

**| В.І. Гриценко, А. Б. Котова,
М.І. Вовк, С.І. Кіфоренко,
В. М. БЕЛОВ |**

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

Н.В.В. 2017 Київ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ЦЕНТР
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І СИСТЕМ

*В.І. ГРИЦЕНКО, А.Б. КОТОВА,
М.І. ВОВК, С.І. КІФОРЕНКО,
В.М. БЕЛОВ*

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

В БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

КУРС ЛЕКЦІЙ

Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів
вищих навчальних закладів

КИЇВ
НАУКОВА ДУМКА
2007

ББК 28. Оф.я73
І-74

Гриф надано
Міністерством освіти і науки України
(лист № 14/18.2 — 2725
від 02.12.2005)

Гриценко В.І., Котова А.Б., Вовк М.І., Кіфоренко С.І., Белов В.М.
І-74 Інформаційні технології в біології та медицині: Курс лекцій: Навчальний посібник. — Київ: Наук. думка, 2007. — 25 арк.: іл.
ISBN 978-966-00-0630-0.

Розглянуто різні аспекти використання інформаційних технологій у біології, теоретичній та практичній медицині, охороні здоров'я. Викладено загальні та конкретні поняття щодо інформаційних технологій як технологій одержання нового знання. Наведено концептуальні основи і технологію моделювання біосистем різного рівня ієрархії, розглянуто конкретні математичні моделі біосистем з використанням диференціальних та алгебраїчних рівнянь. Описано концептуальні основи та еволюцію синтезу біотехнічних систем керування рухами та їх застосування в медичній практиці. Висвітлено основи нового напрямку — біокомедицини як міждисциплінарного узагальнення інформаційних полів знань біології, екології та медицини. Наведено архітектуру єдиного медико-інформаційного простору та роль у ньому телемедицини.

Для біологів, медиків, математиків, фахівців у галузі інформаційних технологій та інформатизації, студентів і аспірантів вищих навчальних закладів.

Рецензент

доктор фізико-математичних наук, професор *Б.М. Кіфоренко*

*Видання здійснене за державним контрактом
на випуск наукової друкованої продукції*

Науково-видавничий відділ медико-біологічної,
хімічної та геологічної літератури
Редактор *Н.С. Колосок*

ISBN 978-966-00-0630-0

© В.І. Гриценко, А.Б. Котова,
М.І. Вовк, С.І. Кіфоренко,
В.М. Белов, 2007

© Дизайн і художнє виконання
рисунків Ю.М. Волков, 2007

ПЕРЕДМОВА

Рішення опублікувати курс лекцій обумовлено інтенсивним зростанням ролі інформаційних технологій у біологічних дослідженнях, особливо у теоретичній та практичній медицині, охороні здоров'я. Нині ефективність діагностики та лікування значною мірою визначається рівнем інформаційних технологій, широтою їх використання. Особливого значення інформаційні технології набувають у зв'язку з інформатизацією медичної галузі, формуванням госпітальних інформаційних систем як складових єдиного інформаційного медичного простору, розвитком телемедицини, електронної медичної консультативної допомоги, створенням електронного медичного паспорта.

У Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій і систем НАН і МОН України накопичено значний досвід використання методів і засобів інформаційних технологій для розв'язання біомедичних проблем, які склали основу запропонованого курсу лекцій. Вони читаються у навчальному процесі з дисципліни «Інформаційні технології в біології та медицині» при підготовці магістрів зі спеціальності «Інтелектуальні системи прийняття рішень» на кафедрі «Математичні методи системного аналізу» при Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій і систем НАН та МОН України.

У курсі лекцій з дисципліни «Інформаційні технології в біології та медицині» визначаються загальні та конкретні поняття щодо інформаційних технологій у біології та медицині як технологій одержання нового знання. Значну увагу приділено теоретичним розробкам і вирішенню прикладних завдань.

Основні завдання курсу — навчити студентів методам і засобам усвідомлення тріади «дані—інформація—знання» для вирішення завдань біологічної та медичної спрямованості, ознайомити з існуючими новітніми розробками теоретичного та прикладного характеру в галузі інформаційних технологій, визначити подальші перспективи використання і значення останніх для біології та медицини.

Курс спрямовано на розвиток таких властивостей інтелекту, як аналітичність, логічність, асоціативність та системність мислення.

Передмова

Зміст лекцій проструктуровано таким чином, щоб студенти змогли усвідомити теоретичне та прикладне значення інформаційних технологій від концептуальних основ інформаційних технологій (частина 1) через технологію моделювання біосистем різного рівня ієрархії (частина 2), синтез біотехнічних систем діагностики та керування (частина 3) до міждисциплінарного узагальнення інформаційних полів знань біологічної та медичної спрямованості і побудови єдиного медико-інформаційного простору (частина 4).

Частина 1 складається з 4 розділів, які послідовно ознайомлюють студентів з еволюцією розвитку інформаційних технологій в біології та медицині з визначенням основних понять, методами аналізу і усвідомлення первинних інформаційних масивів, методом моделювання як усвідомлення інформації.

Частина 2 цілком присвячена математичному моделюванню як основному методу синтезу інформаційних технологій і систем. Вона складається з 5 розділів, в яких розглянуто конкретні математичні моделі та технологія їх побудови при дослідженні біосистем різного рівня ієрархії. Зокрема, розглянуто еволюцію моделювання електричного потенціалу нервової клітини (розділ 2.1); моделювання реакції організму на вплив хімічних речовин через системну функцію печінки як органа, найчутливішого до інтоксикації (розділ 2.2); математичні моделі фізіологічної системи вуглеводного обміну та алгоритми керування у разі патології (діабет) (розділ 2.3); еволюцію моделювання особистості та соціальної поведінки (розділ 2.4) й інформаційні технології побудови «індексу здоров'я» людини як триєдності фізичного, психічного та соціального здоров'я (розділ 2.5).

Частина 3 — це теорія біотехнічних систем та її застосування. В ній розкриваються як концептуальні засади синтезу біотехнічних систем (розділ 3.1), так і технологія синтезу біотехнічних систем керування рухами та їх застосування в медичній практиці (розділ 3.2).

Частина 4 складається з двох розділів. Розділ 4.1 присвячено новому міждисциплінарному науковому напрямку — біоекоmedичині, що цілеспрямовано синтезує інформаційні поля знань біології, екології та медицини. Тут розглянуто комп'ютерно-інформаційний простір біоекоmedичини, його архітектуру та функціональне наповнення банків знань інформаційних систем. Створенню єдиного медико-інформаційного простору як взаємопов'язаної ієрархічної мережі госпітальних інформаційних систем присвячений розділ 4.2. Наведено архітектуру цього простору, структуру типової госпітальної інформаційної системи, розглянуто інформаційно-аналітичні та інформаційно-довідкові системи, що відображають специфіку госпітального закладу. Телемедицина розглядається як біотехнічна система: пацієнт—лікар—технологічна комп'ютерно-телекомунікаційна система—лікар-консультант, що дає можливість проводити віртуальну діагностику та лікування в умовах територіальної роз'єднаності лікувальних закладів.

Довідник визначень основних термінів, які використовуються у даному курсі, допоможе студентам краще орієнтуватися в курсі лекцій.

ЧАСТИНА 1_____

Вступ до курсу «Інформаційні технології в біології та медицині»

ЕВОЛЮЦІЯ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

Розглядаються питання еволюції поняття інформаційних технологій (ІТ) в біології та медицині, а саме:

- сходження наук на прикладі біологічних від біології та медицини через біологічну і медичну кібернетику до біологічної та медичної інформатики;
- визначення поняття ІТ у біології та медицині як технології одержання нового знання;
- об'єкт і предмет дослідження ІТ;
- інформаційно-структурна модель усвідомлення тріади «дані—інформація—знання», з якої окреслюються проблеми і завдання ІТ;
- прогноз розвитку ІТ у біології та медицині.

1.1.1. Предмет дослідження біології та медицини

У сучасних наукових дослідженнях вагоме значення мають роботи, присвячені аналізу біологічних систем і вирішенню прикладних завдань біології та медицини. Це пов'язано зі складністю біологічних систем, завдань, що стоять перед біологією та медициною, а також необхідністю їх вирішення для людства.

Насамперед дамо визначення біології як науки. Біологія — це сукупність наук про живу природу, значну різноманітність померлих і живих істот, що нині населяють Землю, їх структуру та функції, походження, поширення та розвиток, зв'язки один з одним та неживою природою. Біологія встановлює загальні та окремі закономірності, що належать життю у всіх його проявах і властивостях.

Дамо визначення біології людини. **Біологія людини** — галузь біології, що вивчає:

- закономірності структури і функції взаємопов'язаної роботи органів і фізіологічних систем внутрішньої сфери організму людини та при взаємодії їх із навколишнім середовищем;
- закономірності структурно-функціональної організації мозку як органа та об'єкта управління;
- пізнання процесів мислення та функціонування свідомості як усвідомлення процесів мислення.

Глобальна ідея біології базується на пізнанні функціонування мозку, органів і фізіологічних систем організму в нормі.

На сучасному рівні класифікації біології як рівноправні критерії виступають об'єкт та предмет дослідження. Вони дали велику кількість усталених наукових напрямів, що системно визначають біологію. Усвідомлення існуючих і усталених визначень різних наукових напрямів біології дають можливість виокремити як об'єкт, так і предмет дослідження. Зазначимо, що критерії, які виокремлено, мають особливість взаємопроникнення один в інший. Так, якщо класифікувати біологію за об'єктом дослідження, то майже кожному різноякісному об'єкту дослідження (наприклад, рослина як об'єкт ботаніки, людина — біології людини) властиві різні предмети дослідження, що формують класифікацію біології за цим критерієм. І навпаки, кожній класифікації біології за предметом дослідження властиві різні об'єкти дослідження. Наприклад, морфологія зі своїм предметом дослідження форми та побудови організмів властива і ботаніці, і зоології, і біології людини з об'єктами дослідження відповідно рослини, тварини та людина. На підтвердження цього розглянемо класифікацію біології за об'єктом і предметом дослідження (рис. 1.1).

Як об'єкти дослідження біології виділено такі:

- рослини — ботаніка;
- тварини — зоологія;
- людина — біологія людини;
- мікроорганізми — мікробіологія;
- комплексна система: живі організми + навколишнє середовище — екологія;
- комплексна система: паразит + хазяїн — паразитологія;
- померлі організми, що збереглися у вигляді викопних решток, відбитків і слідів їх життєдіяльності — палеонтологія.

Якщо перші чотири науки виділені з огляду на різноякісність об'єкта, то наступні дві — екологія та паразитологія — з огляду на

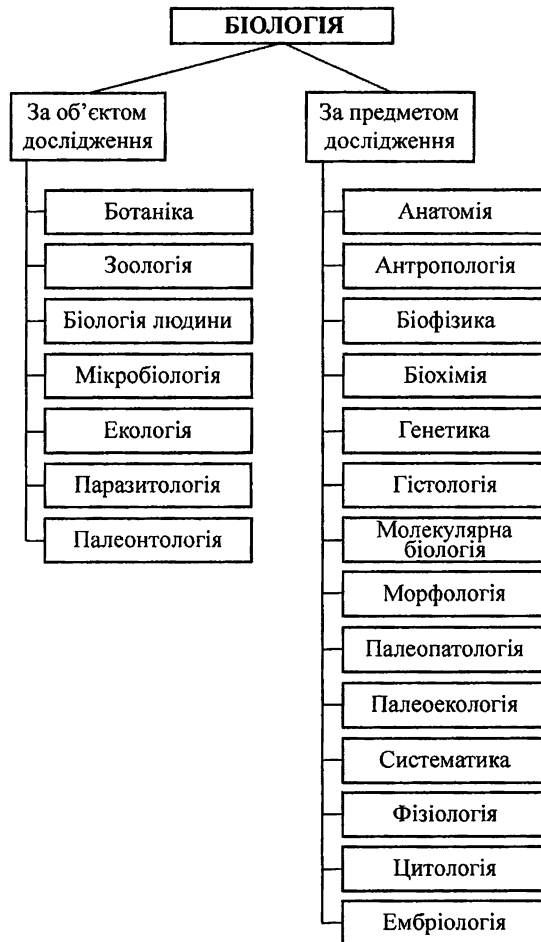


Рис. 1.1. Класифікація науки *біологія* за об'єктом і предметом дослідження

комплексність об'єкта дослідження, причому як складові комплексних систем можуть виступати будь-які живі організми. Померлі організми є об'єктом дослідження палеонтології.

Предметами дослідження, що сформували ту чи іншу науку (рис. 1.1), є:

- будова організму (переважно внутрішня) — анатомія;
- утворення рас людини, нормальні варіації фізичної будови людини — антропологія;

- фізичні та фізико-хімічні явища у живих організмах, вплив різних фізичних чинників на живі істоти — біофізика;
- структура, розподіл, перетворення та функції хімічних речовин, що входять до складу організмів, — біохімія;
- закони спадковості та мінливості організмів і методи керування ними — генетика;
- будова та функції тканин багатоклітинних організмів, взаємодія клітин у межах одної тканини та між клітинами різних тканин, еволюція тканин, їх розвиток в організмі — гістологія;
- структура та властивості біологічно важливих макромолекул (білків, нуклеїнових кислот), що відповідають за різні сторони прояву життя, розвиток організмів, зберігання та передачу спадкової інформації, перетворення енергії в живих клітинах — молекулярна біологія;
- зовнішня форма та будова організмів, формоутворення на організменому та еволюційно-видовому рівнях — морфологія;
- хворобливі зміни у рослин та живих організмів, що мешкали на Землі за давніх часів, — палеопатологія;
- спосіб життя та умови мешкання померлих організмів, їх зміни в процесі історичного розвитку життя на Землі — палеоекологія;
- різноманітність усіх існуючих і померлих організмів, взаємовідношення та родинні зв'язки між різними групами: популяціями, видами, родами — систематика;
- життєдіяльність цілого організму та окремих його частин (клітин, органів, фізіологічних систем та ін.), механізми різних функцій живого організму та їх зв'язки між собою, регуляція пристосування до навколишнього середовища, походження і становлення у процесі еволюції та індивідуального розвитку особини — фізіологія;
- будова та функції клітин, їх зв'язок та співвідношення в органах і тканинах багатоклітинних організмів; одноклітинні організми — цитологія;
- передзародковий розвиток (утворення статевих клітин), запліднення, зародковий та личинковий розвиток організму — ембріологія.

У свою чергу, кожна складова науки *біологія*, що класифікована за об'єктом дослідження (рис. 1.1), може бути також класифікована за об'єктами та предметами дослідження, специфічними для кожної складової.

Визначення медицини. Медицина — галузь науки та практичної діяльності, що спрямована на збереження та зміцнення здоров'я людей, запобігання хворобам і лікування їх. Медицина вивчає:

- будову та функції організму здорової людини;
- будову і функції організму людини за різних видів патології;
- динаміку розвитку хвороб, їх діагностику, профілактику, лікування та реабілітацію;
- вплив на здоров'я людини умов навколишнього середовища, праці, побуту.

Завдання медицини лікувальної — повернути або максимально наблизити порушені в результаті захворювання фізіологічні показники у діапазон норми (здоров'я).

Глобальна ідея медицини — пізнання функціонування мозку, органів і систем організму за умов патології, на основі цього пізнання і зіставлення з нормальним функціонуванням, розробка методів і засобів діагностики, а також профілактико-лікувально-реабілітаційних (керуючих) впливів. Таким чином, медицина лікувальна і теоретична ґрунтується на усвідомлених знаннях досягнень у біології та тісно з ними пов'язана.

1.1.2. Складові біологічної та медичної кібернетики

Біологічна кібернетика — науковий напрям кібернетики, що вивчає загальні закони отримання, зберігання, перетворення та передачі інформації в біологічних системах: структурну та функціональну складність та організацію біосистем, зміну їх складності та організації за умов взаємодії з середовищем, складність та організацію процесів керування як усередині біосистеми, так і в умовах взаємодії її з середовищем опосередковано через математичні моделі.

Математичні моделі біологічних систем різного рівня ієрархії є об'єктами дослідження біокібернетики.

Зважаючи на те, що біосферу складають світ тварин, світ рослин, світ людей, доцільно провести поділ біологічної кібернетики за науковими напрямками (рис. 1.2). На цьому рисунку подано наукові напрями біокібернетики із зазначенням відповідних об'єктів дослідження.

Фізіологічна кібернетика. Об'єктами вивчення опосередковано через математичні моделі є:

- системи внутрішньої сфери людини, тварин і специфічні системи рослин;

- внутрішня сфера в цілому як підсистема цілісного організму.

Фізіологічна кібернетика вивчає:

- структурну та функціональну складність й організацію елементів, органів і систем внутрішньої сфери організму;



Рис. 1.2. Поділ біокібернетики за науковими напрямками

• складність та організацію взаємодії систем внутрішньої сфери організму між собою з метою підтримки параметрів, які визначають нормальну життєдіяльність організму, та закономірності їх зміни у разі зміни середовища.

Нейрокібернетика. Об'єктами дослідження є:

- вегетативна нервова система;
- аналізаторні системи;
- мозок людини та тварин у цілому.

Предмет нейрокібернетики становлять структурна і функціональна складність та організація перелічених рівнів нервової системи за умов виконання таких системних функцій:

• сприйняття сигналів зовнішнього середовища, їх перетворення та переробка;

• відокремлення образів зовнішнього середовища, синтез образів та нейрофізіологічних моделей образів, запам'ятовування моделей образів;

• взаємодія моделей образів за умов розпізнавання та класифікації в процесі мислення та вироблення відповідної цілеспрямованої дії за динамічної взаємодії організму з середовищем.

Психологічна кібернетика. Об'єктом дослідження є цілісний організм людини і тварин, що взаємодіють із середовищем. Психологічна кібернетика стосовно людини розглядає цілісний організм як особистість, яка становить підсистему складної системи «організм + середовище».

Предметом психологічної кібернетики є складність та організація сфер свідомості та підсвідомості за умов взаємодії організму із середовищем.

Екологічна кібернетика. Об'єктом дослідження є угруповання, популяції тварин різних видів з певним місцем мешкання, тобто екологічні системи.

Предметом екологічної кібернетики є:

- складність та організація взаємовідносин особин у популяції;
- взаємовідносини популяції з речовинними та енергетичними ресурсами місця мешкання та територіальними особливостями місця мешкання.

Зупинимось насамперед на **завданнях**, загальних для усіх наукових напрямів біокібернетики. До них слід віднести такі, що пов'язані з предметом дослідження:

- виокремлення системи, що досліджується, з урахуванням рівня ієрархії, визначення вихідної системної (адекватної) функції;
- виявлення закономірностей структурної організації системи та взаємозв'язку із системною функцією;
- виявлення закономірностей зміни системної функції залежно від зміни внутрішнього стану та дій зовнішнього для цієї системи середовища;
- розкриття закономірностей взаємної організації середовища та системи в процесі еволюції, розвитку та реагування біосистем.

До загальних **проблем**, що стоять перед біологічною кібернетикою, можна віднести такі:

- одержання необхідної й адекватної для розкриття закономірностей організації функціонування біосистем інформації;
- визначення критеріїв оптимального функціонування біосистем (мінімізація речовини, енергії, організації, часу, відхилення від потрібного рівня чи траєкторії тощо);
- синтез оптимальних (адекватних) моделей біосистем.

