 10]. Адже штучний нейрон – це теж «чорний ящик», який перетворює багатокomпонентний набір вхідних сигналів у деякий вихідний сигнал. У запропонованій моделі кожен окремий штучний нейрон визначатиме кількісний вміст одного окремого компонента у загальному числовому потоці моделей крові чи сечі. Такі штучні нейрони – це «атомарні чорні ящики» – вони вже неподільні. Кожну окрему фазу функціонування нефрона, тобто окремий «малий чорний ящик», можна моделювати прошарком штучних нейронів – «атомарних чорних ящиків». Тоді три послідовні фази нефросепарації реалізуються трипрошарковою штучною нейронною мережею прямого поширення сигналу [12].

Кожен прошарок мережі має N пар основних штучних нейронів: один із пари визначає кількість відповідного компонента в моделі крові, а другий – кількість цього ж компонента у моделі сечі. Число N визначається переліком основних стандартних компонентів крові та сечі на обраному рівні абстрагування. На фазах реабсорбції та секреції відбувається часткове перенесення ряду низькомолекулярних компонентів (вода, електроліти, глюкоза, амінокислоти, сечовина, сечова кислота, інші органічні сполуки) між такими парними штучними нейронами. Вихідні сигнали штучних нейронів третього прошарку, що моделюють фазу формування кінцевої сечі, утворюють

два вже розділені інформаційні потоки моделей очищеної крові та сечі.

Окрім цих парних основних штучних нейронів у кожному прошарку також є M пар додаткових штучних нейронів, які відповідають за наявність у потоках крові та сечі інших нестандартних компонентів. Це можуть бути ліки або інші засоби, що мають терапевтичний ефект, наприклад, діуретики або антидіуретики. Один із додаткових штучних нейронів кожної пари відповідає за вміст відповідного нестандартного компонента в потоці крові, а інший – за кількість цього ж компонента у потоці сечі, що формується. Такі нестандартні складники можуть суттєво впливати на інтенсивність сечоутворення. Число додаткових штучних нейронів може бути різною і визначається рівнем абстрагування моделі.

В межах кожного прошарку всі штучні нейрони сполучаються паралельно, тобто інформаційний потік рівномірно розподіляється між усіма «атомарними чорними ящиками».

Для всіх штучних нейронів величини суматорів будуть різними. Кожен із суматорів – це кількісна величина лише одного компонента, за яку відповідає «атомарний чорний ящик». Це досягається належним підбором вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків між прошарками штучних нейронів на основі відомих даних з нормальної і паталогічної анатомії та фізіології. Активаційні функції для кожного штучного нейрона – це лінійні функції.

Моделювання тривалого процесу нефросепарації в нирці передбачає циркулювання інформаційного потоку моделі крові в мережі. Виходи зі штучних нейронів, що відповідають за склад очищеної крові, по зворотних зв'язках подаються назад на вхід мережі. При цьому інформаційний потік змінюється за рахунок надходження в кров продуктів життєдіяльності організму. Виходи із нейронів, що відповідають за склад кінцевої сечі, є виходом мережі на поточному кроці обчислень. Ці результати визначають якість процесу нефросепарації. Виходи із нейронів, що відповідають за наявність нестандартних компонентів, теж попадають в інформаційний потік моделі крові і повертаються назад на вхід мережі.

Таким чином, імітаційна модель функціонування нирки є *відкритою складною штучною нейронною мережею із неповними глобальними зворотними зв'язками*. Відкритість мережі означає, що до інформаційного потоку моделі очищеної крові щоразу додаються окремі компоненти і формується модель неочищеної крові. Неповнота глобальних зворотних зв'язків означає, що із загального інформаційного потоку щоразу вилучаються компоненти моделі сечі.

Структурна схема описаної моделі зображена на рис. 4.1, де позначено наступні елементи:

- великі штрихові прямокутники з номерами від **1** до **1 000 000**– «середні чорні ящики», що є моделями окремих нефронів;
- малі прямокутники з номерами від **1** до **N** – «атомарні чорні ящики», що відповідають за кількісне входження окремого компонента в модель крові;
- ромби з номерами від **1** до **M** – «атомарні чорні ящики», що відповідають за наявність нестандартних компонентів у інформаційному потоці крові.
- шестикутники з номерами від **1** до **M** – «атомарні чорні ящики», що відповідають за наявність нестандартних компонентів у інформаційному потоці сечі, що формується.
- овали з номерами **1** до **N** – «атомарні чорні ящики», що відповідають за кількісне входження окремого компонента в модель сечі.
- суцільні жирні лінії і стрілки – компоненти інформаційного потоку моделі крові;
- пунктирні лінії і стрілки – синаптичні зв'язки, які моделюють вплив нестандартних компонентів в інформаційних потоках моделей крові і сечі на різні фази процесу нефросепарації;
- паралелограм **П.Ж.О.** – числові дані про продукти життєдіяльності організму, що додаються до інформаційного потоку моделі крові;
- штрих-пунктирні лінії та стрілки – компоненти інформаційного потоку моделі кінцевої сечі, вони є виходом мережі на поточному кроці обчислень.