Медична кібернетика — науковий напрям, що вивчає загальні закони отримання, зберігання, перетворення, передачі інформації, структурну і функціональну складність та організацію елементів, органів і фізіологічних систем організму за умов патології, зміни складності та організації при взаємодії з еволюційно-неадекватним середовищем і організацію процесів керування здоров'ям індивідуума і суспільства опосередковано за математичними та інформаційно-структурними моделями.

Терміни **складність** та **організація** у медичній кібернетичі мають ширше значення. Річ у тому, що організм людини чи підсистеми організму у цьому науковому напрямі включаються у складнішу композиційну систему. Якщо першу частину такої системи складають системи, які функціонують патологічно, чи цілісний організм

хворого, то до її другої частини можна віднести численну та різномірну сукупність засобів, що дають змогу виявити патологію, діагностувати її, визначити розвиток та керувати процесом лікування індивідуального хворого. Отже, аналізуючи структурну складність та організацію медичних систем, слід враховувати якісну відмінність елементів, що складають композиційну медичну систему.

В основу виокремлення наукових напрямів медичної кібернетики покладено якісну відмінність другої підсистеми, що разом із хворим формує композиційну медичну систему: лікар; штучні елементи, органи та системи; навколишнє середовище; органи масового медичного обслуговування. На рис. 1.3 показано поділ медичної кібернетики із зазначенням відповідних об'єктів дослідження.

Медико-біологічна кібернетика. Об'єктом дослідження є композиційна система «людина + лікар». Предметом медико-біологічної кібернетики є складність і організація:

- біосистем різного рівня ієрархії, що належать до різних сфер організму за умов патології;
- процесів діагностики, прогнозування та керування в системі «хворий + лікар».

Медико-соціальна кібернетика (організація охорони здоров'я). Об'єктом дослідження є система «людина + сфера медичного обслуговування», а метою — забезпечення громадського здоров'я за допомогою організації всеосяжної системи соціально-економічних і медичних заходів.

Предметом медико-соціальної кібернетики є складність та організація композиційних медичних систем підтримки та відновлення індивідуального здоров'я окремої особистості та населення загалом.

Медико-екологічна кібернетика досліджує композиційну систему «людина + навколишнє середовище». Поняття «навколишнє середовище» включає в себе середовище мешкання людини та виробниче середовище. Предметом медико-екологічної кібернетики є складність навколишнього середовища та організація його впливу на здоров'я людей.

Інженерно-фізіологічна кібернетика. Об'єкт дослідження — медичні біотехнічні системи (БТС), що складаються з органів і фізіологічних систем організму людини з частково або повністю втраченими функціями та штучних технічних органів і систем, які частково чи повністю відновлюють втрачені або патологічно змінені функції біосистем. До медичних БТС слід віднести також системи, в яких технічні системи підключаються до живого організму тимчасово під час проведення операцій чи реабілітації патологічно функціонуючих органів і фізіологічних систем організму.

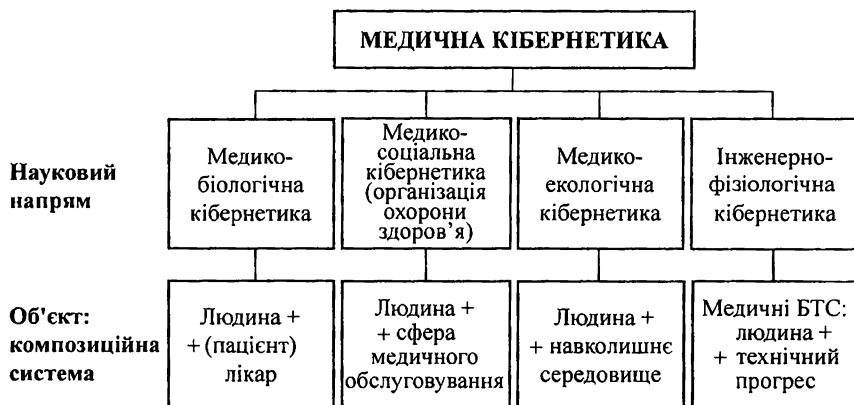


Рис. 1.3. Поділ медкібернетики за науковими напрямками

Предметом інженерно-фізіологічної кібернетики є:

- складність та організація відображення у технічних «протезах» функцій, властивостей та закономірностей тих біосистем, які вони замінюють;

- складність та організація об'єднання живих і штучних біосистем в єдину композиційну систему, що функціонує у реальному часі.

Головною системною функцією (метою) композиційних систем будь-якого наукового напрямку медичної кібернетики є збереження, відновлення та підтримка здоров'я людей — здоров'я особистості та громадського здоров'я. У зв'язку з цим сформулюємо такі її загальні завдання:

- діагностика норми і патології систем організму загалом, контингенту населення, навколишнього середовища, засобів забезпечення здоров'я;

- прогнозування динаміки патологічного процесу, перебігу лікування та керування станом середовища, засобами соціальних систем забезпечення здоров'я;

- керування станом здоров'я особистості й населення, чистою середовища та ефективністю функціонування засобів забезпечення здоров'я.

На перший план висувається проблема розробки засобів автоматизації та комп'ютеризації збору інформації, постановки діагнозу та вибору керуючих дій (лікування).

1.1.3. Поняття біологічної та медичної інформатики

Взагалі інформатика є наукою достатньо високого рівня абстракції. **Біологічна і медична інформатика** вивчає складність та організацію процесу дослідження відповідно біологічних і медичних систем, тобто складність та організацію одержання нового знання шляхом алгоритмізації усвідомлених дій людини-дослідника, фіксації його логіко-евристичних міркувань, шляху вирішення завдання.

Отже, об'єкт біо- та медінформатики — інтелект дослідника, а саме — усвідомлення дій людини у процесі дослідження. Предмет біо- та медінформатики — складність та організація здобуття нового знання.

Нині, вирішуючи завдання дослідження, діагностики, прогнозування та керування, людина працює сумісно з ефективними засобами комп'ютерної техніки. Останні дають можливість широко використовувати математичну обробку інформації і створюють умови для ефективнішого розв'язання задач. Це привело до появи цілого класу нових складних систем, у тому числі й БТС, поставило нові завдання та відкрило нові можливості. Складність нових систем визначається не новим об'єктом дослідження та керування, що мають якісно нову складність, а складністю взаємодії людини з допоміжними технічними засобами, у тому числі комп'ютерними, при вирішенні завдань. При цьому функціонування людини та робота допоміжних технічних засобів об'єднуються нежорстким, нефіксованим алгоритмом взаємодії, а ефективність розв'язання задачі визначається їх сумісною інтелектуальною потужністю.

Щодо режиму взаємодії, то він визначається активним діалогом між людиною та комп'ютером з метою конструювання адекватного, невідомого раніше єдиного алгоритму функціонування. При цьому максимально використовуються як творчі можливості людини, так і відповідні інтелектуальні програми комп'ютера. Зрозуміло, що вищий рівень інтелектуалізації взаємодії потребує алгоритмізації усвідомлених дій людини при вирішенні завдань. Сучасний рівень технології одержання знань дав змогу усвідомити необхідність фіксації алгоритмів дослідження. Таким чином, біологічну та медичну інформатику цікавлять не результати експериментування над біосистемами та фактами через моделі, тобто самі моделі або набір даних, а процес їх одержання та дослідження.

Сходження біонаук за рівнем абстракції. Біологія та медицина, біологічна та медична кібернетика, біологічна та медична інформатика за рівнем абстракції можуть бути класифіковані таким чином.

Біологія та медицина як науки вивчають біологічні системи будь-якого рівня ієрархії, в тому числі й людину, у нормі та патології (об'єкт дослідження). Головним методом біології є експериментальне дослідження *in vivo* та *in vitro*. У медицині додається ще й метод спостереження. З цих позицій зазначені науки можна визначити як науки конкретні.

Біологічна та медична кібернетика підвищує рівень абстракції дослідження. Ці наукові напрями конструюють власну спеціальну предметну сферу — сферу математичних моделей, причому складність та організація біосистем вивчаються опосередковано через складність і організацію математичних моделей. Головним методом цих наукових напрямів є метод математичного моделювання — *in model*. Таким чином, біологічна та медична кібернетика до досліджень *in vivo* та *in vitro* додає дослідження *in model*.

Таблиця 1.1. Класифікація біонаук

Концептуальна складова	Біологія	Біокібернетика	Біоінформатика
Об'єкт	Біосистеми різного рівня ієрархії	Математичні моделі біосистем різного рівня ієрархії	Моделі процесу дослідження
Предмет	Складність та організація біосистем	Складність та організація математичних моделей біосистем	Складність та організація моделей процесу дослідження, тобто складність та організація одержання нового знання
Метод	Експерименти <i>in vivo</i> та <i>in vitro</i>	Математичне моделювання <i>in model</i>	Інформаційні технології процесу дослідження <i>in brain</i>
Еволюція наук у предметній галузі «Біологія»	Усвідомлення людиною себе як об'єкта біосфери	Усвідомлення необхідності використання абстрактних і кількісних методів поглиблення та змістовності дослідження та поява нових технічних засобів дослідження	Усвідомлення необхідності усвідомлення самого процесу дослідження для прискорення та підвищення ефективності розвитку науки (одержання нового знання)
Засоби підвищення ефективності	Удосконалення експериментальних методів дослідження	Удосконалення математичних методів моделювання	Удосконалення інтелектуалізації інформаційних технологій

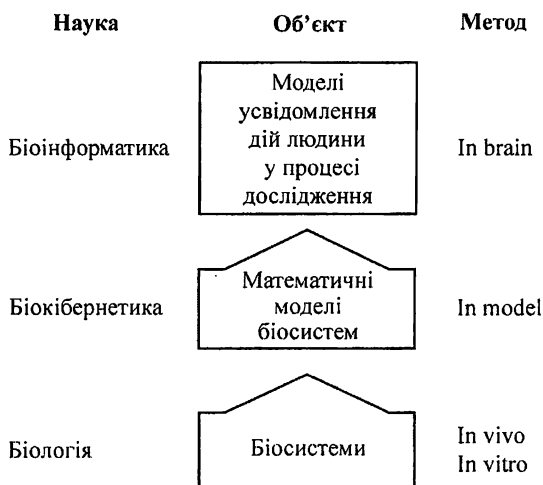


Рис. 1.4. Рівень абстракції біонаук

Біологічна та медична інформатика ще більше підвищує рівень абстракції дослідження. Її предметну сферу становлять моделі усвідомлених дій людини у процесі дослідження. Її метод з повним правом може бути названий in brain, тобто інформаційні технології процесу дослідження. Девіз біо- та медінформатики: не що, а як.

Сходження рівня абстракції біонаук демонструє схема, представлена на рис. 1.4.

Класифікацію біонаук за їх концептуальними складовими подано у табл. 1.1.

Таким чином, виникнення біологічної та медичної кібернетики пов'язане з усвідомленням необхідності використання абстрактних і кількісних методів поглиблення та збільшення змістовності дослідження. А поява біо- та медінформатики — з необхідністю усвідомлення самого процесу дослідження для прискорення та ефективності розвитку біології та медицини (одержання нового знання).

1.1.4. Аксиоматика інформаційних технологій

Основою будь-якої науки, у тому числі біології та медицини, є експериментальні дослідження. Останні дають можливість одержати дані — первинний інформаційний масив, що є першим і необхідним кроком у пізнанні об'єкта, який досліджується. Наступним кроком є усвідомлення (упорядкування) цих даних —

попередня обробка (наприклад, стандартизація, уніфікація, класифікація, ранжирування, кластеризація, статистичний та функціональний аналіз тощо) з метою «спрощення» даних для розуміння, тобто одержання інформації. Для одержання нових знань про об'єкт, що досліджується, треба усвідомити одержану інформацію, тобто надати їй змістовності. Звідси випливає ідея інформаційних технологій: усвідомлення тріади «дані—інформація—знання» як необхідний метод одержання нового знання.

Дамо деякі визначення стосовно інформаційних технологій у біології та медицині.

Інформаційні технології у біології та медицині (ІТБМ) — сукупність засобів, методів та алгоритмів, що базуються на особливостях інформаційних процесів у біосистемах, тобто біологічно та медично верифікований інформаційний продукт, який може бути застосований для вирішення наукових і прикладних завдань у предметних галузях біології та медицини. Як метод ІТБМ — це технології одержання нового знання у процесі дослідження, тобто технології отримання даних, інформації та її упорядкування.

Нове знання — це усвідомлено упорядкована інформація про об'єкт дослідження. Під упорядкуванням інформації будемо розуміти надання їй змістовності, тобто розкриття функціональних і статистичних зв'язків, закономірностей та принципів динаміки внутрішньосистемної структурно-функціональної організації біосистем при взаємодії з навколишнім середовищем (внутрішнім і зовнішнім).

Об'єкт інформаційних технологій в біології та медицині — завдання біологічної й медичної спрямованості, в яких власне біологічні та медичні об'єкти виступають опосередковано.

Предметом ІТБМ є теоретико-алгоритмічна інтелектуалізація процесу дослідження в предметних галузях біології і медицини та конструювання медичних інформаційних, у тому числі й біотехнічних, систем діагностики, прогнозування та керування (лікування). Окреже, підкреслимо ще раз, що об'єктом ІТБМ є завдання біологічної та медичної спрямованості на відміну від об'єкта предметних галузей біології та медицини — біосистеми різного рівня ієрархії, включаючи людину. На рис. 1.5 представлено інформаційну схему, яка наочно демонструє цю відмінність. Зрозуміло, що актуальність завдань диктується предметними галузями біології та медицини. Використання методів і засобів інформаційних технологій підвищує рівень узагальнення та системності дослідження і дає змогу одержати інформаційний продукт інтелектуального типу.

Проблеми і завдання розробки ІТБМ ув'яжемо з ідеєю інформаційних технологій — усвідомлення тріади «дані—інформація—знання»

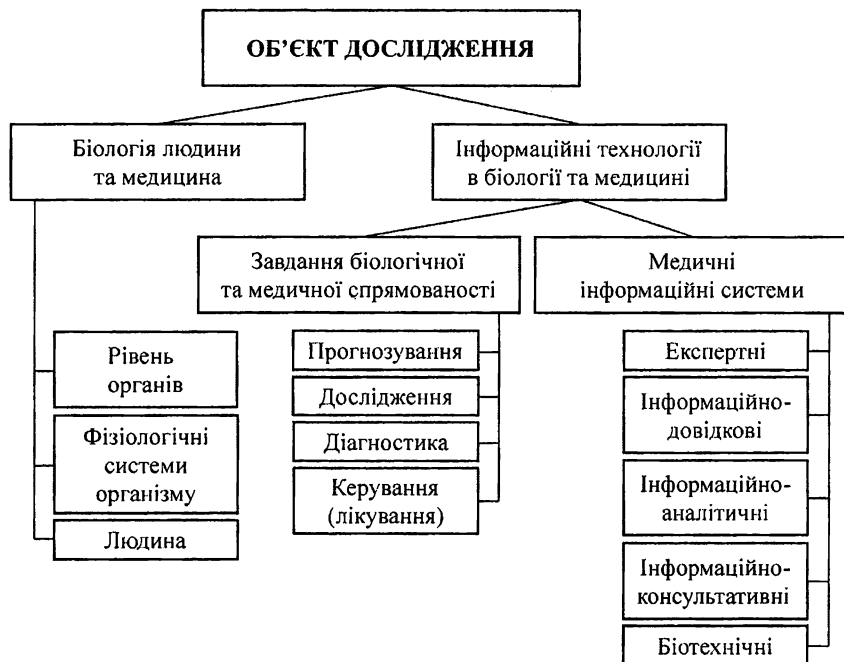


Рис. 1.5. Інформаційна схема об'єктів дослідження

ня». На рис. 1.6 представлено інформаційно-структурну модель усвідомлення цієї тріади. Вона обумовлює головну проблему — усвідомлення мислення дослідника, що підрозділяється на:

- усвідомлення даних, тобто одержання нової інформації про об'єкт, що досліджується;
- упорядкування одержаної інформації, тобто одержання нового знання про об'єкт дослідження.

Виходячи із загальноприйнятого визначення проблеми як складного теоретичного або практичного питання, що потребує вирішення, наведемо **приклад** завдань ІБТМ, які підлягають дослідженню. До першої проблеми належать, наприклад, такі:

- теоретико-алгоритмічні методи дослідження первинних інформаційних масивів (даних) з метою одержання нових, прихованих від прямого спостереження відомостей про об'єкт, що досліджується;
- методи та засоби уніфікації різноякісних медико-біологічних натурних даних;
- логіко-евристичні методи структуризації та класифікації первинних інформаційних масивів медико-біологічних даних з метою наповнення банку даних.

Етапи
одержання
знання

2-й рівень:
усвідомлення
інформації з метою
надання їй
змістовності

1-й рівень:
усвідомлення
даних з метою
спрощення їх
для розуміння

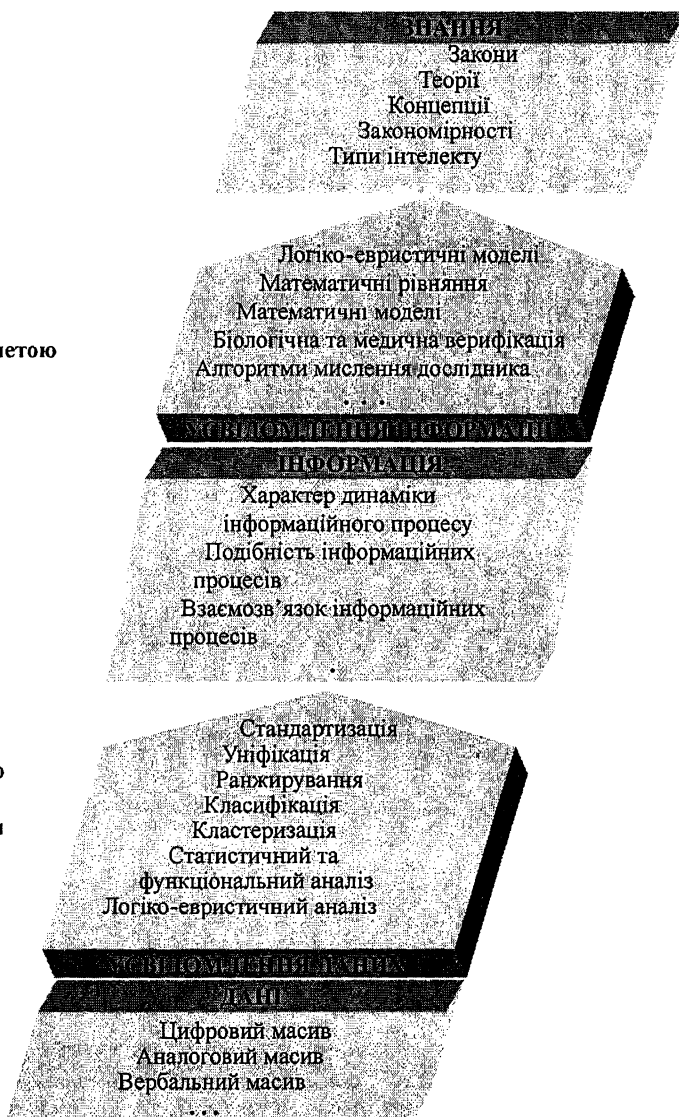


Рис. 1.6. Інформаційно-структурна модель усвідомлення тріади «дані—інформація—знання»

До проблеми усвідомлення інформації належать, наприклад, такі завдання, як розробка:

- математичних та імітаційних моделей впливу внутрішнього та зовнішнього середовища на функціонування біосистем різного рівня ієрархії від клітини до цілісного організму в нормі та при патології;

- інформаційних технологій формалізації критеріїв взаємодії інформаційних процесів у біосистемах будь-якого рівня ієрархії в нормі та при патології;

- інформаційних технологій використання математичних моделей функціонування фізіологічних систем організму та організму в цілому для діагностики, прогнозування та керування станом біосистем (профілактика, лікування, реабілітація: медична, оздоровча);

- інформаційних технологій біологічної та медичної верифікації структури і наповнення банку знань біотехнічних систем дослідження та керування;

- логіко-евристичних методів структуризації та класифікації нових медико-біологічних знань (усвідомленої інформації, одержаної в процесі дослідження) для наповнення банку знань.

Наведемо завдання, що тісно ув'язують обидві проблеми ІБТМ. Це, наприклад, розробка методів та засобів:

- алгоритмізації мислення дослідника (лікаря), який вивчає функціонування біосистеми будь-якого рівня ієрархії, її стану, прогнозування функціонування в нормі та при патології, керування її станом (профілактика, лікування, реабілітація);

- інформаційних технологій підтримки діяльності лікаря для діагностики і прогнозування стану фізіологічних систем та організму в цілому і керування ними.

Отже, визначені поняття інформаційних технологій в біології та медицині, об'єкт і предмет дослідження. Згідно з визначенням об'єктом дослідження є конкретні завдання, пов'язані з дослідженням структурно-функціональної організації, динаміки інформаційних процесів і процесів керування біосистемами будь-якого рівня ієрархії в нормі та при патології, вирішення яких просуває нас у напрямку досягнення глобальної ідеї біології та медицини. Використання методів і засобів інформаційних технологій для вирішення завдань підвищує змістовність дослідження з метою одержання нових знань про об'єкт (безпосередній чи опосередкований): відбувається сходження інтелекту дослідника від даних *in vivo* та *in vitro* (біологія, медицина) до даних *in model* (біо- та медкібернетика) та *in brain* — алгоритм мислення дослідника (біо- та медінформатика).

Таким чином, інформаційні технології — це систематизація подання знань, створення логічних та обчислювальних засобів для вирішення завдань встановлення закономірностей з первинних інформаційних масивів, побудова ефективно реалізованих теорій та медичних інформаційних систем. Інформаційні технології виступають як інструмент комп'ютерного аналізу даних і знань високого рівня. Одним із необхідних аспектів досягнення світового рівня фундаментальних і прикладних досліджень у предметних галузях біології та медицини є розробка інтелектуальних інформаційних технологій вирішення завдань біомедичної спрямованості. **Інтелектуальні інформаційні технології** — це технології, в яких зафіксовано усвідомлені дії людини як відображення її інтелекту при розв'язуванні задач та представлення процесу і результатів рішення мовою та в образах, зручних для сприйняття користувачем.

1.1.5. Основні досягнення та прогноз розвитку деяких напрямів інформаційних технологій в біології та медицині

Досягнення. В рамках фундаментальних досліджень в галузі ІТ в біології та медицині для широкого класу біомедичних структур і систем проведено дослідження, спрямовані на створення інформаційної теорії закономірностей їх розвитку та функціонування з урахуванням взаємодії з навколишнім середовищем.

Результатами фундаментальних досліджень можна вважати методи дослідження як основу ІТ, принципи, критерії класифікації, математичні моделі, концептуальні та вербально-алгоритмічні теорії функціонування фізіологічних систем організму та організму загалом.

У загальній програмі теоретичних досліджень:

- створено *методи*: синтезу біотехнічних систем дослідження, діагностики та керування як класу нових складних систем; ієрархічної згортки; інтелектуалізації різноякісної інформації; визначення вагових коефіцієнтів у лінійно-виважених сумах; біологічності зворотного зв'язку та адаптивного керування рухами людини;

- обґрунтовано *принципи*: здобуття нових знань в біології та медицині; підтримки прийняття медичних рішень на базі математичних моделей; багатоканального програмного біоелектрокерування рухами з метою відновлення втрачених рухових функцій; інфотомування як інформаційного поширеного дослідження об'єкта; побудови стандартизованих історій хвороб;

- розроблено *концептуальні основи*: здоров'я людини як триєдності фізичного, психічного та соціального статусів, що дає змогу

одержати вербально-кількісну міру здоров'я; єдиного медико-інформаційного простору як ієрархічної структури, яка має принаймні три рівні ієрархії; біоеко медицини як міждисциплінарної галузі науки і практики, що цілеспрямовано синтезує відомості біології, екології та медицини і генерує нові знання, спрямовані на досягнення здоров'я людини та формування гармонійно розвиненої особистості. Функціонування людини розглянуто з єдиної позиції системного гомеостазу — концепції, що тісно пов'язана з поняттям сталості, самозбереження, адаптації, оптимальності, незалежності як здатності зберігати свою внутрішню суть попри зовнішні зміни; самоорганізації основної функції системи дихання та кровообігу, що базується на принципі компромісного розв'язання конфліктних ситуацій, які виникають в організмі при розподілі кисню.

Теоріями функціонування фізіологічних систем організму та організму загалом можна вважати такі:

- структурно-функціональну математичну теорію нервової клітини, яка дала змогу конкретизувати загальнобіологічний принцип єдності структури та функції стосовно нейрона і по-іншому тлумачити процеси, що відбуваються на нервовій мембрані;

- математичну теорію пристосування організму до повторних дій шкідливих хімічних факторів середовища, яка дає можливість розраховувати ступінь дії речовини на організм, що необхідно для оцінки екобезпеки довкілля;

- математичну теорію керування фізіологічною системою вуглеводного обміну, що дає змогу вирішити завдання кількісної діягностички порушень системи загалом, розрахувати значення керуючих дій для хворих на інсулінозалежний діабет різного ступеня тяжкості. Результати цих розрахунків необхідні як підтримка дій лікаря при прийнятті рішень;

- основи теорії керування такими фізіологічними системами, як кровообіг, терморегуляція, зовнішнє дихання за нормальних та екстремальних умов життєдіяльності людини;

- основи теорії організації біологічно-адекватного керування рухами з визначенням ступеня адекватності зовнішнього керування рухами;

- нові закономірності залучення рухових волокон м'язів при керуванні рухами за допомогою біотехнічної системи. Ці закономірності стали основою фізіологічного обґрунтування синтезу БТС, що дає змогу оптимізувати процес формування рухів на різних етапах реабілітації;

- нові схеми (комплекс діагностичних і прогностичних алгоритмів) діагностики, прогнозування та лікування ряду захворювань;

- теоретичні основи оптимального керування імунною реакцією, що нормалізує захисні функції організму за рахунок синхронізації роботи окремих регуляторних ланок імунної системи;

- теорію медичних інформаційних систем (МІС), яка є продуктом комп'ютерної науки, що залежить не тільки від її інструментарію (засобів моделювання, технології програмування, можливостей комп'ютерів), а й від структури побудови знань, рівня їх формалізованості та точності мови тієї предметної галузі, в якій МІС використовуються.

До **практичних** результатів слід віднести розроблені комп'ютерні алгоритми і системи діагностики та керування (лікування). Це насамперед:

- медичні інформаційні системи клінічного, курортологічного та профілактичного профілю;

- біотехнічні системи відновлення порушених рухових функцій типу «Міотон» та «Біоміотон»;

- програмно-технічний комплекс, що реалізує оригінальну інформаційну технологію обробки електрокардіосигналів у фазовому просторі «Фазаграф»;

- комп'ютерна програма корекції дози інсуліну, що базується на процедурі прогнозування добового глікемічного профілю на фоні різних зовнішніх дій;

- комп'ютерна система розпізнавання форм міопії (стаціонарна або прогресуюча) у дітей за одноразовим обстеженням;

- комп'ютерна система визначення кількісної міри здоров'я.

Прогноз розвитку. Мета такого прогнозу — показати місце та роль інформаційних технологій у вирішенні проблем, що стоять перед наукою у період створення інформаційного суспільства. Інформаційно-структурну модель прогнозу представлено на рис. 1.7. Вона є відкритою, розглядає лише деякі напрями розвитку інформаційних технологій в біології та медицині й містить три рівні ієрархії: проблеми у предметних галузях *біологія та медицина*; проблеми у предметній галузі *інформаційні технології*; завдання інформаційних технологій як об'єктів дослідження.

Вибір проблем у предметних галузях біологія та медицина, а саме (рис. 1.7):

- оптимізація діагнозу і керуючих дій (профілактика, лікування, реабілітація);

- оптимізація доступу до інформації;

- теоретична біологія та медицина;

- здоров'я здорових

це викликає сумніву. Демократичне суспільство здоров'я індивідуального здоров'я нації в цілому вважає своїм першочерговим завданням.

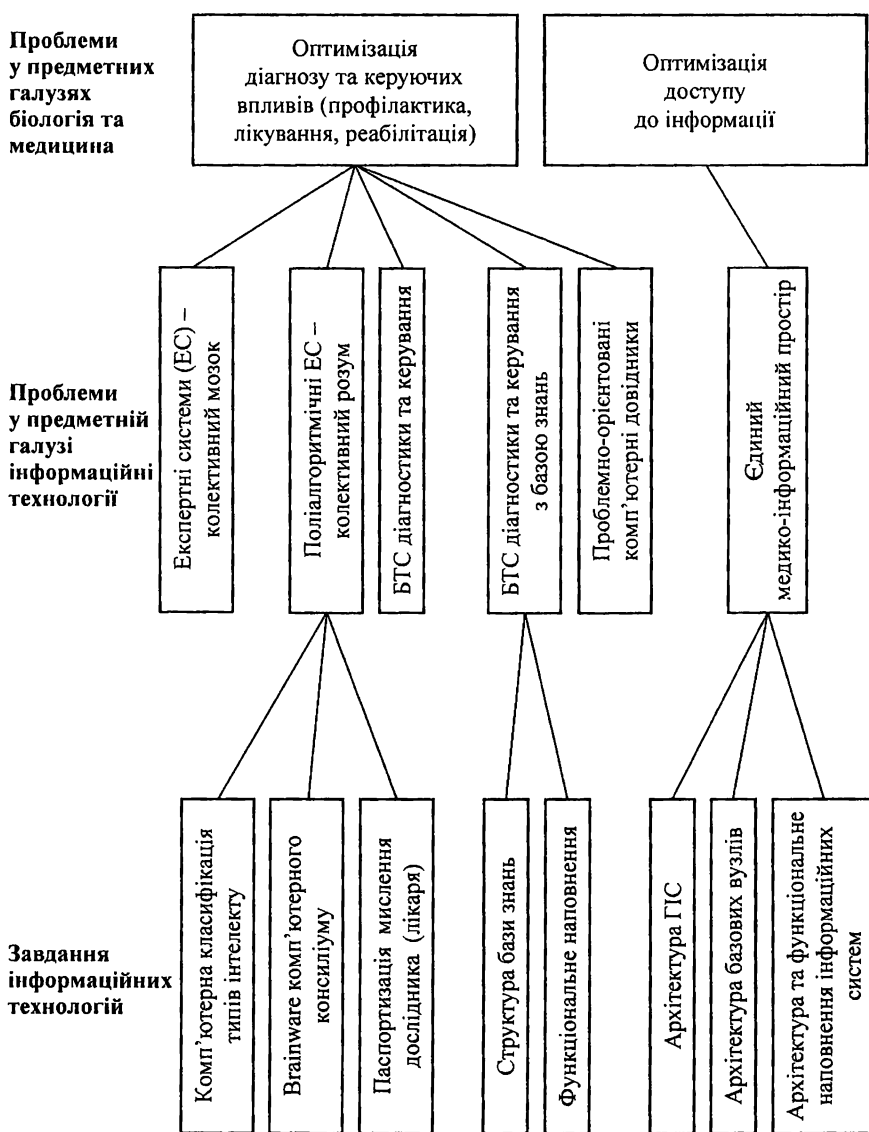
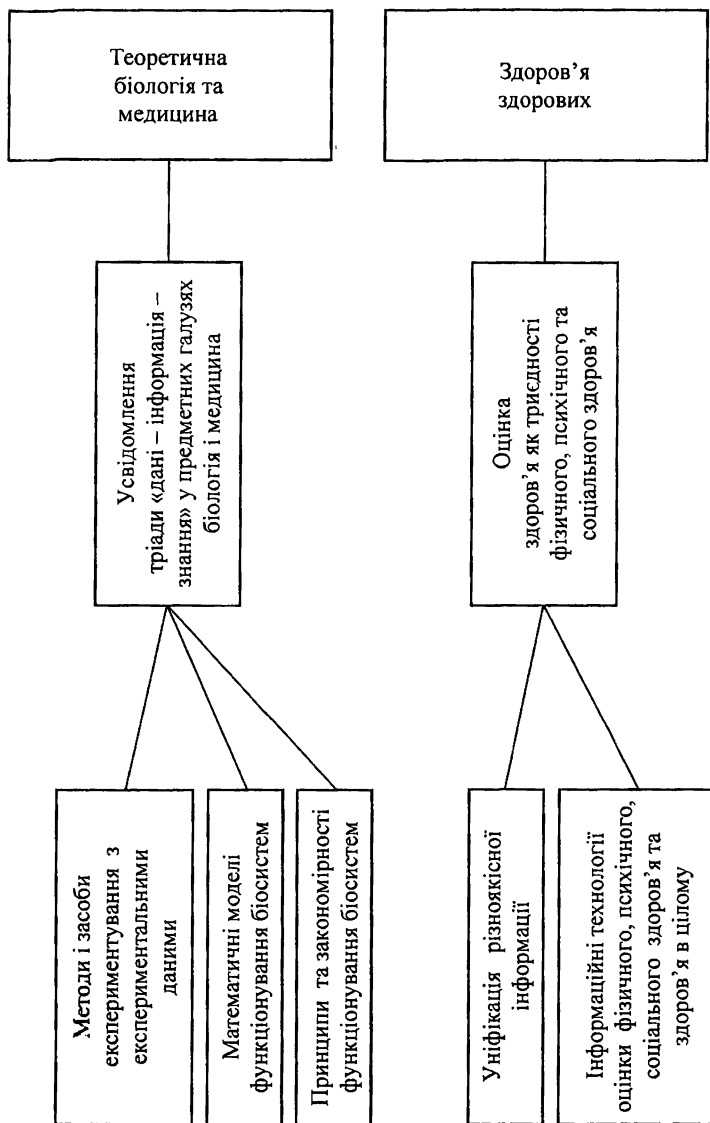


Рис. 1.7. Інформаційно-структурна модель прогнозу деяких напрямів інформа ГІС — госпітальна інформаційна система



інформаційних технологій у біології та медицині:

Наступний рівень ієрархії інформаційної моделі прогнозу конкретизує вищезгадані проблеми предметних галузей біологія та медицина, які є характерними для наукового напрямку інформаційні технології.

Розглянемо конспективно вирішення цих проблем, починаючи з проблем інформаційних технологій.

Розробка проблемно-орієнтованих поліалгоритмічних експертних систем постановки діагнозу, що базуються на колективному розумі (комп'ютерний консиліум). Відправною точкою вирішення цієї проблеми є наявність експертних систем постановки діагнозу як систем прийняття рішень лікарем. Відомо, що в експертних системах закладено кінцевий результат консиліуму лікарів і нема процесу одержання цього результату окремими лікарями, що беруть участь у консиліумі. Звідси випливає необхідність переходу до нового класу експертних систем — поліалгоритмічних експертних систем як систем з колективним розумом. Їх програмне забезпечення включає різноманітність алгоритмів постановки діагнозу різними лікарями. Поліалгоритмічна експертна система є своєрідний «комп'ютерний консиліум». Перехід від експертних систем до поліалгоритмічних потребує розробки інформаційних технологій послідовного вирішення завдань, представлених на рис. 1.7.

У поліалгоритмічних експертних системах закладається можливість «мозкової атаки» (постановки діагнозу) лікарями з різними типами інтелекту. Це дасть можливість лікарю аналізувати ситуацію не тільки на підставі своїх знань і власного алгоритму мислення, а й ознайомитися з аналізом тієї самої ситуації іншими лікарями.

Розробка бази знань біотехнічної системи керування рухами людини з метою оптимізації вибору керуючих дій. Відправною платформою вирішення цієї проблеми є декілька поколінь програмно-апаратних БТС, які треба забезпечити банком знань, що дає змогу оптимізувати організацію біологічно адекватного зовнішнього керування, тобто оптимізувати маршрути лікування. Перехід до такого класу БТС потребує послідовного вирішення завдань стосовно розробки структури функціонального наповнення бази знань (рис. 1.7). У розробці такого типу БТС керування рухами пріоритет належить Україні.

Розробка єдиного медико-інформаційного простору України. Нині рівень діагностики та лікування захворювань значною мірою визначається рівнем використання інформаційних технологій у вирішенні завдань діагностики та лікування. Під рівнем викорис-

тання інформаційних технологій у медицині маємо на увазі підвищення якості не лише медично-лікувальної апаратури та систем, а й інформатизації медичної галузі в цілому. Останнє може бути досягнуто за рахунок створення єдиного медико-інформаційного простору. Відправною точкою вирішення цієї проблеми є розроблена та науково обґрунтована концепція й архітектура єдиного медико-інформаційного простору як взаємопов'язаної ієрархічної мережі госпітальних інформаційних систем і базових інформаційних вузлів регіонального та державного рівнів. Завдання, які слід вирішити в першу чергу, представлені на рис. 1.7.

Останнім часом єдиний медико-інформаційний простір дістав нове звучання у зв'язку з розвитком телемедицини та дистанційної медичної освіти. Зрозуміло, що останні мають влитися в єдиний медико-інформаційний простір зі своїми специфічними завданнями. Безумовно, використання сучасних ІТ при інформатизації медичної галузі забезпечує найефективнішу передачу інформації на різні відстані, різного об'єму та змісту і дає змогу органічно поєднати можливості комп'ютерів і людини.

Розробка інформаційних технологій усвідомлення триади: дані—інформація—знання у предметних галузях *біологія та медицина*. Ця проблема спрямована на розробку теоретико-алгоритмічної інтелектуалізації процесу дослідження біологічних і медичних систем з метою одержання нового знання. Останнє потребує вирішення ряду завдань, представлених на рис. 1.7. Розробка алгоритмів аналізу одержаних фактів, алгоритмів методів дослідження, алгоритмів моделювання у вигляді усвідомлених знань і є кінцева мета вирішення цієї проблеми.

Розробка інформаційних технологій оцінки здоров'я здорових як триєдності фізичного, психічного та соціального здоров'я. Для вирішення цієї проблеми треба відштовхуватися від розробленої відкритої концепції здоров'я, що інтегрує фізичний, психічний та соціальний статуси здоров'я. Вирішення завдань, представлених на рис. 1.7, дасть змогу вербальному визначенню здоров'я надати кількісне значення — «індекс здоров'я». Підкреслимо, що саме кількісні показники важливі для моніторингу стану здоров'я.