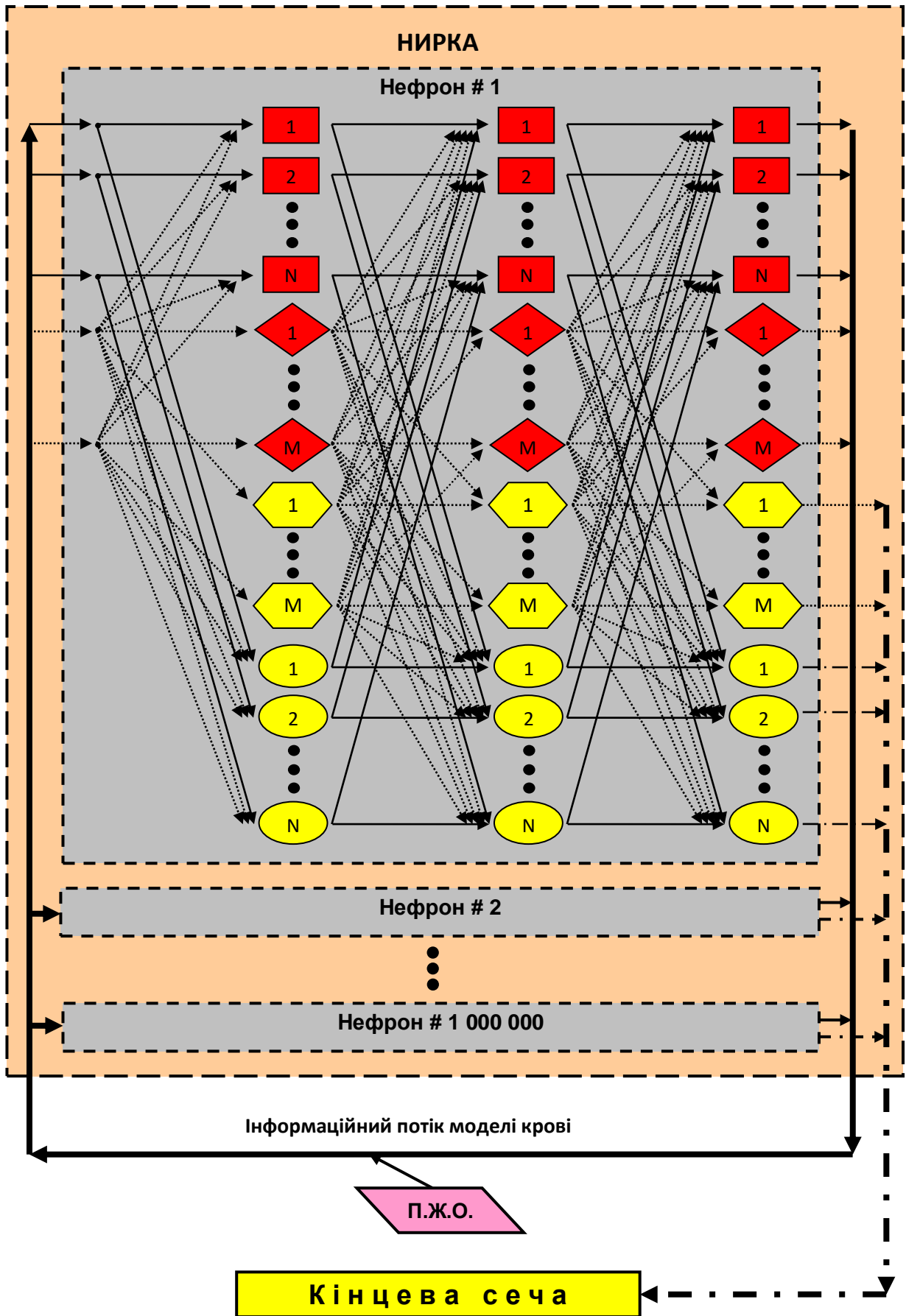


Рис. 4.1. Структурна схема моделі нирки

РОЗДІЛ 5. ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ НИРКИ

Імітаційна модель нирки побудована на базі багатопрошаркової штучної нейронної мережі прямого поширення. Програмна реалізація моделі здійснена засобами об'єктно-орієнтовного програмування на мові C# із застосуванням апарату наслідування, віртуальності та поліморфізму при побудові ієрархій класів, та використанням технології WPF при розробці програмного інтерфейсу [1, 3, 4, 17]. Для зберігання структури нейронної мережі на диску використано технологію JSON.

5.1. Опис програмної системи

Програма «Kidney Simulator» представляє собою симулятор роботи нирки, за допомогою якого користувач має можливість відстежувати біологічні показники нирки в залежності від параметрів та структури побудованої моделі (Рис. 5.1).

Нирка представлена в системі як сукупність штучних нефронів, які розділяють вхідний інформаційний потік моделі неочищеної крові, на два вихідні інформаційні потоки моделей очищеної крові та сечі. Кожен нефрон – це модель штучної нейронної мережі прямого поширення, що складається з трьох прошарків, кожен з яких відповідає за окремий етап нефросепарації.

Фактично симулятор об'єднує дві складові частини: конструктор моделі та інтерпретатор моделі.

Конструктор дає можливість користувачу налаштовувати конфігурацію штучної нейронної мережі, яка відтворюватиме процес функціонування нирки. Побудова моделі передбачає конструювання шаблонів штучних нефронів. Функціонування моделі нирки визначається кількісним складом кожного типу нефронів (корковий, мозковий, юкстамедулярний).