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ПРОБЛЕМА

У цьому розділі розглянуто два узагальнюючих (концептуальних) методи вирішення будь-якої проблеми, а саме:

- метод інформаційно-структурного моделювання як структуроване представлення проблеми, що розглядається, з вербальним описом кожного блоку;
- метод інфотомування як засіб структурованого представлення системи, яка досліджується, шляхом просторової, ієрархічної структуризації та одержання диференційованого за рівнями ієрархії інформаційного знання, що не може бути одержано безпосередньо в експерименті.

Наведено приклади деяких інформаційно-структурних моделей та інфотомів.

1.2.1. Метод інформаційно-структурного моделювання

Насамперед відповімо на таке запитання: з чого слід починати вирішення особливо складних проблем? Починати треба з розробки концептуальних засад проблеми, що розглядається.

Звичайно під концепцією розуміють систему поглядів стосовно будь-якої проблеми, ситуації, об'єкта, а також шляхи вирішення проблеми. Система поглядів виражається вербальними формулюваннями, що описують різні сторони проблеми, яка розглядається. Слід зазначити, що опис проблеми практично завжди допускає структурування свого інформаційного змісту. Таким чином, під **концепцією проблеми** будемо розуміти інформаційно-структурну модель (ІСМ) поглядів, тобто структуроване представлення проблеми, що розглядається.

Практика вербального опису проблеми передбачає виокремлення та характеристики об'єктів, які складають проблему; предметів дослідження, що належать до об'єктів; методів, які належать до предметів; мету і завдання, що стосуються проблеми.

Проблеми можуть бути різної складності. Для вирішення проблеми малої складності достатньо побудувати ІСМ проблеми, для проблем, що потребують попереднього дослідження або дослідження у процесі її вирішення, треба розробити ІСМ дослідження проблеми (концептуальне дослідження проблеми), що має включати ІСМ різних інформаційних сфер:

- теоретичну сферу дослідження проблеми (ІСМ проблеми);
- практичну сторону вирішення проблеми (ІСМ вирішення проблеми);
- організаційну сферу вирішення та удосконалення вирішення проблеми (ІСМ організації рішення).

Для унаочнення наведемо структуру концепції дослідження проблеми (рис. 1.8). Розглянемо коротко зміст виокремлених блоків. **Блок «ІСМ проблеми»** містить аксіоматику проблеми: опис об'єкта дослідження, предмета дослідження, мети та завдань дослідження. У ньому подається теоретичний зміст проблеми. Для кожної проблеми цей блок наповнюється конкретним змістом. **Блок «ІСМ вирішення проблеми»** містить в собі три підблоки, що стосуються практичної реалізації вирішення проблеми. **Підблок «Методи»** містить опис алгоритмів, прийомів, програм, за допомогою яких вирішується проблема. **Підблок «Засоби»** характеризує інструментально-технічні, в тому числі й комп'ютерні пристрої, що збирають, переробляють інформацію, виробляють керуючі дії, приймають рішення тощо. **Підблок «Структура»** дає відомості про те, де та на якій базі буде вирішуватися ця проблема. **Блок «ІСМ організації вирішення проблеми»** складається з двох підблоків. **Підблок «Керування»** — це опис послідовності організаційних заходів вирішення проблеми, тобто усвідомлений алгоритм цих заходів. **Підблок «Технологія конструювання»** має відношення до майбутньої розробки систем вирішення проблеми.

Структурована таким чином інформація дає змогу структурно окреслити інформаційні блоки у теоретичній сфері, сфері практичного вирішення та сфері планово-організаційного керування вирішення проблеми. Представлення проблеми у цих сферах дає можливість достатньо повно усвідомити її та перейти надалі до моделювання та розробки систем, що її вирішують. Інакше кажучи, **ІСМ дослідження проблеми** — це системно усвідомлена проблема.

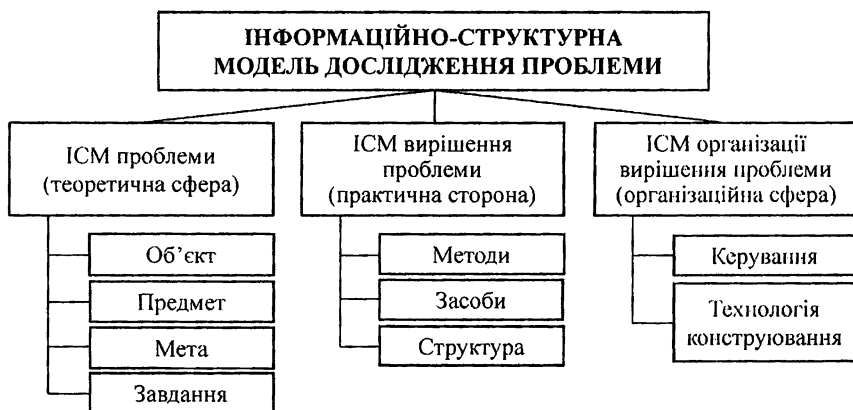


Рис. 1.8. Складові ІСМ дослідження проблеми

Зазначимо, що структура ІСМ дослідження проблеми є функція її складності, тобто структура проблеми може видозмінюватися та доповнюватися. Звідси стає зрозумілим, що таке метод інформаційно-структурного моделювання. Дамо його визначення. **Метод інформаційно-структурного моделювання** це:

- сукупність прийомів і правил структурування проблеми на різні інформаційні сфери та різноякісні інформаційні блоки, що допомагає усвідомити повноту проблеми та шляхи її вирішення;
- розшифровка інформаційного змісту структурних одиниць (блоків) кожної інформаційної сфери відповідно до конкретної проблеми.

Узагальнюючи вищезазначене, дамо визначення решті термінів.

ІСМ — блочно структурована інформація, що відображає різні якісні сторони проблеми.

Концепція проблеми — загальний опис проблеми (система поглядів) або її блочне подання (ІСМ проблеми).

Концепція дослідження проблеми — система поглядів на дослідження проблеми або сукупність ІСМ інформаційних сфер проблеми дослідження.

Концепція процесу дослідження проблеми — сукупність ІСМ, організованих в єдину систему, яка функціонує у часі.

Інформаційна сфера — сукупність інформаційних структурних одиниць (блоків), що належать до однієї інформаційної категорії (теорія, вирішення, організація вирішення).

Розглянемо **приклад** деяких інформаційно-структурних моделей дослідження конкретних проблем.

1. Одним із актуальних завдань у предметній галузі *офтальмології* є вирішення проблеми: що таке нормальне око. Вирішення її можливе методом порівняльного аналізу структурно-функціональної організації еметропічного (нормального), міопічного (короткозорого) та гіперметричного (далекозорого) очей. Схематично око можна представити у такому вигляді (рис. 1.9).

Структурні параметри, що піддаються вимірюванню:

діаметр рогівки — $D_{\text{іам}}$, мм;
глибина передньої камери — ACD , мм;
товщина кришталика — $LENS$, мм;
передньо-задній відрізок — $PЗВ$, мм.

Функціональні параметри, що піддаються вимірюванню:

статична рефракція — RS ;
динамічна рефракція — Din ;
резерв акомодатії — PA ;
відносний об'єм акомодатії — BOA .

Усі функціональні параметри вимірюються у діоптріях. Під рефракцією розуміють здатність ока до заломлювання світла, а під акомодатією — зміну фокусної відстані кришталика.

Отже, проблема може бути сформульована таким чином: роль структурно-функціональної організації ока у рефрактогенезі. ІСМ дослідження цієї проблеми подано на рис. 1.10.

Структура цієї моделі складається з окремих двох блоків: теоретична сфера та практична сторона вирішення проблеми. Підблоки теоретичної сфери наповнені конкретним змістом аксіоматики даної проблеми (наведені визначення об'єкта, предмета, мети та завдань дослідження). Підблок практичної сфери у даному випадку стосується засобів експериментального дослідження та методів теоретичного аналізу. Інструментальні методики поділені на методики

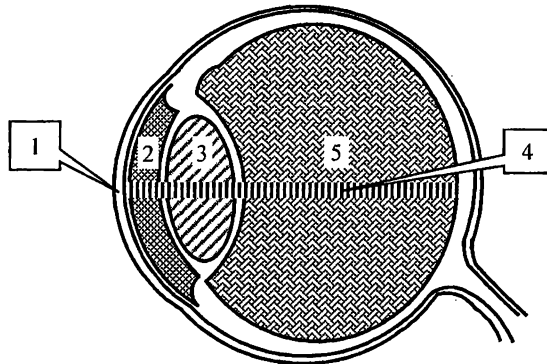


Рис. 1.9. Схематична будова ока людини:

1 — рогівка; 2 — передня камера; 3 — кришталик; 4 — передньо-задній відрізок; 5 — задня камера

вимірювання структурних параметрів ока та функціональних властивостей. До методів теоретичного аналізу включені:

- гістограмний аналіз, який потрібен для складання судження про організацію окремого параметра за вибраного масштабу шкалювання. Він дає змогу порівнювати розподіл різних параметрів ока та визначати складність організації параметрів;

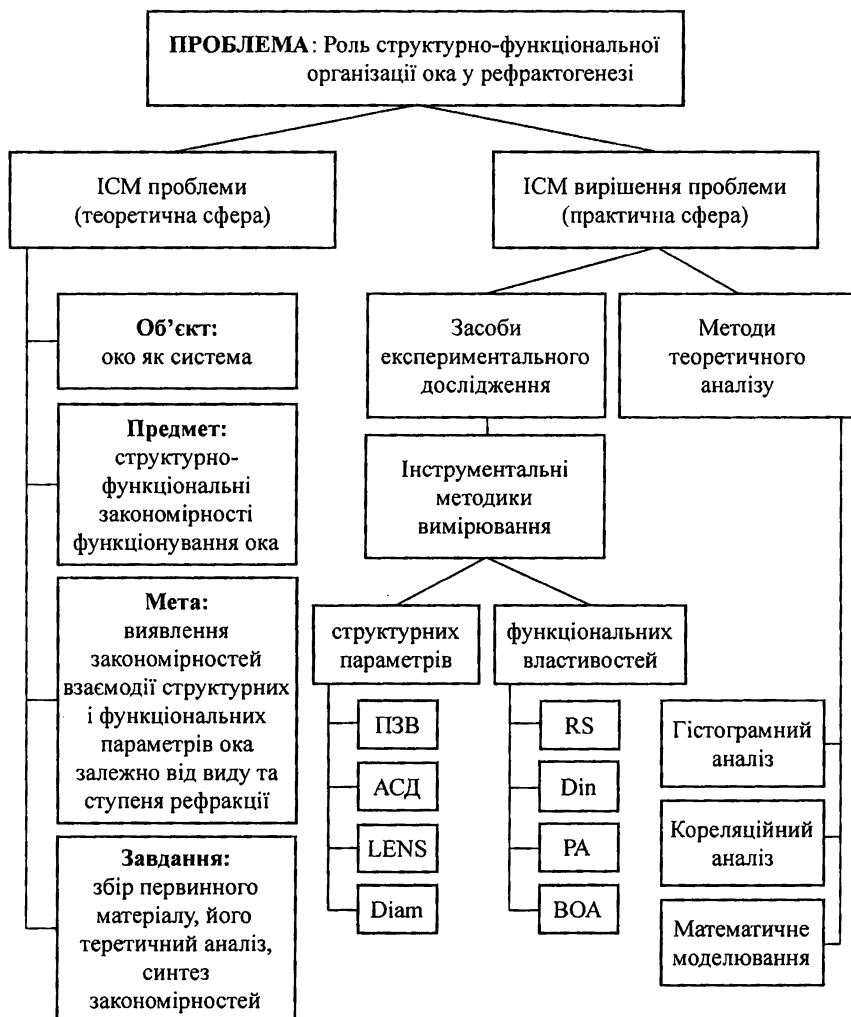


Рис. 1.10. ICM дослідження проблеми у предметній галузі офтальмологія

- кореляційний аналіз як необхідність дослідження взаємозв'язку структурних і функціональних параметрів. За допомогою коефіцієнтів парної кореляції можна обчислювати кількісні вирази лінійного взаємозв'язку між параметрами та побудувати регресійні моделі за наявності такого зв'язку;

- математичне моделювання, яке необхідне для вивчення динаміки (у цьому разі вікової) параметрів, що розглядаються.

2. *ІСМ єдиного інформаційного простору як проблема.* Однією із найвагоміших умов побудови єдиного інформаційного простору України є створення його сучасної інфраструктури. Остання передбачає необхідність формування єдиної технічної, технологічної та організаційної політики, що неможливо без системного погляду на проблему побудови єдиного інформаційного простору. Першим кроком в усвідомленні будь-якої проблеми є структуризація інформаційного поля знань, тобто створення ІСМ проблеми.

На рис. 1.11 подано ІСМ єдиного інформаційного простору як проблеми. Структуруючи інформаційне поле знань цієї проблеми, можна виокремити два основних блоки:

- інформаційний ресурс;
- організація та інтеграція інформаційного ресурсу.

Виокремлення цих блоків зумовлене необхідністю усвідомлення накопиченого інформаційного поля різноманітних знань та інтеграції їх в єдиний інформаційний простір.

Розглянемо детальніше блок *Інформаційний ресурс*. Його можна поділити на два підблоки:

- інформаційне поле знань з предметних галузей культури як синонім цивілізації;
- інформаційне поле знань з проблем і мети орієнтації інформації.

Інформаційне поле знань з предметних галузей культури — це, по суті, знання, накопичені людством упродовж становлення цивілізації. Структуризація такого колосального поля знань є достатньо складним науково-методологічним і науково-методичним завданням, що потребує перш за все розробки критеріїв структуризації. У даному випадку як критерій структуризації використано класифікацію наук. Таким чином, складовими підблоку *Інформаційне поле знань з предметних галузей* виступають конкретні назви наук, наприклад, біологія, медицина, економіка та інші з їх інформаційними полями знань (рис. 1.11). Згідно з рис. 1.11, критерієм структуризації усередині наук є поділ за розділами. Зазначимо, що ці критерії не є жорстко детермінованими, а являють собою один із прикладів структуризації інформаційного поля знань за предметними галузями.

Виокремлення підблоку *Інформаційне поле знань з проблем та мети орієнтації інформації* обумовлено необхідністю інтеграції інформаційного ресурсу, що є адекватною до потреб людини, суспільства та держави. Саме корпоративна структуризація інформаційного поля знань з точки зору потреб людини, суспільства та держави в інформації забезпечує ефективність пошуку необхідної інформації. Відповідно до зазначеного вище стає зрозумілим виокремлення таких складових цього підблоку (рис. 1.11):

- людина та суспільство;
- держава: законодавча, виконавча, судова влада та засоби масової інформації.

Структурний елемент складової «Людина» та суспільство (рис. 1.11) відображають основні потреби людини у здоров'ї, інтелектуальному й духовному розвитку, соціальному захисті, забезпеченні її прав і свобод, екологічності навколишнього середовища.

Структурний елемент складової «Держава» з її гілками влади відображає основні обов'язки держави перед людиною та суспільством (рис. 1.11).

Розглянемо другий основний блок ІСМ — *Організація та інтеграція інформаційного ресурсу*, що складається з трьох підблоків (рис. 1.11):

- Проблемно орієнтовані інформаційні простори (ПОІП);
- Центри інформаційно-аналітичної підтримки (ЦІАП);
- Інформаційно-технологічна база єдиного інформаційного простору.

Головною ідеєю виокремлення підблоків є необхідність:

- орієнтації інформації за проблемою та метою (перший підблок);
- оптимізації організації інформаційного ресурсу для вироблення збалансованих рішень та ефективності управління (другий підблок);
- детального розгляду інформаційно-технологічної бази організації кожного проблемно орієнтованого простору та їх інтеграції (третій підблок).

Призначення підблоку ПОІП — виокремити із загального інформаційного ресурсу корпоративну інформацію за предметом, проблемою, метою та організувати її в інформаційне середовище, що передбачає створення розподіленої інфраструктури доступу та швидкого пошуку необхідної інформації фізичними та (або) юридичними особами. Кожний ПОІП — це свого роду організація предметної класифікації та вербального кодування інформації за відповідною проблемою та метою. Вербальне кодування розшифровано у назвах ПОІП. На рис. 1.11 подані такі ПОІПи:

- єдиний медико-інформаційний простір (ЄМІП);
- єдиний інформаційний простір освіти та науки (ЄІП ОН);
- єдиний інформаційний простір соціального захисту (ЄІП СЗ);
- єдиний інформаційний простір культури (ЄІП К);
- єдиний інформаційно-екологічний простір (ЄІЕП);
- єдиний фінансово-економічний інформаційний простір (ЄФЕІП);
- єдиний інформаційний простір правоохоронних органів (ЄІП ПО);
- єдиний інформаційний простір силових структур (ЄІП СС);
- єдиний інформаційний простір промислового сектору (ЄІП ПС);
- єдиний інформаційний простір аграрного сектору (ЄІП АС);
- єдиний інформаційний простір зовнішньої політики (ЄІП ЗП);
- єдиний інформаційний простір засобів масової інформації (ЄІП ЗМІ);
- єдиний інформаційний простір законотворення (ЄІП З).

Зазначимо, що розглянутий перелік ПОІПів достатньо повно відображає потреби в інформації людини, суспільства та різних державних структур.

Призначення другого підблоку ЦІАП (рис. 1.11) — концентрація, інтеграція, аналіз і навігація відповідної інформації. Виокремлення цього підблоку обумовлено необхідністю швидкого пошуку інформації для ефективного прийняття управлінських рішень адміністративним апаратом регіонального та державного рівнів.

Організація інтеграції інформаційного ресурсу як усередині кожного ПОІПу, так й інтеграція ПОІПів у єдиний інформаційний простір може бути здійснена лише за наявності відповідної інформаційно технологічної бази (третій підблок). Необхідними складовими цієї бази будемо вважати такі (рис. 1.11):

- інформаційно-довідкові системи (ІДС);
- інформаційно-аналітичні системи (ІАС);
- інформаційно-консультаційні системи (ІКС);
- інтелектуальні інформаційні технології (ІІТ);
- комп'ютерно-телекомунікаційне середовище (КТКС).

Таким чином, розглянута інформаційно-структурна модель (рис. 1.11) дає уявлення про проблему Єдиного інформаційного простору в цілому. Вона відображає стратегію побудови єдиного інформаційного простору України та є свого роду загальним «ве-втором» інтеграції.

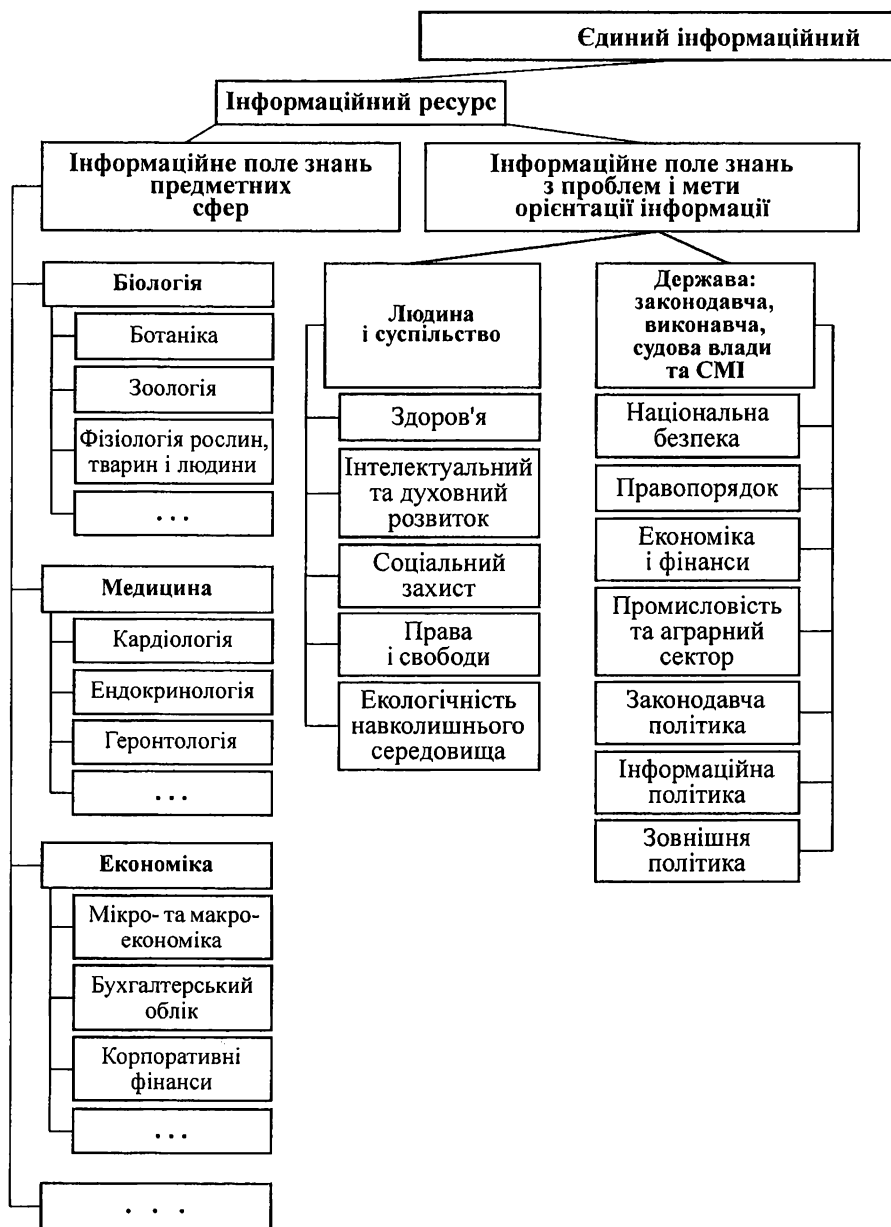
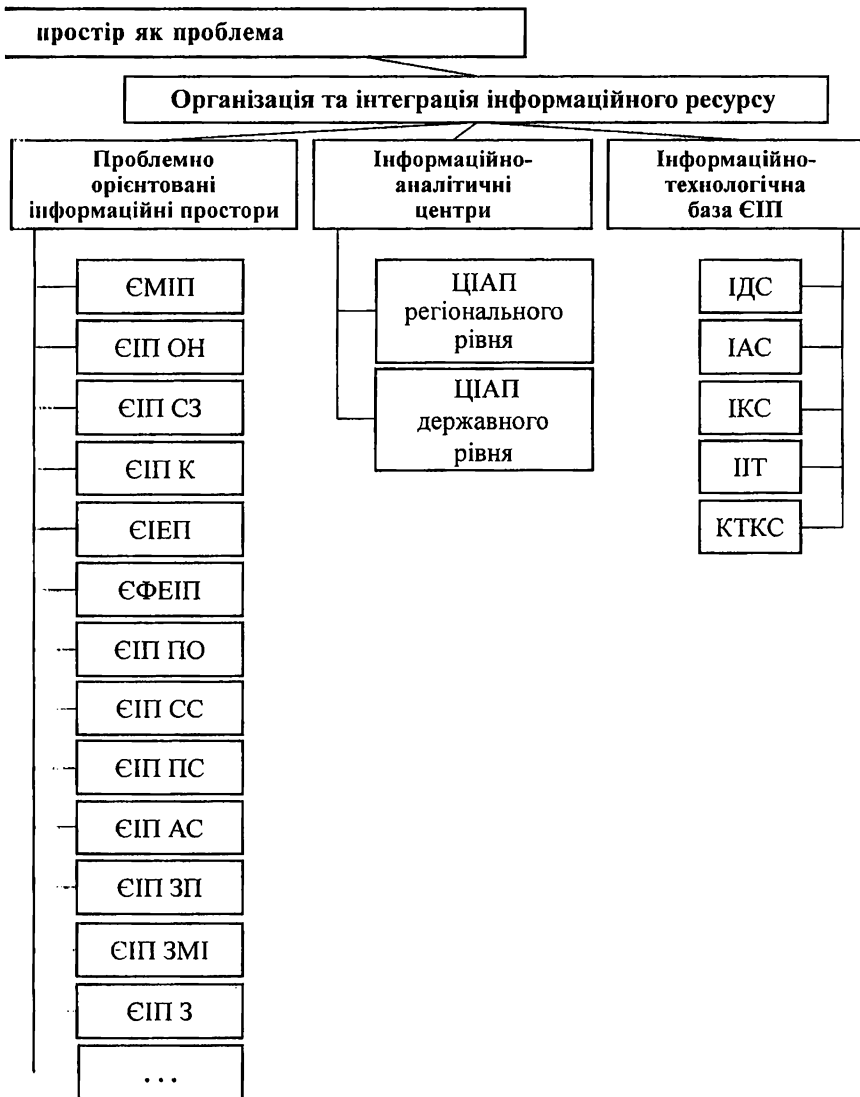


Рис. 1.11. Інформаційно-структурна модель єдиного інформаційного простору
Розшифровку скорочень див. у тексті



як проблема.

1.2.2. Метод інфотомування

Інфотомування — це одержання інформаційного знання про пошарову структурну організацію об'єкта дослідження. В багатьох випадках інформаційне знання в складних ієрархічно організованих системах не завжди можна одержати шляхом прямого вимірювання показників. Для біологічних систем показники їх функціонування дають лише фактографічне знання — поле натурних вимірювань, де кожний показник має свою розмірність, свої межі зміни. Взагалі це первинний інформаційний масив. Звісно, і цей масив дає уявлення про функціонування об'єкта та є необхідним для одержання нового інформаційного знання. Метод інфотомування, спираючись на поле натурних вимірювань, дає змогу одержати нове, уніфіковане, диференційно-інтегроване, вербально-кількісне інформаційне знання у вигляді піраміди оцінок стану показників, відділів ієрархічних рівнів та об'єкта в цілому. Таким чином, **метод інфотомування** можна розглядати як метод структурованого інформаційного представлення ієрархічної організації біооб'єкта дослідження, що включає диференційно-інтегральний, вербально-кількісний опис стану ієрархічних рівнів і системи в цілому.

Дамо ряд основних **визначень**, що стосуються цього методу.

Інформаційні показники — натурні показники, перетворені відповідно до положення натурального показника на шкалі його зміни в нормовану, уніфіковану, відносну форму, яка дає можливість одержати інформаційну оцінку стану системи за цим показником.

Рівні ієрархії — рівні пошарового структурного розчленовування системи, що досліджується, на рівні підсистем, компонент підсистем, складових компонент і т. д. до базового рівня натурних показників.

Інформаційний блок — інформаційно-структурна одиниця, що об'єднує на нижньому рівні ієрархії сукупність інформаційних показників, на наступному рівні ієрархії — сукупність системних функцій інформаційних блоків нижчого рівня ієрархії і т. д.

Системна функція в інформаційному сенсі — це інформаційно-оцінна величина, що характеризує стан інформаційного блоку.

Інформаційне знання — знання, одержане в результаті експериментування з полем натурних показників, тобто інформаційні показники, знання про стан ієрархічно організованих інформаційних блоків та системи в цілому, яке неможливо одержати шляхом безпосереднього вимірювання.

Інформаційна модель — інформаційне знання у формульному та (або) алгоритмічному вигляді.

Інфотом — структуроване представлення досліджуваної системи та піраміда інформаційних показників і системних функцій, що відображають стан пошарової структурної організації досліджуваної системи.

Правила синтезу структури інфотому. Відомо, що біологічні системи мають складне внутрішнє структурування. Наприклад, ієрархічна організація внутрішньої сфери організму має такі рівні ієрархії:

- внутрішня сфера;
- фізіологічні системи;
- органи, що входять до системи;
- клітини, що формують органи, тощо.

Звичайно кожен ієрархічний рівень містить сукупність органів або підсистем, що взаємозв'язано взаємодіють за допомогою, наприклад, кровоносної системи. Кожний орган — це природна структурна одиниця. Органи зі своїми системними функціями входять у вищий рівень ієрархії і утворюють нову систему (у даному випадку фізіологічну). Синтез структури інфотому може базуватися на природній ієрархічній структуризації біологічної системи. Таким чином, природне структурування біосистем може виступати як одне із **правил синтезу структури інфотому**.

Цілком допустимо створювати скелет інфотому **евристичним** шляхом. В основу евристик синтезу структури інфотому можуть бути покладені різні гіпотези, що абстрагуються від реальної ситуації та дають змогу об'єднати в інформаційні блоки різні інформаційні показники, які стосуються, наприклад, єдиного механізму функціонування, єдиної властивості, статички чи динаміки функціонування підсистем і т. п. На рис. 1.12 представлено інформаційну схему правил синтезу структури інфотому.

Евристичний шлях синтезу його структури передбачає *поліваріантність правил*, що залежать від мети та завдань дослідження. Таким чином, для однієї й тієї самої біосистеми можна побудувати інфотому різної



Рис. 1.12. Інформаційна схема правил синтезу

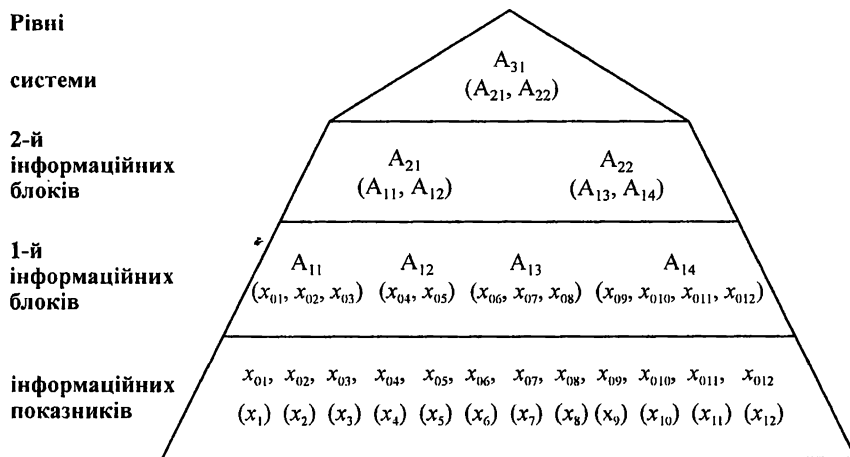


Рис. 1.13. Формальна схема інфотому:

$x_1 \div x_{12}$ — натурні показники

структури, глибини та вербальної інтерпретації, що дає можливість одержати для одного й того ж первинного масиву різноякісне нове знання.

Як приклад представимо інфотом у вигляді піраміди оцінок стану (рис. 1.13). Зрозуміло, що A_{31} — це оцінка стану цілісної системи, яка базується на оцінках інформаційних блоків 2-го рівня — A_{21} та A_{22} , які, в свою чергу, будуються на оцінках інформаційних блоків 1-го рівня відповідно: A_{11} та A_{12} формують оцінку A_{21} , а A_{13} та A_{14} — оцінку A_{22} . Оцінки інформаційних блоків 1-го рівня формуються на відповідних значеннях інформаційних показників:

$$A_{11} = f(x_{01}, x_{02}, x_{03}); A_{12} = f(x_{04}, x_{05});$$

$$A_{13} = f(x_{06}, x_{07}, x_{08}); A_{14} = f(x_{09}, x_{010}, x_{011}, x_{012}).$$

Інформаційні показники відповідно до їх визначення — це натурні показники, перетворені в нормовану, уніфіковану, відносну форму.

Наведений приклад ілюструє інфотомування як спосіб одержання диференційованого за рівнями ієрархії інформаційного знання, що не може бути одержане безпосередньо в експерименті. Зрозуміло також, що інфотом може мати різну глибину, тобто різне число рівнів ієрархії та різні варіанти побудови оцінок стану.

Якщо підніматися від інформаційних показників угору, то будемо одержувати все більш інтегроване узагальнене знання

про систему, що досліджується. В цьому випадку маємо справу з конвергенцією інформації. Якщо спускатися вниз з вершини піраміди, то знання буде все диференційованішим, тобто маємо справу з дивергенцією інформації.

Для повноти знань про те, що таке метод інфотомування недостатньо знати лише правила синтезу структури інфотому. Потрібні також знання правил синтезу оцінок стану інформаційних блоків та перетворення натурних показників на інформаційні. Ці правила розглядаються у наступному розділі.

Приклад синтезу структури інфотому. Розглянемо структуру інфотому системи зовнішнього дихання. Зазначимо, що для синтезу структури інфотому цієї системи використовується комплексне правило, що враховує як природну ієрархію системи зовнішнього дихання, так і правила евристики.

Для синтезу структури інфотому системи зовнішнього дихання звернімося до первинного масиву натурних показників. Звичайно інформативними показниками для діагностики є:

- ЖЕЛ — життєва ємність легенів, л;
- ФЖЕЛ — форсована життєва ємність легенів, л;
- ОФВ1/ФЖЕЛ — об'єм форсованого видиху за першу секунду до ФЖЕЛ, %;
- ПОШ — пікова об'ємна швидкість видиху, л/с;
- МОШ25 — максимальна об'ємна швидкість видиху на рівні 25 %, л/с;
- МОШ50 — максимальна об'ємна швидкість видиху на рівні 50 %, л/с;
- МОШ75 — максимальна об'ємна швидкість видиху на рівні 75 %, л/с;
- СОШ25—75 — середня об'ємна швидкість видиху в інтервалі 25—79 %, л/с;
- СОШ75—85 — середня об'ємна швидкість видиху в інтервалі 75—85 %, л/с;

Слід зазначити, що наведені вище натурні показники відображають різні боки функціонування системи зовнішнього дихання, а саме:

- структурні параметри легенів у цілому характеризуються показниками ЖЕЛ і ФЖЕЛ;
- функціональний стан легенів — показниками ОФВ1/ФЖЕЛ і ПОШ;
- функціональний стан бронхів — такими показниками: великих бронхів — МОШ25; середніх бронхів — МОШ50 і СОШ25—75; малих бронхів — МОШ75 і СОШ75—85.

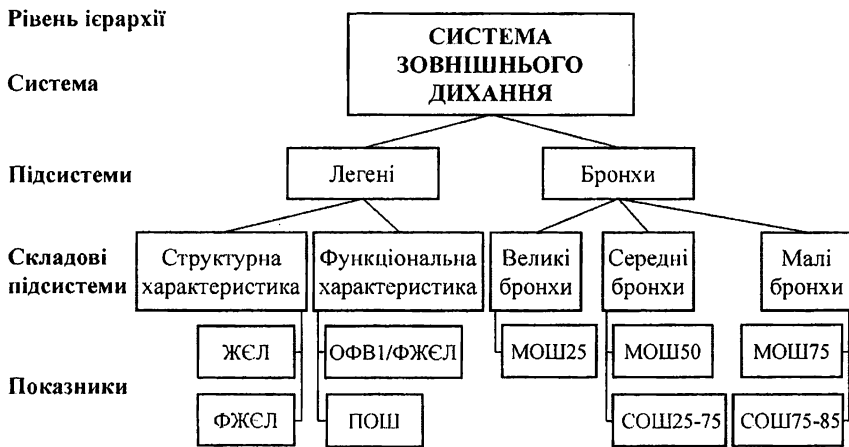


Рис. 1.14. Структура інфотому

Такий якісний поділ показників може бути покладено в основу синтезу структури інфотому системи зовнішнього дихання, тобто він визначає рівні пошарового структурного поділу системи. Отже, рівнями ієрархії в цьому випадку формально виступають рівні системи, підсистем, складових підсистем, показників. Тоді структуру інфотому можна відобразити у вигляді ієрархічного дерева з принаймні чотирма рівнями ієрархії. На рис. 1.14 представлено структуру інфотому системи зовнішнього дихання, нижній рівень ієрархії якого утворюють вимірювані показники, другий рівень — складові підсистем: інформаційні блоки структурних і функціональних характеристик підсистеми легенів і структурні складові підсистеми бронхів — бронхи різних розмірів (великі, середні, малі); третій рівень — підсистеми: легені та бронхи і верхній (четвертий) рівень — система дихання в цілому.

Таким чином, алгоритм пошарової структурної організації інфотому системи зовнішнього дихання будується за правилом інтегро-диференційної розбивки: система зовнішнього дихання — на природні структурні підсистеми; підсистеми — на складові, які характеризують стан структури і функції підсистем; складові — на показники. У цьому випадку для синтезу структури інфотому використовувалось природне структурування системи зовнішнього дихання та евристичний шлях. Якщо на структуру інфотому накласти значення інформаційних показників та оцінки стану виділених блоків, отримаємо інформаційний портрет стану системи зовнішнього дихання людини.

УСВІДОМЛЕННЯ ПЕРВИННОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО МАСИВУ

Виходячи з головної ідеї інформаційних технологій — усвідомлення тріади «дані—інформація— знання», першим кроком є усвідомлення експериментальних даних з метою одержання інформації про об'єкт дослідження. Біологічний експеримент з точки зору аналізу його результатів дає досліднику достатній простір для вибору методу. Останній залежить від постановки, проведення і мети експерименту та від рівня знань про функціонування біосистеми, що досліджується.

Далі розглядається ряд методів аналізу первинних інформаційних масивів.

1.3.1. Табличне представлення даних як функція задачі

Розглянемо, як можна по-різному проаналізувати і представити результати одного й того ж експерименту, так би мовити, методи експериментування з первинним інформаційним масивом. Для конкретності звернімося до такого абстрактного експерименту. На тваринах досліджується зміна рівня цукру в крові за умови введення всім тваринам однакової дози глюкози. Вважатимемо, що у партії десять експериментальних тварин. Слід зазначити, що для біологічного експерименту кожне значення показника, що досліджується, — це середнє значення, одержане в результаті багаторазового проведення одного й того самого експерименту з однією й тією ж біосистемою або одного й того ж експерименту на сукупності біосистем. До введення глюкози у кожної тварини визначається рівень цукру в крові, тобто норма. У заздалегідь вибрані дискретні моменти часу, наприклад, кожні 10 хв упродовж години у тварин ви-

мірюють рівень цукру в крові. Тоді первинний інформаційний масив містить абсолютні значення норми та абсолютні значення рівня цукру крові кожної тварини у фіксовані моменти часу (табл. 1.2). На основі цього масиву даних можна розв'язати ряд задач з відповідною модифікацією представлення первинних даних, тобто кожна задача потребує створення відповідної таблиці даних. Розглянемо деякі з них.