В режимі інтерпретації моделі відбувається відтворення процесу нефросепарації. При цьому виводяться числові дані про склад неочищеної крові, очищеної крові та сечі після кожної ітерації обчислень та склад сечі, накопиченої протягом усього періоду дослідження.

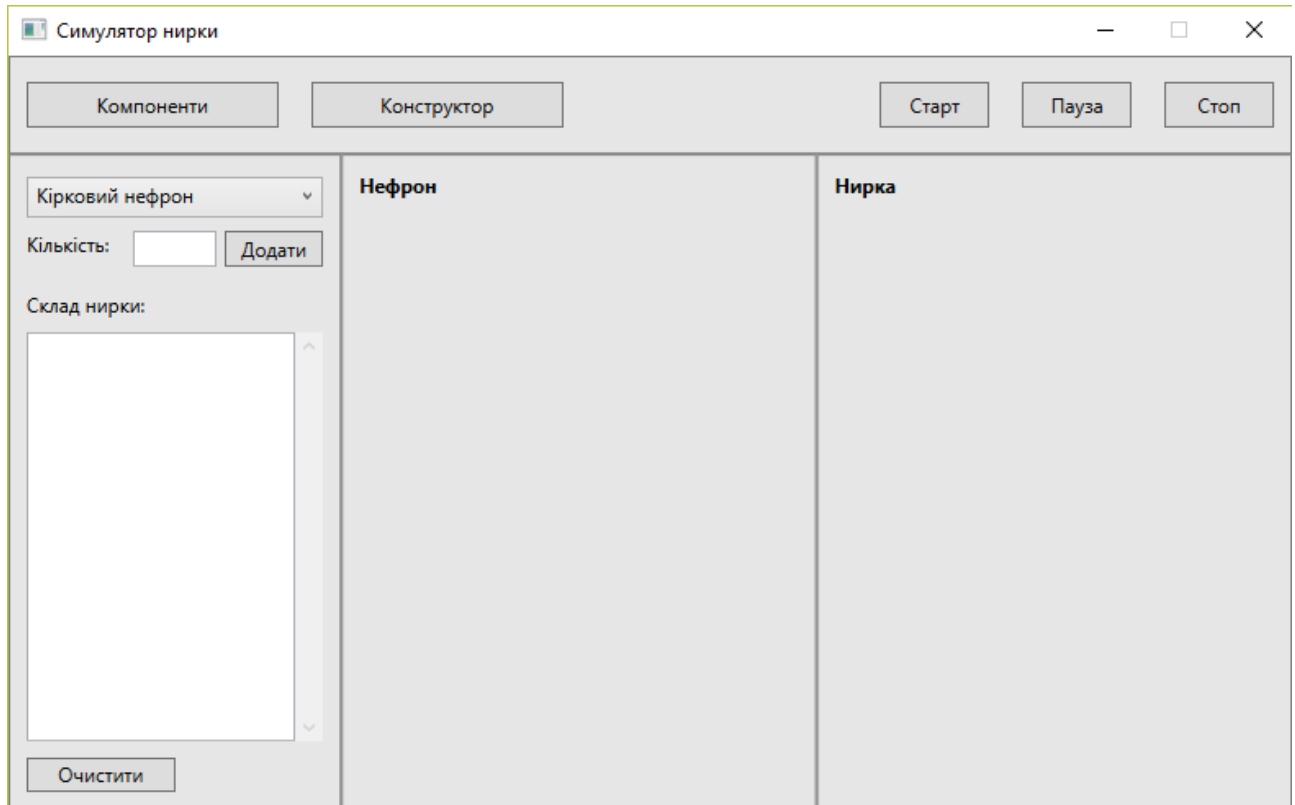
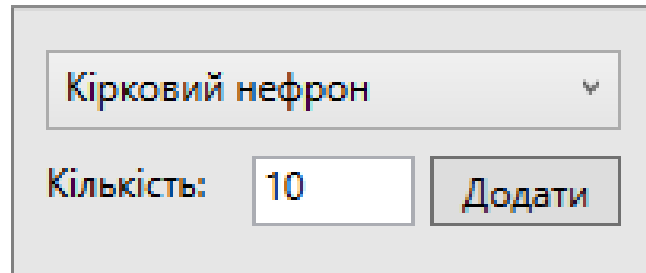


Рис. 5.1. Головне вікно програми.

5.2. Задання параметрів симуляції

Перед тим як приступити до симуляції роботи нирки, користувачу потрібно задати відповідні параметри моделі в програмі. Для початку необхідно сформувати саму модель нирки. Як було зазначено раніше, в системі нирка представлена як сукупність штучних нефронів, що сполучені паралельно. Для формування моделі потрібно додати необхідну кількість нефронів в спеціальній панелі в лівій частині вікна (Рис. 5.2).