Завдання: вивчити динаміку рівня цукру в крові після введення дози глюкози. Для вирішення цього завдання треба знати значення рівня цукру в крові понад норму в фіксовані моменти часу. Їх можна одержати з первинного інформаційного масиву шляхом віднімання від абсолютних значень рівня цукру в крові в фіксовані моменти часу відповідного значення норми для кожної тварини:

$$y_{ij} = x_{ij} - x''_j; \quad (i = 1 \div 10, \quad j = 1 \div 6). \quad (1.3.1)$$

Дані y_{ij} наведені у табл. 1.3. Кожний стовпчик таблиці являє собою статистичний ряд незалежних величин, до якого можна застосувати статистичну обробку з визначенням середнього рівня цукру

Таблиця 1.2. Первинний інформаційний масив

Номер тварини	Норма	Час, хв					
		10	20	30	40	50	60
		Рівень цукру в крові (x_j), мг%					
		$i = 1 \div 10; j = 1 \div 6$					
1	x''_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}
2	x''_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}
3	x''_3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}
4	x''_4	x_{41}	x_{42}	x_{43}	x_{44}	x_{45}	x_{46}
5	x''_5	x_{51}	x_{52}	x_{53}	x_{54}	x_{55}	x_{56}
6	x''_6	x_{61}	x_{62}	x_{63}	x_{64}	x_{65}	x_{66}
7	x''_7	x_{71}	x_{72}	x_{73}	x_{74}	x_{75}	x_{76}
8	x''_8	x_{81}	x_{82}	x_{83}	x_{84}	x_{85}	x_{86}
9	x''_9	x_{91}	x_{92}	x_{93}	x_{94}	x_{95}	x_{96}
10	x''_{10}	x_{101}	x_{102}	x_{103}	x_{104}	x_{105}	x_{106}

Таблиця 1.3. Показники рівня цукру, що перевищують норму (y_{ij}), мг%

Номер тварини	Час, хв					
	10	20	30	40	50	60
1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}
2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}	y_{25}	y_{26}
3	y_{31}	y_{32}	y_{33}	y_{34}	y_{35}	y_{36}
4	y_{41}	y_{42}	y_{43}	y_{44}	y_{45}	y_{46}
5	y_{51}	y_{52}	y_{53}	y_{54}	y_{55}	y_{56}
6	y_{61}	y_{62}	y_{63}	y_{64}	y_{65}	y_{66}
7	y_{71}	y_{72}	y_{73}	y_{74}	y_{75}	y_{76}
8	y_{81}	y_{82}	y_{83}	y_{84}	y_{85}	y_{86}
9	y_{91}	y_{92}	y_{93}	y_{94}	y_{95}	y_{96}
10	y_{101}	y_{102}	y_{103}	y_{104}	y_{105}	y_{106}
Середнє значення $\bar{y}_j$	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	$\bar{y}_3$	$\bar{y}_4$	$\bar{y}_5$	$\bar{y}_6$

в крові ($\bar{y}$) у всіх тварин для кожного фіксованого моменту часу. За цими значеннями можна аналізувати зміну показника у часі:

$$\bar{y} = f(t). \quad (1.3.2)$$

Завдання: визначити максимальний відсоток тварин, у яких одночасно показник рівня цукру крові перевищував, наприклад, на 20 % норму, і часовий інтервал, в якому це відбулося. Для цього, використовуючи первинний інформаційний масив, треба побудувати таблицю почасового розподілу числа тварин, у яких рівень цукру в крові на 20 % перевищував норму. Нехай це буде розподіл, представлений у табл. 1.4. За її даними розраховується відсоток на кожний момент часу ($n\%$), який дорівнює 40 % і спостерігається у другому та третьому часових інтервалах. Якщо максимальний відсоток зіставити з дозою глюкози (d), то за наявності експериментів з різними дозами можна проаналізувати таку залежність:

$$(n\%)_{\max} = f(d). \quad (1.3.3)$$

Дані табл. 1.4 дають змогу також одержати *середнє число тварин* ($\bar{n}$), у яких рівень цукру на 20 % перевищує норму для будь-якого часового інтервалу:

$$\bar{n} = \frac{\sum_{j=1}^6 n_j}{6} \approx 3 \text{ (тварини)}.$$

Як і в попередньому випадку, за наявності експериментів з різними дозами можна проаналізувати залежність

$$\bar{n} = f(d). \quad (1.3.4)$$

Слід зазначити, що для одержання достовірніших даних при аналізі залежностей (1.3.3) та (1.3.4) необхідне багаторазове проведення експерименту з кожною дозою. Це дасть змогу для кожного фіксованого моменту часу одержати статистичні ряди, за допомогою яких можна буде розрахувати середні значення числа тварин, у яких рівень цукру в крові перевищує нормальний показник, наприклад, на 20 %. Такий експеримент значно підвищить достовірність одержаних результатів.

Завдання: визначити сумарне число тварин у партії, у яких за час експерименту рівень цукру в крові на 20 % перевищував норму. Для вирішення цього завдання треба пронумерувати тварин і в таблицю заносити не тільки число тварин, у яких у фіксований момент часу рівень цукру в крові перевищив норму на 20 %, а й їх номери. Тоді для визначення сумарного числа тварин, у яких на кожний наступний фіксований момент часу рівень цукру в крові на 20 % перевищував норму, треба до числа тварин попереднього часового інтервалу додавати лише нових за номером тварин, тобто побудувати таблицю деталізованого стосовно табл. 1.4 почасового розподілу тварин. Нехай це буде, наприклад, розподіл, представлений у табл. 1.5. Згідно з її даними за весь час експерименту у 7 тварин рівень цукру в крові на 20 % перевищував норму.

Таблиця 1.4. Почасовий розподіл числа тварин

Час, хв	10	20	30	40	50	60
Число тварин (n)	2	4	4	3	1	0

Таблиця 1.5. Деталізований почасовий розподіл тварин

Час, хв	10	20	30	40	50	60
Номер тварини	2,5	1, 2, 5, 9	1, 5, 7, 9	4, 6, 7	6	—
Число тварин	2	2 + 2 = 4	4 - 1 + 1 = 4	4 - 3 + 2 = 3	3 - 2 = 1	0
Сумарне число тварин	2	4 (2 + 2)	5 (4 + 1)	7 (5 + 2)	7 (7 + 0)	7 (7 + 0)

Таблиця 1.6. Дискретне представлення даних

Номер тварини	Час, хв						Число часових інтервалів
	10	20	30	40	50	60	
1	0	1	1	0	0	0	2
2	1	1	0	0	0	0	2
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	1
5	1	1	1	0	0	0	3
6	0	0	0	1	1	0	2
7	0	0	1	1	0	0	2
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	1	0	0	0	2
10	0	0	0	0	0	0	0

Така модифікація первинного інформаційного масиву за наявності необхідного експерименту дає змогу вирішити завдання пошуку максимально можливої дози глюкози, за якої рівень цукру в крові жодної із тварин не перевищить нормальний рівень, або мінімальної дози глюкози, за якої рівень цукру у крові усіх тварин перевищить нормальний рівень.

Використавши перший рядок табл. 1.5, можна представити експериментальні дані по-іншому (табл. 1.6). Одиниця у табл. 1.6 означає, що у даної тварини у відповідний фіксований момент часу рівень цукру в крові перевищував норму на 20 %. Таке представлення експериментальних даних дає змогу поставити та вирішити *завдання визначення середньої тривалості перевищення рівня цукру в крові на 20 % відносно норми у будь-якої тварини*. Для цього використовується останній стовпчик табл. 1.6, який можна розглядати як статистичний ряд випадкових величин. Це означає, що для даного ряду можна знайти середнє значення, дисперсію, довірчі інтервали та ін. У подальшому обчислена середня тривалість може бути розглянута як функція дози глюкози.

Таким чином, різні способи представлення і обробки одного й того ж первинного інформаційного масиву дають можливість проєкти якісний аналіз системи, що досліджується, тобто усвідомити дані експерименту з метою одержання нової інформації.

1.3.2. Методи селекції первинного масиву даних експерименту

Методи селекції за ознакою однорідності. Експериментально досліджуючи біосистеми, як правило, підбирають однорідну групу тварин. Це дає змогу оперувати результатами експерименту як однорідним матеріалом. Проте можливі випадки, коли ознака однорідності порушується. Така ситуація характерна для клінічної медицини, коли проводиться спостереження за групою хворих. Тоді ознакою, що об'єднує людей, може бути інший показник, наприклад, одна й та сама хвороба. В останньому випадку група людей буде однорідною за хворобою, проте різномірною, наприклад, за віком, статтю, масою тіла, характером та іншими ознаками. В цьому разі інформаційний масив, що визначає показники, за якими роблять висновок про хворобу (наприклад, температура), перед статистичною обробкою доцільно розчленувати на підмасиви за будь-якою допоміжною ознакою. Таке розчленування можна провести двома способами.

Розглянемо перший з них. Нехай, наприклад, групі людей з однаковою хворобою, яка приймає однаковий комплекс лікувальних процедур, вимірюють температуру в один і той самий час упродовж певного періоду. Якщо серед одержаного таким чином інформаційного масиву є дані, що характеризуються різною якістю (наприклад, в один і той самий час в однієї групи людей температура підвищувалась, а в іншій знижувалась), то цю якість можна покласти в основу поділу на підмасиви. Кожен підмасив у такому разі буде одноріднішим, тому що враховує дві ознаки: хворобу та характер динаміки показника. Способи представлення та обробки даних пов'язані із завданнями дослідження.

Другий спосіб поділу на підмасиви пов'язаний не з аналізом даних інформаційного масиву, а з аналізом групи, на якій одержано цей масив. Так, групу хворих можна поділити на підгрупи за віком, статтю, масою тіла та іншими ознаками. В цьому разі інформаційні підмасиви можуть бути множинами, що перетинаються як за значеннями показника, так і за характером динаміки.

Взагалі, досліджуючи патологію та лікування, можна вважати, що в зміні патогенетичного показника відображаються усі можливі причини захворювання. В зв'язку з цим спосіб поділу інформаційного масиву на підмасиви за рівнем або характером динаміки показника можна вважати більш доцільним та перспективним. Насправді, цей спосіб змушує дослідника шукати причини однорідної поведінки показника і тим самим глибше розкривати етіологію патології та специфіку лікування.

Зауважимо, що будь-який спосіб попереднього розподілу інформаційного масиву, який підвищує його однорідність, дає змогу одержати в результаті статистичної обробки достовірніші результати.

Метод селекції за принципом єдності структури та функції розглянемо на прикладі вирішення завдання з токсикології з прогнозування токсичності хімічних речовин.

Постановка завдання. Одним із найважливіших завдань токсикології є визначення можливої токсичності речовин, що синтезуються, без проведення спеціальних експериментів на тваринах за тими чи іншими фізико-хімічними властивостями. За вихідну властивість речовини згідно з принципом структурно-функціональної єдності доцільно взяти принаймні один структурний та один функціональний показник цих властивостей. Оберемо за структурний показник молекулярну масу (ММ), а за функціональний — розчинність у воді (РВ). Зазначимо, що ці показники достатньо легко визначаються.

Сформулюємо постановку завдання: треба розробити методику, алгоритми та математичні моделі прогнозу токсичності фосфорорганічних сполук (ФОС), що широко застосовуються у сільському господарстві та промисловості.

Вихідний інформаційний масив. Відповідно до постановки завдання та обраних незалежних змінних (ММ та РВ) інформаційний масив склали кількісно-якісні дані з незалежних змінних та величини шкірно-резорбтивної токсичності (ШРТ) в одиницях LD_{50} (половина експериментальної летальної дози) для 21 фосфорорганічної сполуки. Розкиданість ММ становила 200—450; розчинність коливалася у широких межах: від 0 до 5000 мг/л. Зазначимо, що не для всіх речовин РВ мало цифровий вираз. Тому для погано розчинних та нерозчинних ФОС значення РВ приймались рівним нулю.

Розглянемо еволюцію розв'язання задачі прогнозу токсичності, використовуючи даний інформаційний масив. Спочатку для побудови математичних моделей прогнозу токсичності було використано весь масив даних, що дало змогу побудувати роздільні моделі типу

$$LD_{50} = f_1 (MM);$$

$$LD_{50} = f_2 (PB).$$

Проте обидві ці моделі при розрахунку прогнозних значень LD_{50} для цього вихідного масиву давали велику похибку. Матема-

тична модель як функція двох змінних

$$LD_{50} = f_3 (MM, PB)$$

також не задовольняла точності прогнозу.

Незадоволення таким розв'язком спонукало дослідників до поділу вихідного масиву на кластери. Для цього вихідний масив було представлено у вигляді точок на площинах з координатами MM, LD_{50} та PB, LD_{50} . Проаналізувавши розташування точок на площинах, було розроблено спосіб групування їх і тим самим поділено цілісний масив на підмасиви. За критерій групування обрали кут нахилу прямих LD_{50} до координатної вісі MM або PB. Це дало можливість на площині MM, LD_{50} виділити п'ять секторів з постійними та різними кутами нахилу, а на площині PB, LD_{50} — три сектори. Для кожного з секторів було побудовано математичні моделі типу

$$LD_{50} = f_i (MM), i = 1 \div 5;$$

$$LD_{50} = f_j (PB), j = 1, 2, 3.$$

Такий підхід дав змогу суттєво знизити похибку прогнозу LD_{50} для речовин вихідного інформаційного масиву. Проте виникла нова складність, пов'язана з невизначеністю віднесення наново синтезованих речовин до кластерів за MM та PB. Ця невизначеність стимулювала усвідомлення необхідності використання принципу структурно-функціональної єдності при виборі критерію класифікації характеристики ФОС за MM та PB. Він базувався на розгляді діапазонів MM і PB та їх можливих сполучень. У результаті було виділено три діапазони для MM і чотири для PB. Усі речовини було поділено на 12 класів з характеристиками від нерозчинних з малою MM до добре розчинних з великою MM. Для кожного класу за даними MM та PB речовин, що потрапили у відповідні класи, було синтезовано математичні моделі прогнозу ШРТ в одиницях LD_{50} .

Розподіл інформаційного масиву даних за принципом структурно-функціональної єдності значно зменшив похибку прогнозу і дав змогу подолати невизначеність попереднього методу.

Таким чином, прогноз ШРТ складається з двох етапів:

- визначення класу нової речовини за її структурно-функціональними властивостями;
- визначення величини ШРТ за математичною моделлю відповідного класу.

Зазначимо, що наявність першого етапу ілюструє вихід дослідників за межі попередньо поставленого завдання та дає нове

знання про структурно-функціональну класифікацію речовин, на основі якого тільки й можливе ефективне вирішення початкового завдання прогнозу ШРТ фосфорорганічних речовин.

1.3.3. Гістограмний аналіз та кореляційний портрет

Гістограма (стовбчаста діаграма) — один із видів графічного зображення статистичного розподілу будь-якої величини за кількісною ознакою. Гістограма — це сукупність суміжних прямокутників, що будуються таким чином:

- на вісі абсцис відкладають величини характеристики, що досліджується, поділені на інтервали групування;
- над кожним інтервалом будується стовпчик, висота якого пропорційна частоті появи значень ознаки на кожному інтервалі (відносні частоти).

Звичайно метою побудови гістограм розподілу вибірки є представлення інформації, що цікавить дослідника, у стислому наочному вигляді, за яким можна судити про організацію кожного параметра.

Визначення оптимального числа інтервалів. Вигляд гістограми залежить від величини інтервалу групування. Взагалі інтервали групування мають однакову величину і, якщо немає будь-яких допоміжних міркувань, оптимальне їх число, що дає змогу достатньо добре відобразити суттєві особливості розподілу, визначається за формулою

$$K = 1 + 3,322 \lg N, \quad (1.3.5)$$

де K — кількість інтервалів; N — число спостережень у вибірці.

Зазначимо, що максимальне та мінімальне значення, які спостерігаються, потрапляють у крайні інтервали. Тоді величина інтервалу визначається за формулою

$$\Delta = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{K}, \quad (1.3.6)$$

де Δ — величина інтервалу; $X_{\max}$, $X_{\min}$ — відповідно максимальне та мінімальне значення показника, що вивчається; K — кількість інтервалів.

Розглянемо на прикладі вплив величини інтервалу групування на вигляд гістограми. Нехай, наприклад, у 30 осіб виміряно частоту пульсу у стані спокою. Одержаний інформаційний масив наведено у табл. 1.7. Побудуємо гістограми для різних величин інтервалів групування.

Таблиця 1.7. Частота пульсу

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X, уд/хв	61	72	65	70	64	65	67	63	62	66

№ п/п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
X, уд/хв	71	81	59	60	66	65	64	68	64	65

№ п/п	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
X, уд/хв	58	61	68	62	63	63	67	60	66	64

Перший варіант. Визначимо число інтервалів за формулою (1.3.5). У даному випадку $N = 30$, а число інтервалів

$$K = 1 + 3,322 \lg 30;$$

$$K = 5,9 \approx 6,$$

тобто оптимальне число інтервалів для даної вибірки дорівнює шести.

Знаходимо величину інтервалу за формулою (1.3.6). Для цього треба знати мінімальну та максимальну частоту пульсу у вибірці. За даними табл. 1.7 знаходимо

$$X_{\min} = 58 \text{ уд/хв}; X_{\max} = 81 \text{ уд/хв}.$$

Тоді величина інтервалу (Δ)

$$\Delta = \frac{81 - 58}{6} \approx 4 \text{ (уд/хв)}.$$

Визначаємо інтервали групування: [58—62); [62—66); [66—70); [70—74); [74—78); [78—82]. Далі розраховуємо відносні частоти (p^*) потрапляння різних значень частоти пульсу у відповідний інтервал за формулою

$$p^* = \frac{n_i}{N}, \quad (1.3.7)$$

де n_i — число значень частоти пульсу, що потрапили в i -й інтервал.

Результати розрахунку відносних частот наведено у табл. 1.8. За її даними на рис. 1.15 представлено гістограму розподілу частоти пульсу для $K = 6$.

Другий варіант. Зменшимо число інтервалів у 2 рази. У цьому випадку $\Delta = 8$. Інтервали: [58—66); [66—74); [74—82]. Розрахуємо

відносні частоти (p^*) потрапляння різних значень частоти пульсу для цих інтервалів за формулою (1.3.7). Дані розрахунку представлено у табл. 1.9.

На рис. 1.16 за даними табл. 1.9 побудовано гістограму розподілу частоти пульсу.

Проаналізуємо одержані гістограми (рис. 1.15, 1.16). Збільшення ширини інтервалу привело до якісно іншого виду гістограми, що, в свою чергу приводить до різного вербального трактування розподілу частоти пульсу у стані спокою. Так, згідно з рис. 1.15, найчастіше у цій вибірці трапляється частота пульсу у стані спокою в інтервалі [62—66), а згідно з рис. 1.16 — в інтервалі [58—66). Водночас частота пульсу в інтервалі [58—62) трапляється у 2 рази рідше, ніж в інтервалі [62—66) (табл. 1.8).

Визначення числа інтервалів з урахуванням допоміжних міркувань. Якщо йдеться про вимірювання будь-якого показника, що характеризує стан біологічної системи, важливу роль відіграє точність методики вимірювання. Саме вони є допоміжною умовою визначення числа інтервалів групування. З урахуванням цієї умови число інтервалів групування визначається за формулою

$$K = E \left(\frac{X_{\max} - X_{\min}}{\Delta X} \right) + 1, \quad (1.3.8)$$

де $X_{\max}$, $X_{\min}$ — відповідно максимальне та мінімальне значення показника в первинному інформаційному масиві; ΔX — точність методики вимірювання; $E \left(\frac{X_{\max} - X_{\min}}{\Delta X} \right)$ — ціла частина дробу,

$\frac{X_{\max} - X_{\min}}{\Delta X}$ — найбільше ціле число, що не перевищує даний дріб.