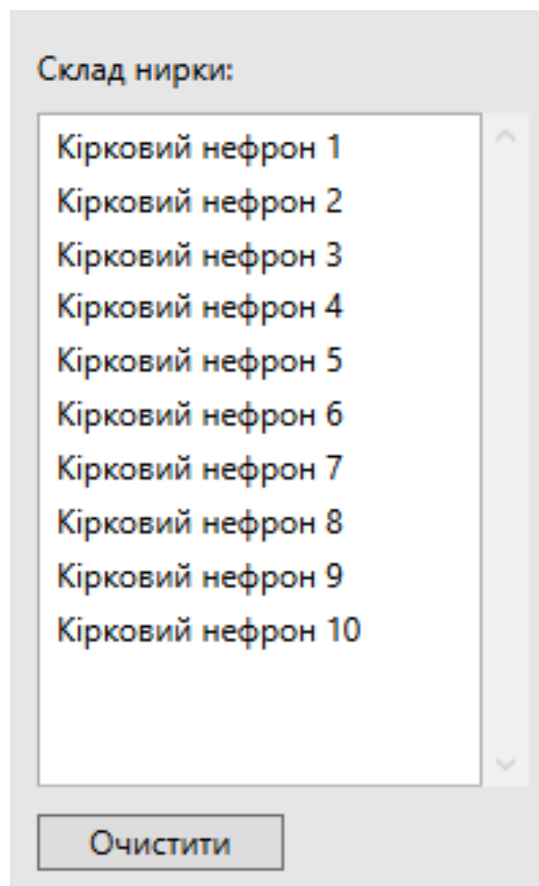
Кірковий нефрон

Кількість: 10

Додати

Рис. 5.2. Панель формування моделі нирки

При цьому обирається тип нефронів у відповідному комбобоксі, вводиться їх кількість в текстбокс нижче та активується кнопка «Додати». Після виконаних дій в лістбоксі знизу з'являться нові нефрони (Рис. 5.3).



Склад нирки:

- Кірковий нефрон 1
- Кірковий нефрон 2
- Кірковий нефрон 3
- Кірковий нефрон 4
- Кірковий нефрон 5
- Кірковий нефрон 6
- Кірковий нефрон 7
- Кірковий нефрон 8
- Кірковий нефрон 9
- Кірковий нефрон 10

Очистити

Рис. 5.3. Панель складу нирки

Також передбачена можливість очистити лістбокс та сформувати модель нирки спочатку. Для цього необхідно активувати кнопку «Очистити» нижче.

Після формування моделі нирки потрібно задати склад моделі плазми крові. Для цього використовується відповідне вікно, яке викликається кнопкою

«Компоненти» в головному вікні програми (Рис. 5.4). Кількість складових обрано відповідно до рівня абстрагування. Програма відразу ініціалізує поля значеннями за замовчуванням на основі даних з анатомії та фізіології людини [7]. За необхідності значення можна ввести самостійно. Кількість компонентів «Діуретик» та «Антидіуретик» задається в стандартних дозах конкретного препарату. Одна стандартна доза діуретика збільшує на 10% фазу фільтрації та на 10% зменшує реабсорбцію. Антидіуретик навпаки, зменшує фазу фільтрації та збільшує реабсорбцію на 10%. Після задання всіх значень необхідно активувати кнопку «ОК».

Стандартні компоненти:			Нестандартні компоненти:		
Вода:	3185,0	мл	Діуретик:	0,0	ст. доза
Na+:	525,0	мекв	Антидіуретик:	0,0	ст. доза
K+:	16,1	мекв			
Cl-:	346,5	мекв			
HCO ₃ ⁻ :	86,8	мекв			
Глюкоза:	17,2	ммоль			
Сечовина:	17,5	ммоль			
Сечова кислота:	1,1	ммоль			
Креатинін:	0,3	ммоль			

OK

Рис. 5.4. Панель складу моделі плазми крові

5.3. Симуляція роботи нирки

Коли всі системні параметри задані, можна приступати до запуску симуляції роботи нирки. Для цього активується кнопка «Старт» в правій верхній частині вікна. Програма розпочне циклічний процес нефросепарації. Сам процес реалізовано в окремому фоновому потоці, для забезпечення роботи програмного інтерфейсу і симуляції паралельно. Зазначимо, що у випадку незадання складу моделі плазми крові система розпочне роботу з даними за замовчуванням.

За одну ітерацію інформаційний потік моделі неочищеної крові розділяється, та проходить через усі нефрони. При цьому очищається весь обсяг крові. Оскільки при нормальному функціонуванні за 4-5 хв. через нирки проходить вся кров дорослої людини (близько 5 л), то в якості тривалості однієї ітерації приймається 4,5 хв. Таким чином в межах доби моделюється 320 ітерацій.

В якості продуктів життєдіяльності організму (**П.Ж.О.**) на кожній ітерації до інформаційного потоку моделі крові вводиться набір даних, який є наближенням чергової порції кінцевої сечі із випадковим відхиленням в межах 10%. Таке відхилення можна вважати в межах норми, оскільки склад **П.Ж.О.** залежить від режиму харчування, споживання рідини, фізичної активності тощо.

Дані про показники крові та сечі в процесі моделювання роботи нирки можна переглянути в інформаційній панелі в правій частині вікна (Рис. 5.5). Зліва відображається поточний склад крові, справа – склад сечі, виробленої за весь час роботи нирки. Дані оновлюються після кожної ітерації.

Нирка		
КРОВ НА ВХОДІ	КРОВ НА ВИХОДІ	СЕЧА
Вода: 3184,4 мл	Вода: 3181,0 мл	Вода: 16,9 мл
Na+: 525,0 мекв	Na+: 524,5 мекв	Na+: 2,4 мекв
K+: 16,1 мекв	K+: 15,8 мекв	K+: 1,4 мекв
Cl-: 346,5 мекв	Cl-: 346,0 мекв	Cl-: 2,2 мекв
HCO ₃ ⁻ : 86,8 мекв	HCO ₃ ⁻ : 86,8 мекв	HCO ₃ ⁻ : 0,0 мекв
Глюкоза: 17,2 ммоль	Глюкоза: 17,2 ммоль	Глюкоза: 0,0 ммоль
Сечовина: 17,6 ммоль	Сечовина: 16,3 ммоль	Сечовина: 6,4 ммоль
Сечова кислота: 1,1 ммоль	Сечова кислота: 1,1 ммоль	Сечова кислота: 0,1 ммоль
Креатинін: 0,3 ммоль	Креатинін: 0,3 ммоль	Креатинін: 0,2 ммоль

Рис. 5.5. Інформаційна панель нирки

Користувач також може отримати інформацію про результативність функціонування довільного нефрона в поточний момент часу. Для цього достатньо обрати потрібний елемент в лістбоксі. В додатковій інформаційній панелі виведуться дані, які також будуть оновлюватись на кожній ітерації (Рис. 5.6).

Нефрон №3		
КРОВ НА ВХОДІ	КРОВ НА ВИХОДІ	СЕЧА
Вода: 318,44 мл	Вода: 318,10 мл	Вода: 0,34 мл
Na+: 52,50 мекв	Na+: 52,45 мекв	Na+: 0,05 мекв
K+: 1,61 мекв	K+: 1,58 мекв	K+: 0,03 мекв
Cl-: 34,65 мекв	Cl-: 34,60 мекв	Cl-: 0,04 мекв
HCO ₃ ⁻ : 8,68 мекв	HCO ₃ ⁻ : 8,68 мекв	HCO ₃ ⁻ : 0,00 мекв
Глюкоза: 1,72 ммоль	Глюкоза: 1,72 ммоль	Глюкоза: 0,00 ммоль
Сечовина: 1,76 ммоль	Сечовина: 1,63 ммоль	Сечовина: 0,13 ммоль
Сечова кислота: 0,11 ммоль	Сечова кислота: 0,00 ммоль	Сечова кислота: 0,00 ммоль
Креатинін: 0,03 ммоль	Креатинін: 0,03 ммоль	Креатинін: 0,00 ммоль

Рис. 5.6. Інформаційна панель нефрона

Процес симуляції роботи нирки можна ставити на паузу та змінювати склад моделі плазми крові. Всі інші кнопки, та панель формування моделі нирки під час цього неактивні. Після зміни компонентів плазми крові для продовження процесу симуляції необхідно активувати кнопку «Старт». Програма продовжить процес з оновленими даними.

Для зупинки симуляції роботи нирки активується кнопка «Стоп». Програма завершить процес та очистить інформаційні панелі нирки та нефрона. Тоді можна почати симуляцію спочатку, натиснувши кнопку «Старт».

5.4. Конструктор нефронів

Конструктор нефронів є окремою складовою частиною програмної системи, що забезпечує гнучкий інтерфейс при роботі із графічною моделлю штучної нейронної мережі. За допомогою конструктора нефронів користувач

може змінювати конфігурацію нейронів обраного типу, формувати як структуру нейрона, так і реалізацію його поведінки. Таким чином конструктор забезпечує побудову структурно-функціональної моделі нейрона.

Для переходу в конструктор нейронів потрібно активувати кнопку «Конструктор» в головному вікні програми. Відкриється вікно, в якому можна завантажити попередньо створену модель нейрона (Рис. 5.7). Для цього обирається тип нейрона в лістбоксі та активується кнопка «Вибрати файл». Далі у вікні обирається попередньо створений файл з розширенням «.json». Після цього, при наступному створенні моделі нирки в головному вікні програми, поведінка цього типу нейрона буде відповідати структурі, описаної в обраному файлі.