Таблиця 1.8. Відносні частоти при $K = 6$

Інтервал	[58—62)	[62—66)	[66—70)	[70—74)	[74—78)	[78—82]
p^*	$\frac{6}{30} = 0,2$	$\frac{13}{30} = 0,43$	$\frac{7}{30} = 0,23$	$\frac{3}{30} = 0,1$	0	$\frac{1}{30} = 0,03$

Таблиця 1.9. Відносні частоти при $K = 3$

Інтервал	[58—66)	[66—74)	[78—82]
p^*	$\frac{19}{30} = 0,63$	$\frac{10}{30} = 0,33$	$\frac{1}{30} = 0,03$

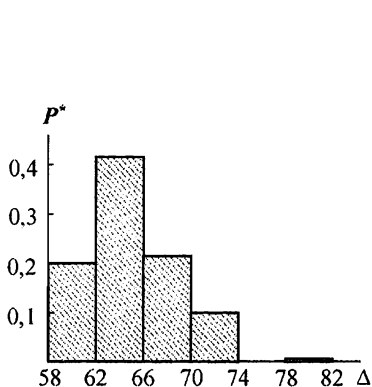


Рис. 1.15. Гістограма розподілу частоти пульсу ($K = 6$)

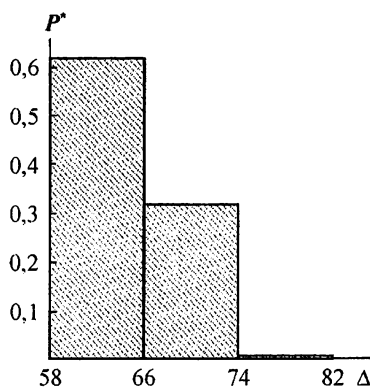


Рис. 1.16. Гістограма розподілу частоти пульсу ($K = 3$)

Для розглянутого вище прикладу (табл. 1.7) розрахуємо число інтервалів за формулою (1.3.8). Будемо вважати, наприклад, що точність вимірювання частоти пульсу $\Delta X = 2$ уд/хв. Тоді

$$K = E \left(\frac{81 - 58}{2} \right) + 1 = 12.$$

За такого визначення числа інтервалів групування величина інтервалу дорівнює точності методики вимірювання показника.

Величина інтервалу групування як функція задачі. Розглянемо це на прикладі вирішення конкретного завдання.

Завдання. Під час обстеження дітей віком від 6 до 15 років з кроком в один рік, які мають міопію (короткозорість) слабого ступеня, було одержано масив даних обстеження 69 дітей із стабільною формою міопії і 58 дітей з прогресуючою формою. Треба побудувати гістограму вікового розподілу виникнення міопії. Така постановка завдання визначає величину інтервалу групування, що дорівнює одному року.

Таким чином, якщо мова йде про гістограму вікового розподілу будь-якого показника, то величина інтервалу групування має дорівнювати інтервалу вимірювання показника.

Величина інтервалу групування в задачах порівняння гістограм для різних за кількістю даних інформаційних масивів і різних значень максимального та мінімального значень параметрів, що вимірюються. Зрозуміло, що розв'язок цієї задачі вимагає ретельності величин інтервалів групування, тому що, як було показано вище, величина інтервалів групування впливає на вид гістограми. Розв'язок цієї задачі також розглянемо на конкретному прикладі.

Завдання. Провести гістограмний аналіз розподілу величини передньо-заднього відрізка — ПЗВ (одного з головних структурних параметрів ока) для різних видів рефракції з метою виявлення структурних особливостей ока (еметропічного, короткозорого, далекозорого) за даним показником.

Для вирішення цього завдання маємо три інформаційних масиви даних вимірювання значення ПЗВ для очей з різним видом рефракції. Однак число обстежених очей для кожного виду рефракції було різним. Крім того, розмах зміни ПЗВ для кожного виду рефракції теж різний. Нижче дамо характеристику цих масивів за необхідними для побудови гістограм даними.

Для еметропів (нормальних) $N_e = 98$; $\text{ПЗВ}_{\min} = 20$ мм; $\text{ПЗВ}_{\max} = 26$ мм.

Для міопів (короткозорих) $N_m = 503$; $\text{ПЗВ}_{\min} = 22$ мм; $\text{ПЗВ}_{\max} = 26$ мм.

Для гіперметропів (далекозорих) $N_r = 362$; $\text{ПЗВ}_{\min} = 16$ мм; $\text{ПЗВ}_{\max} = 25$ мм.

За формулою (1.3.5) визначимо число інтервалів групування для кожного інформаційного масиву:

$$K_e \approx 8; K_m \approx 10; K_r \approx 10.$$

За формулою (1.3.6) визначимо величину інтервалів групування для кожного виду рефракції:

$$\Delta_e = 0,75 \text{ мм}; \Delta_m = 0,5 \text{ мм}; \Delta_r = 0,9 \text{ мм}.$$

Для порівняльного аналізу гістограм величина інтервалу для кожного виду рефракції має бути однаковою. Зважаючи на точність методики, в даному випадку доцільно вибрати максимальне зна-

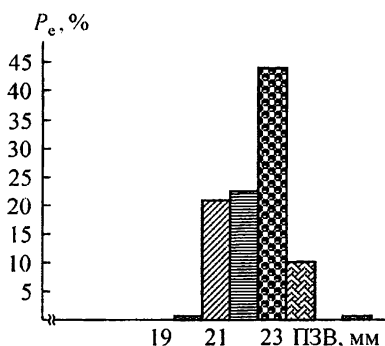


Рис. 1.17. Гістограма розподілу ПЗВ для еметропів

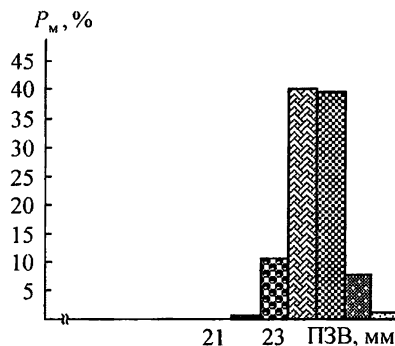


Рис. 1.18. Гістограма розподілу ПЗВ для міопів

Таблиця 1.10. Відносні частоти розподілу ПЗВ, %

Тип рефракції	Передньо-задній				
	16	17	18	19	20
P_c^*	0	0	0	0	1,02
P_m^*	0	0	0	0	0
P_r^*	0,28	0,28	0	0,55	2,21

чення й округлити до цілого, тобто за величину інтервалу слід узяти значення, що дорівнює 1 мм.

У табл. 1.10 наведено відносні частоти потрапляння різних значень ПЗВ у відповідні інтервали для кожного виду рефракції.

На рис. 1.17—1.19 представлені гістограми розподілу ПЗВ для еметропів, міопів і гіперметропів.

Розглянемо, яку інформацію міг одержати дослідник з цих гістограм. Насамперед він дістав стислий наочний вигляд розподілу значень ПЗВ за видами рефракції, що дає змогу доволі легко провести вербальний аналіз.

Кожний вид рефракції має свій розподіл. Так, найбільший діапазон зміни значень ПЗВ у гіперметропів. Інтерес викликає розташування максимальних значень цих розподілів. Гістограма для еметропів (рис. 1.17) має чітко виражений максимум, що потрапляє в інтервал ПЗВ = 23 мм. Для міопів практично однаковий максимальний відсоток дають два інтервали: ПЗВ = 24 мм і ПЗВ = 25 мм (рис. 1.18). Для гіперметропів гістограма розподілу значень ПЗВ (рис. 1.19), як і для еметропів, має один яскраво виражений максимум, що потрапляє в інтервал ПЗВ = 22 мм. За-

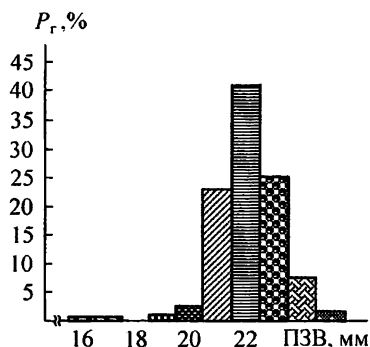


Рис. 1.19. Гістограма розподілу ПЗВ для гіперметропів

значимо, що порівняно з еметропічним оком максимума розподілу ПЗВ міопічного та гіперметропічного ока розташовані по різні боки. При цьому у гіперметропів значення максимуму ПЗВ менше, ніж у еметропів, а у міопів — більше.

Більшість значень ПЗВ у еметропів (88 %) та гіперметропів (89 %) потрапляють у три однакових інтервали (21—23 мм), але максимальні значення цих розподілів різні. Щодо міопів, то 78 % значень ПЗО

відрізок, мм						
21	22	23	24	25	26	27
21,43	22,45	43,88	10,2	0	1,02	0
0	0,6	10,14	39,96	38,57	9,54	1,19
23,2	40,61	25,14	6,35	1,38	0	0

потрапляє у два інтервали (24 і 25 мм), що зсунуті відносно попередніх. Таким чином, можна стверджувати, що за основним структурним параметром ока (ПЗВ) види рефракції відрізняються як за максимальним його значенням, так і за видом розподілу.

Метод побудови кореляційного портрета. Кореляційний портрет будемо розглядати як узагальнення інформаційного аналізу взаємозв'язку показників, що досліджуються. Дамо визначення кореляційного портрета.

Кореляційний портрет — це графічне відображення структурної організації взаємовідношень між усіма показниками, об'єднаних сіткою кореляційних зв'язків, які виражені кількісно. На нашу думку, кореляційний портрет у такому поданні ілюстративніший, ніж загальноприйнята кореляційна матриця.

Таким чином, для побудови кореляційного портрета треба розрахувати коефіцієнт парної кореляції. Він характеризує ступінь близькості залежності між двома рядами величин x і y до лінійної функціональної залежності. Коефіцієнт парної кореляції (r_{xy}) розраховується за загальновідомими формулами з використанням комп'ютерних програм статистичної обробки:

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1.3.9)$$

де K_{xy} — кореляційний момент; $\sigma_x \sigma_y$ — середні квадратичні відхилення величин x і y .

Причому

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \\ \sigma_y &= \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \\ K_{xy} &= \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1}, \end{aligned} \right\} \quad (1.3.10)$$

де x_i , y_i — i -те значення відповідно величин x і y ; $\bar{x}$, $\bar{y}$ — середнє значення показників x та y ; n — число значень показників x та y у кожному ряді.

Коефіцієнт кореляції r_{xy} лежить у межах від -1 до $+1$. Якщо $r_{xy} > 0$, маємо додатну кореляцію. Це означає, що при зростанні однієї з величин інша так само у середньому зростає. Якщо $r_{xy} < 0$, має місце від'ємна кореляція, коли при зростанні однієї з величин інша має тенденцію в середньому зменшуватися. Зазвичай вважають, що при лінійній кореляції значення $|r_{xy}| > 0,7$ вказують на високий ступінь зв'язку між величинами, при $0,3 \leq |r_{xy}| \leq 0,7$ — про середній ступінь зв'язку, при $|r_{xy}| < 0,3$ — про слабкий зв'язок.

Метод побудови кореляційних портретів полягає у такому:

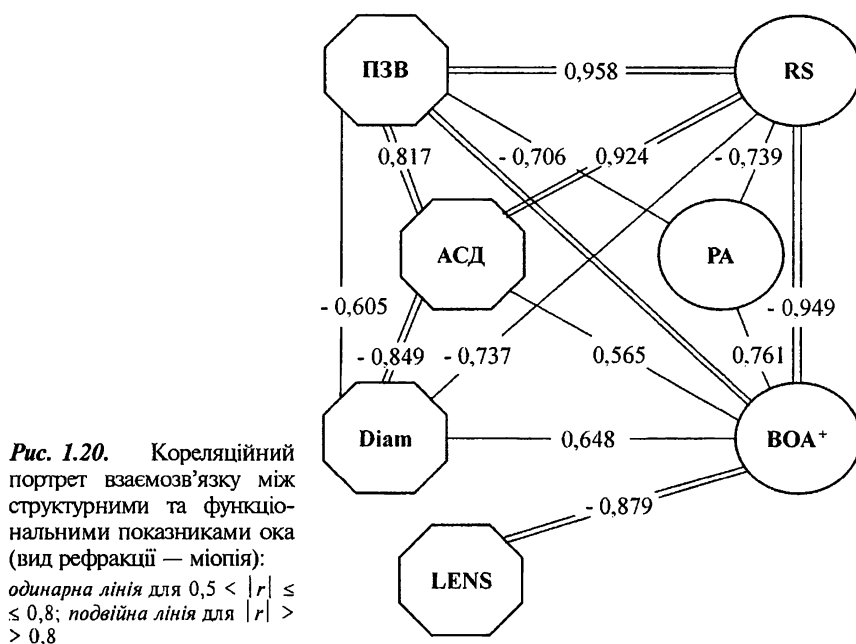
- на рисунку будь-якою плоскою геометричною фігурою (коло, прямокутник, трикутник і т. п.) позначаються показники, що досліджуються;
- ці геометричні фігури попарно з'єднують між собою за допомогою ліній із зазначенням на лініях значення коефіцієнта парної кореляції.

Щоб не захаращувати кореляційний портрет, доцільно з'єднувати між собою тільки ті показники, коефіцієнт парної кореляції яких перевищує принаймні значення $0,5$. Таке представлення кореляційного портрета дає змогу «прозоріше» проводити аналіз, а тим більше порівняльний аналіз взаємозв'язку показників у різних умовах функціонування біосистеми, що досліджується.

Розглянемо кореляційний портрет взаємозв'язку між структурними і функціональними показниками короткозорого ока (рис. 1.20, розшифровку скорочень див. у підрозділі 1.2.1.). Проаналізувавши кореляційний портрет (рис. 1.20), можна виявити певні закономірності структурно-функціональної організації ока у разі міопії, а саме:

1. Високий ступінь додатного кореляційного зв'язку між ПЗВ та RS вказує на те, що чим більший розмір ока по осевій лінії (ПЗВ), тим більший ступінь міопії (RS).

2. Головний структурний показник ока ПЗВ і величина статичної рефракції RS пов'язані з однаковими структурними (АСД, Diam) і функціональними (РА, VOA^+) показниками, причому з однаковими показниками вони мають однаковий ступінь і знак кореляційного зв'язку. Дамо вербальне трактування такого зв'язку:



- збільшення глибини передньої камери (АСД) збільшує розмір ока по осьовій лінії та ступінь міопії;

- зростання додатної частини відносного об'єму акомодациї (BOA⁺), з одного боку, зменшує ступінь міопії, а з іншого — зменшує також розмір ока по осьовій лінії;

- збільшення резерву акомодациї (РА) зменшує ступінь міопії;

- чим менший розмір ока по осьовій лінії, тим більший РА.

3. Додатна частина відносного об'єму акомодациї пов'язана з усіма показниками ока, причому додатний кореляційний зв'язок спостерігається з діаметром рогівки та резервом акомодациї, а від'ємна кореляція — з товщиною кришталика (LENS) та глибиною передньої камери (АСД) ока.

4. Більшому діаметру рогівки відповідає мала глибина передньої камери.

Аналіз кореляційного портрета дав можливість сформулювати деякі принципи структурно-функціональної організації міопічного ока.

Принцип структурної організації. Структурна організація ока у разі міопії характеризується незалежною від інших структурних показників зміною товщини кришталика.

Принцип функціональної організації. При міопії здатність до акомодатції характеризується одночасною та односпрямованою зміною резерву акомодатції та додатної частини відносного об'єму акомодатції.

Принцип структурно-функціональної організації. При міопії структурні (ПЗВ, АСД, LENS) та функціональні (РА, BOA⁺) показники взаємодіють різноспрямовано.

Саме наявність кореляційного портрету дає змогу наочніше, ніж кореляційна матриця, прослідкувати наявність даних принципів.

1.3.4. Метод уніфікації показників

Для зіставлення, з одного боку, різноякісних показників між собою, з іншого — станів різних фізіологічних систем за показниками треба уніфікувати натурні показники, тобто перевести їх у відносну форму. Конкретні методи або прийоми уніфікації залежать від постановки завдання та мети дослідження.

Розглянемо переведення натурних показників в інформаційні, за допомогою яких можна оцінити стан системи за даним показником. Насамперед слід зважити на те, що показники, які досліджуються, можуть бути виражені у розмірній формі та натуральній шкалі, у балах, якщо проводиться не вимірювання, а тестування, а також у відсотках. Найадекватнішим і найуніверсальнішим засобом уніфікації є відображення (переведення) показника у відносну форму без втрати його змістового навантаження, тобто не формальний підхід, а використання прийому інтелектуалізації. Одним із таких прийомів при переведенні натурних показників у відносну форму в даному випадку може бути уніфікація показників з урахуванням знаходження показника на шкалі його змін — метод нормованої уніфікації різноякісної інформації (МНУРІ). У цьому разі для переведення натурних показників в уніфіковані (інформаційні) для кожного показника, що вимірюється, треба знати:

- повний діапазон його зміни із зазначенням верхньої ($X_{\max}$) та нижньої ($X_{\min}$) меж, зареєстрованих експериментально або з літературних джерел;
- діапазон нормальної зміни показника із зазначенням верхньої ($X_{\max}^H$) та нижньої ($X_{\min}^H$) межі норми — діапазон середньостатистичної норми (дані літературних джерел).

Переведення натурних показників в інформаційні проводиться у такий спосіб.

Натурні розмірні показники. Нехай показник змінюється від $X_{\min}$ до $X_{\max}$ і відомі також границі норми $X_{\min}^H$ та $X_{\max}^H$. Тоді інформаційний показник можна визначити за наведеними нижче формулами.

Якщо натурний показник X потрапляє в інтервал середньостатистичної норми, тобто

$$X_{\min}^H \leq X \leq X_{\max}^H,$$

то його відносне уніфіковане значення приймаємо рівним нулю:

$$X_{\text{відн}} = 0.$$

Якщо значення натурального показника виходить за межі середньостатистичної норми у той чи інший бік, то його відносне значення $X_{\text{відн}}$ визначається за формулами

$$X_{\text{відн}} = \frac{X - X_{\max}^H}{X_{\max} - X_{\max}^H}, \quad X_{\max}^H < X \leq X_{\max}; \quad (1.3.11)$$

$$X_{\text{відн}} = \frac{X_{\min}^H - X}{X_{\min}^H - X_{\min}}, \quad X_{\min} \leq X < X_{\min}^H. \quad (1.3.12)$$

Згідно з формулами (1.3.11) і (1.3.12), можна стверджувати, що якщо натурний показник потрапляє в будь-який інтервал на шкалі його зміни, інформаційний показник ($X_{\text{відн}}$) завжди буде лежати в інтервалі від нуля до одиниці. Слід зазначити, що при $X = X_{\max}$, $X_{\text{відн}} = 1$ (формула (1.3.11)); при $X = X_{\min}$, $X_{\text{відн}} = 1$ (формула (1.3.12)).

Розглянутий метод дає змогу уніфікувати натурний показник як у верхньому ($X_{\max}^H \div X_{\max}$), так і у нижньому ($X_{\min} \div X_{\min}^H$) діапазонах. Особливого значення така уніфікація набуває тоді, коли ці діапазони різняться за величиною. Зрозуміло також, що відхилення показника від нижньої чи верхньої границі норми означає погіршення стану системи, що досліджується, за цим показником, а $X_{\text{відн}} = 1$ означає найгірший стан за даним показником.