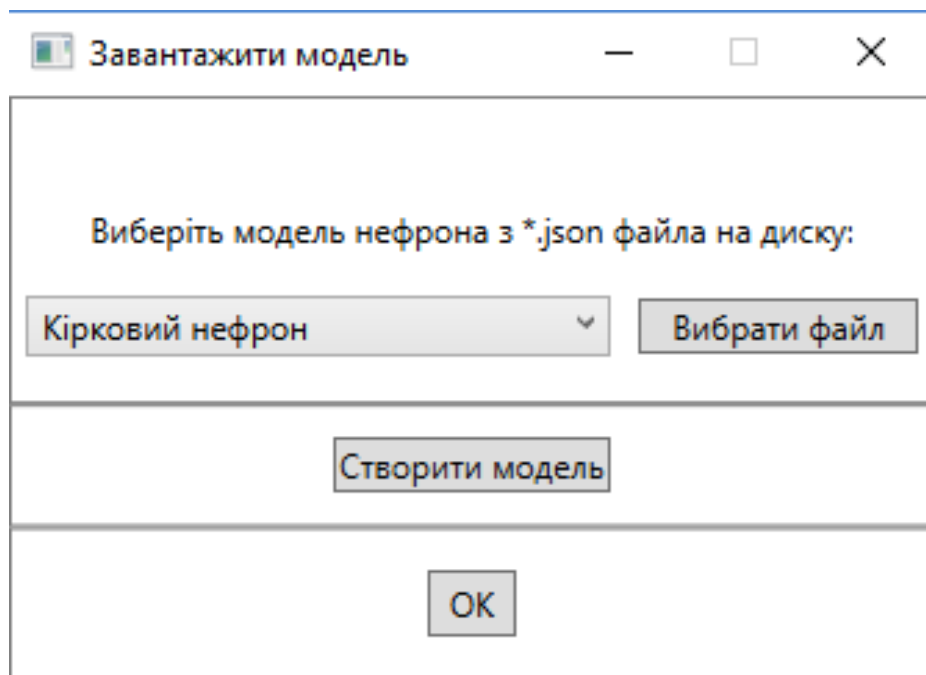


Рис. 5.7. Вікно завантаження моделі нейрона

Для створення моделі нейрона необхідно натиснути кнопку «Створити модель». Тоді відкриється вікно конструктора, в якому візуально відображається структура штучної нейронної мережі моделі нейрона (Рис. 5.8). Для ефективної роботи графічну модель можна прокручувати за допомогою повзунків знизу та справа.

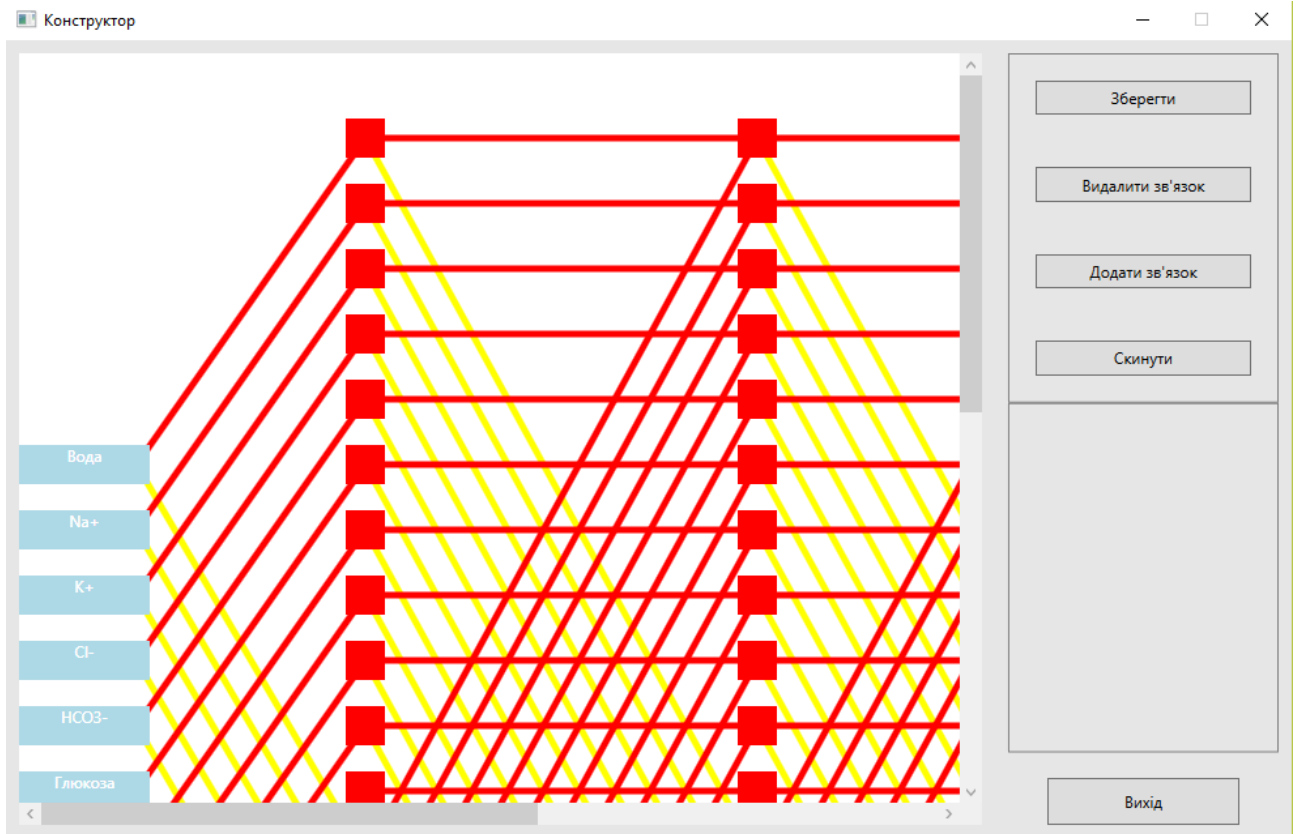


Рис. 5.8. Конструктор нефронів

В лівій частині графічної моделі знаходиться список основних компонентів крові та фактори зовнішнього впливу на організм – нестандартні компоненти в складі крові (зафарбовані голубим кольором), які сполучені зв'язками з штучними нейронами моделі нефрона.

Штучні нейрони зображені кольоровими квадратами та об'єднані в три прошарки, що відповідають за окремий етап нефросепарації. Нейрони червоного кольору відповідають за склад крові, жовтого – за склад сечі.

Синаптичні зв'язки між нейронами представлені кольоровими лініями, що сполучають відповідні графічні елементи моделі. Колір зв'язку відповідає кольору нейрона, до якого надходить відповідний сигнал. За замовчуванням сигнали від нейронів, що відповідають за основні компоненти моделі крові, подаються на два парних нейрони, що відповідають за цей компонент як у крові, так і в сечі. Такий самий характер зв'язків має місце і для нейронів, що відповідають за основні компоненти моделі сечі. Така топологія мережі

забезпечує моделювання переміщення компонентів між потоками крові і сечі на різних фазах сечоутворення.

В правій частині вікна знаходиться панель керування, за допомогою якої користувач має змогу видаляти зв'язки та створювати нові (Рис. 5.9).

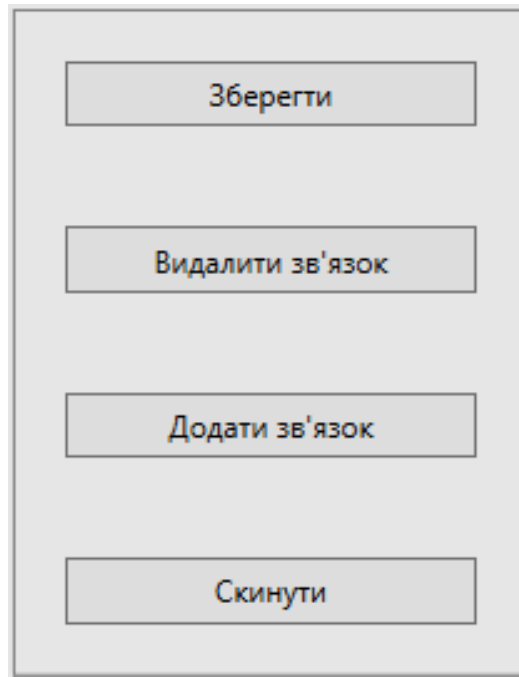


Рис. 5.9. Панель керування

Для видалення активується кнопка «Видалити зв'язок», та виділяються необхідні синаптичні зв'язки. Для виходу з режиму видалення потрібно натиснути кнопку «Відмінити» в правій нижній частині вікна.

Щоб додати новий зв'язок необхідно активувати кнопку «Додати зв'язок» та сполучити потрібні нейрони. Система дозволяє сполучати лише нейрони в сусідніх прошарках. Нейрони, до яких можна провести зв'язок зафарбуються в зелений колір. Сигнал по нововведеному зв'язку передаватиметься від нейрона попереднього прошарку до нейрона наступного прошарку.

Кожен зв'язок має свою вагу, яка визначає частку сигналу з виходу нейрона попереднього прошарку. Користувач має можливість змінювати значення ваги, виділивши потрібний зв'язок та ввівши нове значення в полі, яке з'явиться в правій нижній частині вікна (Рис. 5.10).

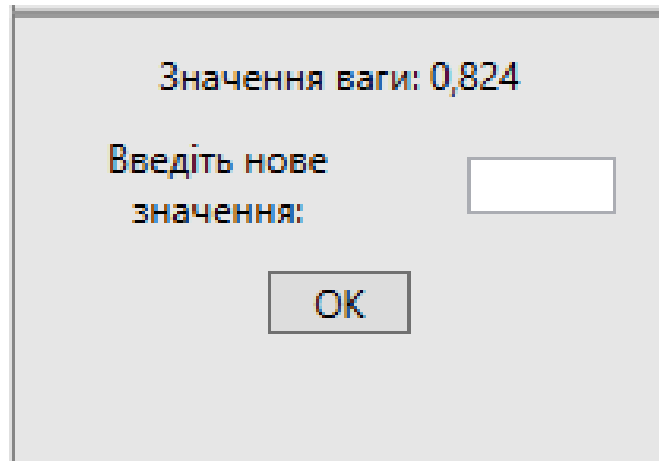


Рис. 5.10. Панель зміни значення ваги

За замовчуванням при створенні нового зв'язка йому присвоюється нульова вага.

Кнопка «Скинути» дозволяє відмінити всі внесені зміни в структуру штучної нейронної мережі, повернутися до початкових значень та побудувати модель нефрона спочатку.

Після того як нефрон сконструйований, користувачу потрібно зберегти його конфігурацію. Зробити це можна, активувавши кнопку «Зберегти» на панелі керування в правій частині вікна. Відкриється вікно, в якому можна ввести назву файлу та вибрати директорію для його збереження. Програма запише структуру нейронної мережі в файл з розширенням «.json». Тоді при черговій сесії роботи із симулятором можна завантажити відповідну модель штучного нефрона і продовжити дослідження.

5.5. Особливості роботи програми на різних ЕОМ

Програма «Kidney Simulator» майже не навантажує систему, проте її продуктивність залежить від кількості доданих нефронів в моделі нирки. Чим більше нефронів додано, тим менша продуктивність програми.

Як вже було сказано, графічний інтерфейс програми розроблено за допомогою технології WPF. Це є технологія, орієнтована на Windows. Тому це

означає, що додатки WPF можуть використовуватися тільки на комп'ютерах, що працюють під управлінням операційної системи Windows.

Необхідними умовами для роботи програми є використання її в середовищі Windows 7 та вище, і наявність в системі встановленого .NET Framework версії 4.5.

Щодо роздільної здатності екрану, проблема в тому, що призначений для користувача інтерфейс в традиційних Windows-додатках не є масштабованим. В результаті, якщо використовувати монітор з високою роздільною здатністю, який має більшу щільність пікселів, вікно програми стає менше і читати текст в ньому важче. WPF не страждає від цієї проблеми, тому що використовує апаратно-незалежний піксель, який становить 1/96 частину дюйма незалежно від фактичної роздільної здатності екрану. В результаті якщо створити кнопку шириною в 1 дюйм на звичайному моніторі, вона залишиться шириною в 1 дюйм і на моніторі з високою роздільною здатністю. WPF просто візуалізує її більш деталізовано, з великою кількістю пікселів. Тому проблеми з відображенням інтерфейсу програми бути не повинно.

ВИСНОВКИ

Розроблена в процесі дослідження імітаційна модель нирки людини являє собою *відкриту складну штучну нейронну мережу з неповними глобальними зворотними зв'язками*. При побудові моделі враховані особливості будови та функціонування нирки в цілому та окремих нефронів зокрема. Застосування необхідного рівня абстрагування, який одночасно гарантував достатній рівень адекватності моделі, дозволило обрати лише найбільш важливі параметри крові та сечі, які визначають перебіг процесу нефросепарації.

Застосування можливостей об'єктно-орієнтовного програмування при побудові ієрархій класів забезпечило надійне функціонування інформаційної системи при достатній простоті структури і максимальній функціональній гнучкості. Такий підхід дозволить в подальшому легко переналаштовувати конфігурацію мережі з врахуванням деталей і особливостей нових більш уточнених рівнів абстрагування моделей нефронів, нирки та процесу нефросепарації.

Використання технології WPF дозволило створити програмний інтерфейс, незалежний від роздільної здатності пристрою виведення, та задіяти можливості сучасного графічного обладнання.

Представлена модель дозволяє гнучко налаштувати та відстежувати біологічні показники організму в залежності від параметрів побудованої моделі нирки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Албахари Дж. С# 6.0. Справочник. Полное описание языка / Джозеф Албахари, Бен Албахари. – С.-Пб.: Вильямс, 2016. – 1040 с.
2. Богданов К. Вода внутри нас / К. Богданов // Квант. – 2003. – № 2. – С. 2-8.
3. Вайсфельд М. Объектно-ориентированное мышление / Мэтт Вайсфельд. – С.-Пб.: Питер, 2014. – 304 с.
4. Гамма Е. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Е. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссилес. – С.-Пб.: Питер, 2001. – 368 с.
5. Григорян Р.Д. Программно-моделирующий комплекс для теоретических исследований взаимодействия физиологических систем организма / Р.Д. Григорян, К.Л. Атоев, П.Н. Лисов, А.А. Томин // Проблемы програмування. – 2006. – № 1. – С. 79-92.
6. Григорян Р.Д. Концепция виртуального организма в биоинформатике / Р.Д. Григорян // Проблемы програмування. – 2007. – № 2. – С. 140-150.
7. Ганонг В.Ф. Фізіологія людини: Підручник / Вільям Ф. Ганонг. – Львів: БаК, 2002. – 784 с.
8. Жмуров А.А. Модель системы противоточного умножения нефрона / А.А. Жмуров, А.В. Евдокимов // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: Сб. тр. 48-й науч. конф. МФТИ. – М.: МФТИ, 2005. – Т. 3. – С. 14-15.
9. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 382 с.
10. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі / О.Г. Руденко, Є.В. Бодянський – Харків: СМІТ, 2006. – 404 с.
11. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2005. – 320 с.
12. Сяський В.А. Імітаційна модель нирки людини на основі штучних нейронних мереж / В.А. Сяський, І.О. Сяська // «Сучасні проблеми

- математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій»: Матеріали Міжнародної наукової конференції. – Рівне: НУВГП, РДГУ, 2018. – С. 252-254.
13. Томашевський В.М. Моделювання систем / В.М. Томашевський. – К.: Видавнича група ВНУ, 2005. – 352 с.
 14. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Роберт Ю. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 420 с.
 15. Gyenge C.C. Transport of fluid and solutes in the body. I. Formulation of a mathematical model / C.C. Guenge, B.D. Bowen, R.K. Reed, J.L. Bert // *Am. J. Physiol.* – 1999. – 277 – (*Heart Circ. Physiol* 46): H1215-H1227.
 16. Layton A.T. A numerical method for renal models that represent tubules with abrupt changes in membrane properties / A.T. Layton, H.E. Layton // *Bull. of Mathematical Biology.* – 2002. – 45. – 549-567.
 17. Microsoft Developer Network [Електронний ресурс] : Using WPF Controls
Режим доступу: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb384295\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb384295(v=vs.110).aspx). – Назва з екрану.