Показники, що виражені у балах. У таких випадках вважають, що максимально можливе значення у балах і є верхньою границею норми, тобто

$$X_{\max} = X_{\max}^H.$$

Переведення бальних значень в інформаційні показники проводиться за формулою (1.3.12), тобто для випадку, коли зна-

чення показника у балах менше нижньої границі норми. Слід зазначити, що нижню границю норми доволі часто встановлюють експертним шляхом у кожному конкретному випадку.

Показники, що виражені у відсотках. Зрозуміло, що в таких випадках максимальне значення показника $X_{\max} = 100\%$ є верхньою границею норми. Мінімальне значення показника у даному разі $X_{\min} = 0\%$. Тоді переведення показників в уніфіковану форму здійснюється за формулою

$$\left. \begin{aligned} X_{\text{відн}} &= \frac{X_{\min}^H - X}{X_{\min}^H}, & 0\% \leq X < X_{\min}^H, \\ X_{\text{відн}} &= 0, & X_{\min}^H \leq X \leq 100\%. \end{aligned} \right\} \quad (1.3.13)$$

Як і у попередньому випадку уніфікація показників проводиться у нижньому інтервалі $X_{\min} \div X_{\min}^H$.

Наведені вище формули (1.3.11)—(1.3.13) оцінюють значення показника у відхиленні від норми, причому діапазон зміни показників у відносних одиницях лежить у межах від нуля до одиниці. Якщо натурний показник у межах норми, то незалежно від місця його знаходження відносно значення завжди дорівнює нулю.

Уніфікація натурних показників, що лежать у межах середньостатистичного діапазону норми. Достатній інтерес може являти таке завдання: на підставі показників, що вимірюються, кількісні значення яких не виходять за межі відповідного діапазону норми, визначити ступінь або резерв нормального функціонування системи. Зрозуміло, що цей резерв залежить від місця розташування показника на шкалі діапазону норми. І в цьому випадку чисельне значення кожного показника має різну вагомість з точки зору кількісної міри ступеня норми, оскільки діапазон норми для різних показників різний. Для підвищення інформативності цих значень та їх уніфікації треба значення показника представити у відносних одиницях з урахуванням свого діапазону норми. Для цього згідно з МНУРІ для кожного показника доцільно в діапазоні норми виділити значення, які відповідають оптимуму ($X_{\text{опт}}$). Тоді можна вважати, що відхилення показника від оптимального значення в той чи інший бік означає його відхилення від оптимального стану, тобто зменшення резерву нормального функціонування. Переведення показників у відносну форму для цього завдання здійснюється за формулою

$$X_{\text{відн}} = \frac{|X_{\text{опт}} - X|}{0,5(X_{\max}^H - X_{\min}^H)}, \quad X_{\min}^H \leq X \leq X_{\max}^H. \quad (1.3.14)$$

Формула (1.3.14) написана за умови, коли оптимальне значення норми дорівнює середньому значенню діапазону норми.

У даному випадку, коли $X = X_{\text{опт}}$, то $X_{\text{відн}} = 0$, що означає оптимальне функціонування системи за цим показником. Якщо $X = X_{\text{мін}}^H$ чи $X = X_{\text{мак}}^H$, то $X_{\text{відн}} = 1$, що означає повне вичерпання резервів нормального функціонування.

Таким чином, розглянуто два варіанти інформаційних технологій уніфікації натурних показників, тобто переведення їх в інформаційні показники без втрати змістового навантаження. В обох варіантах використовується прийом інтелектуалізації, який враховує місце знаходження показника, що вимірюється, на шкалі його зміни або на шкалі діапазону норми.

Випадок, коли границі норми визначають не для абсолютних значень показників, а для відношення цих показників до їх належних значень у відсотках, характерний для визначення стану системи зовнішнього дихання, структуру інфотому якої представлено на рис. 1.14.

Розглянемо специфіку уніфікації показників системи зовнішнього дихання. Відповідно до медичної практики для оцінки стану системи дихання використовують не абсолютні значення показників, що вимірюються, а відношення цих показників до їх належних значень у відсотках. Саме для таких перетворених показників існують нижні границі норми. Отже, уніфікація натурних показників системи зовнішнього дихання складається з двох етапів. Перший етап пов'язаний із загальноприйнятим у медичній практиці переведенням абсолютних значень показників у відносну форму, тобто переходом до інших значень показників, що вимірюються за формулою

$$X = \frac{X_{\text{абс}}}{X_{\text{належ}}} \cdot 100\%, \quad (1.3.15)$$

де $X_{\text{абс}}$, $X_{\text{належ}}$ — відповідно абсолютне та належне значення показника, що вимірюється.

Другий етап уніфікації пов'язаний з підвищенням інформативності показників, які відображаються у відсотках, з точки зору визначення ступеня порушення функціонування системи зовнішнього дихання за тим або іншим показником. Отже, другий етап — це етап переведення перетворених за формулою (1.3.15) показників, що вимірюються, в інформаційні з використанням розглянутого вище прийому інтелектуалізації.

Отже, *процедура першого етапу* потребує знання належних значень показників. Для їх визначення розроблено моделі з урахуван-

ням статі, віку і зросту обстежуваного. Як приклад наведемо математичні моделі для розрахунку належних значень деяких показників.

Чоловіки, віком ≤ 25 років

$$\text{ЖЕЛ}_{\text{належ}} = 0,0523^1 - 4,1$$

$$\text{МОШ}_{25\text{належ}} = 0,0733 + 0,166\text{М} - 8,06$$

$$\text{МОШ}_{50\text{належ}} = 0,0513 + 0,081\text{М} - 4,975$$

$$\text{МОШ}_{75\text{належ}} = 0,033 - 2,455$$

$$\text{ОФВ}_{1\text{належ}} = 0,0463 + 0,045\text{М} - 4,808.$$

Чоловіки, віком > 25 років

$$\text{ЖЕЛ}_{\text{належ}} = 0,0523 - 0,028\text{М} - 3,2$$

$$\text{МОШ}_{25\text{належ}} = 0,0943 - 0,035\text{М} - 5,99$$

$$\text{МОШ}_{50\text{належ}} = 0,0693 - 0,015\text{М} - 5,4$$

$$\text{МОШ}_{75\text{належ}} = 0,0443 - 0,012\text{М} - 4,143$$

$$\text{ОФВ}_{1\text{належ}} = 0,0523 - 0,027\text{М} - 4,203.$$

Жінки, віком ≤ 20 років

$$\text{ЖЕЛ}_{\text{належ}} = 0,0493 - 4,34$$

$$\text{МОШ}_{25\text{належ}} = 0,0493 + 0,157\text{М} - 3,916$$

$$\text{МОШ}_{50\text{належ}} = 0,0343 + 0,12\text{М} - 2,531$$

$$\text{МОШ}_{75\text{належ}} = 0,1393 + 0,692$$

$$\text{ОФВ}_{1\text{належ}} = 0,0273 + 0,085\text{М} - 2,703.$$

Жінки, віком > 20 років

$$\text{ЖЕЛ}_{\text{належ}} = 0,0433 - 0,019\text{М} - 3,76$$

$$\text{МОШ}_{25\text{належ}} = 0,0493 - 0,025\text{М} - 0,735$$

$$\text{МОШ}_{50\text{належ}} = 0,0353 - 0,013\text{М} - 0,444$$

$$\text{МОШ}_{75\text{належ}} = -0,0143 + 3,042$$

$$\text{ОФВ}_{1\text{належ}} = 0,0273 - 0,021\text{М} - 0,797.$$

Згідно з наведеними вище формулами, для кожного обстежуваного розраховуються індивідуальні значення належних показників. Потім за формулою (1.3.15) переходять до відносних значень цих показників у відсотках. Вважається, що коли показник перевищує 100 %, то це відповідає нормальному функціонуванню системи зовнішнього дихання за цим показником. Після першого етапу уніфікації отримуємо новий інформаційний масив даних, який є вихідним для другого етапу уніфікації.

Розглянемо *другий етап уніфікації* даних. Для отриманого після першого етапу уніфікації масиву даних медичні спостереження дають можливість визначити нижні границі норми для всіх показників. Наводимо значення нижніх границь норми для показників, що розглядаються, %:

$$\text{ЖЕЛ} - 80$$

¹ У всіх наведених математичних моделях Z — зріст, M — маса тіла.

ФЖЄЛ — 80
ОФВ/ФЖЄЛ — 85
ПОШ — 80
МОШ25 — 80 (чоловіки); 70 (жінки);
МОШ50 — 70 (чоловіки); 60 (жінки);
МОШ75 — 70
СОШ25 — 75 — 70 (чоловіки); 60 (жінки);
СОШ75 — 85 — 70.

Урахування границь норми дає можливість поділити масив даних на показники, що лежать у межах норми, і показники, які виходять поза її межі. Розглянемо випадок виходу показників за межі норми. Порушення в системі зовнішнього дихання визначаються зменшенням показників порівняно з нижньою границею норми, яка також зменшується, тобто нижня межа зміни показника становить 0 %. Діапазон зміни різних показників в області порушення системи зовнішнього дихання різний і визначається різницею між значенням нижньої межі норми і нулем, тобто, по суті, дорівнює нижній межі норми показника. Крім того, величина цього діапазону залежить від статі особи, яка досліджується. Тому, якщо виражати ступінь порушення за кожним показником у вигляді абсолютного значення різниці між нижньою межею норми і значенням показника, то вагомість цього відхилення для кожного показника різна. Для підвищення інформативності абсолютних відхилень з точки зору діагностики стану системи зовнішнього дихання за тим або іншим показником і переведення цієї різниці у відносні одиниці без втрати змістового навантаження треба абсолютне значення відхилення співвіднести з відповідним діапазоном «патології». У цьому випадку значення інформаційних (уніфікованих) показників визначається за формулою (1.3.13). Інформаційні показники, розраховані за цією формулою, будуть лежати в діапазоні від нуля до одиниці, причому нульове значення відповідає нормі, а ненульове — відхиленню від неї. За такого перетворення всі показники можна порівняти між собою, а їх кількісні значення вказують на ступінь відхилення від нормального функціонування системи зовнішнього дихання за відповідним показником.

Розглянемо деякі **приклад**и переведення натурних показників у відносну форму.

1. *Серцево-судинна система*, що є індикатором стану цілісного організму, характеризується такими показниками:

- частота серцевих скорочень (ЧСС);
- діастолічний артеріальний тиск (ДАТ);
- систолічний артеріальний тиск (САТ).

ЧСС характеризує насосну функцію серця, а ДАТ і САТ — переважно стан судин.

Для переведення цих показників у відносну форму з використанням МНУРІ треба знати діапазон норми та повний діапазон їх зміни. За даними літератури відомо, що

$$\begin{array}{ll} \text{ЧСС}_{\max} = 290 \text{ уд/хв}; & \text{ЧСС}_{\min} = 12 \text{ уд/хв}; \\ \text{ЧСС}_{\max}^H = 85 \text{ уд/хв}; & \text{ЧСС}_{\min}^H = 55 \text{ уд/хв}; \\ \text{САТ}_{\max} = 292 \text{ уд/хв}; & \text{САТ}_{\min} = 51 \text{ уд/хв}; \\ \text{САТ}_{\max}^H = 140 \text{ уд/хв}; & \text{САТ}_{\min}^H = 90 \text{ уд/хв}; \\ \text{ДАТ}_{\max} = 170 \text{ мм рт. ст.}; & \text{ДАТ}_{\min} = 30 \text{ мм рт. ст.}; \\ \text{ДАТ}_{\max}^H = 80 \text{ мм рт.ст.}; & \text{ДАТ}_{\min}^H = 50 \text{ мм рт. ст.} \end{array}$$

Згідно з формулами (1.3.11) і (1.3.12) інформаційний показник для ЧСС розраховується за такими формулами:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{ЧСС}_{\text{відн}} = \frac{\text{ЧСС} - 85}{205}, & 85 < \text{ЧСС} \leq 290, \\ \text{ЧСС}_{\text{відн}} = \frac{55 - \text{ЧСС}}{43}, & 12 \leq \text{ЧСС} < 55, \\ \text{ЧСС}_{\text{відн}} = 0, & 55 \leq \text{ЧСС} \leq 85. \end{array} \right\} \quad (1.3.16)$$

Інформаційний показник для САТ:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{САТ}_{\text{відн}} = \frac{\text{САТ} - 140}{152}, & 140 < \text{САТ} \leq 292, \\ \text{САТ}_{\text{відн}} = \frac{90 - \text{САТ}}{39}, & 51 \leq \text{САТ} < 90, \\ \text{САТ}_{\text{відн}} = 0, & 90 \leq \text{САТ} \leq 140. \end{array} \right\} \quad (1.3.17)$$

Інформаційний показник для ДАТ:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{ДАТ}_{\text{відн}} = \frac{\text{ДАТ} - 80}{90}, & 80 < \text{ДАТ} \leq 170, \\ \text{ДАТ}_{\text{відн}} = \frac{50 - \text{ДАТ}}{20}, & 30 \leq \text{ДАТ} < 50, \\ \text{ДАТ}_{\text{відн}} = 0, & 50 \leq \text{ДАТ} \leq 80. \end{array} \right\} \quad (1.3.18)$$

Якщо треба оцінити резерв нормального функціонування серцево-судинної системи за показниками ЧСС, САТ і ДАТ у межах середньостатистичної норми, використовуємо формулу (1.3.14). В цьому випадку маємо

$$\text{ЧСС}_{\text{відн}} = \frac{|\text{ЧСС} - 70|}{15}, \quad 55 \leq \text{ЧСС} < 70,$$

$$70 < \text{ЧСС} \leq 85, \quad \text{ЧСС}_{\text{відн}} = 0, \quad \text{ЧСС} = 70,$$

$$\text{де } \text{ЧСС}_{\text{опт}} = \frac{85 + 55}{2} = 70 \text{ уд/хв};$$

$$\text{САТ}_{\text{відн}} = \frac{|\text{САТ} - 115|}{25}, \quad 90 \leq \text{САТ} < 115, \quad 115 < \text{САТ} \leq 140,$$

$$\text{САТ}_{\text{відн}} = 0, \quad \text{САТ} = 115,$$

$$\text{де } \text{САТ}_{\text{опт}} = \frac{140 + 90}{2} = 115 \text{ мм рт. ст.};$$

$$\text{ДАТ}_{\text{відн}} = \frac{|\text{ДАТ} - 65|}{15}, \quad 50 \leq \text{ДАТ} < 65,$$

$$65 < \text{ДАТ} \leq 80, \quad \text{ДАТ}_{\text{відн}} = 0, \quad \text{ДАТ} = 65,$$

$$\text{де } \text{ДАТ}_{\text{опт}} = \frac{50 + 80}{2} = 65 \text{ мм рт. ст.}$$

2. *Зросто-ваговий коефіцієнт*, що є одним з об'єктивних факторів ризику, являє собою нормовану масу тіла з урахуванням поправки на зріст. Розглянемо алгоритм переведення цього коефіцієнта у відносну форму, використовуючи МНУРІ.

Спочатку для кожної людини за спрощеною формулою розраховується належна маса (НМ):

$$\text{НМ} = 3 - 100,$$

де 3 — зріст у сантиметрах.

Вводимо діапазон норми маси (M^H). Будемо вважати перевищення належної маси на 10 % у той чи інший бік нормою:

$$M^H = \text{НМ} \pm 10 \% \text{НМ},$$

тобто $M_{\text{мін}}^H = 0,9\text{НМ}$; $M_{\text{мак}}^H = 1,1\text{НМ}$.

Експертним шляхом задамо діапазони можливої зміни маси тіла для чоловіків та жінок, не враховуючи екстремальні випадки.

Для чоловіків: $M_{\min} = 45$ кг; $M_{\max} = 130$ кг.

Для жінок: $M_{\min} = 40$ кг; $M_{\max} = 120$ кг.

Формули переведення маси у відносні одиниці:

Для чоловіків:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{відн}} &= \frac{M - 1,1\text{НМ}}{130 - 1,1\text{Н}}, & 1,1\text{НМ} < M \leq 130, \\ M_{\text{відн}} &= \frac{0,9\text{НМ} - M}{0,9\text{НМ} - 45}, & 45 \leq M < 0,9\text{НМ}, \\ M_{\text{відн}} &= 0, & 0,9\text{НМ} \leq M \leq 1,1\text{НМ}. \end{aligned} \right\} \quad (1.3.19)$$

Для жінок:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{відн}} &= \frac{M - 1,1\text{НМ}}{120 - 1,1\text{НМ}}, & 1,1\text{НМ} < M \leq 120, \\ M_{\text{відн}} &= \frac{0,9\text{НМ} - M}{0,9\text{НМ} - 40}, & 40 \leq M < 0,9\text{НМ}, \\ M_{\text{відн}} &= 0, & 0,9\text{НМ} \leq M \leq 1,1\text{НМ}. \end{aligned} \right\} \quad (1.3.20)$$

Слід зазначити, що $M_{\text{відн}} = 1$ також у випадках, коли $M > 130$ кг і $M < 45$ кг (для чоловіків) та $M > 120$ кг і $M < 40$ кг (для жінок).

Якщо треба визначити зросто-ваговий коефіцієнт, коли маса тіла знаходиться у границях норми, розрахунок проводимо за формулами

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{відн}} &= \frac{|M - \text{НМ}|}{0,1\text{НМ}}, & 0,9\text{НМ} \leq M < \text{НМ}, \\ & & \text{НМ} < M \leq 1,1\text{НМ}, \\ M_{\text{відн}} &= 0, & M = \text{НМ}. \end{aligned} \right\} \quad (1.3.21)$$

На завершення підкреслимо ще раз, що натурні показники, переведені відповідно до положення натурального показника на шкалі його зміни в уніфіковану відносну форму, дають змогу оцінити стан системи за відповідним показником.

Таким чином, уніфіковані натурні показники є інформаційними, а їх кількісні значення показують ступінь відхилення системи, що досліджується, від нормального функціонування за даним показником або резерв нормального функціонування.

1.3.5. Методи побудови узагальнених оцінок

Згідно зі структурою інфотому, розглянутою у підрозділі 1.2.2 (рис. 1.13), інформаційні показники становлять нижній рівень інфотому, на якому формуються узагальнені уніфіковані оцінки функції стану інформаційних блоків наступного рівня ієрархії. Останні розглядаються як вищий рівень ієрархії щодо рівня показників. На наступних рівнях ієрархії інфотому оцінні функції стану інформаційних блоків об'єднують певну сукупність оцінних функцій стану інформаційних блоків нижніх рівнів, тобто оцінювати стан системи доцільно за рівнями ієрархії. Синтез узагальнених оцінок стану пов'язаний з необхідністю кількісно оцінити стан функціонування різних відділів системи, що досліджується, і системи в цілому. Взагалі оцінити стан можна роздільно за кожним показником синтезуючи в кінцевому підсумку висновок. При цьому береться до уваги ступінь порушення за кожним показником, але відсутній кількісний вираз загального порушення в системі в цілому. Звертаємо увагу також на складність постановки діагнозу в багатопараметричному просторі. Тому розробка процедури згортання багатопараметричного простору в узагальнену оцінку стану з узагальненим виразом ступеня порушення системи в цілому з медичної точки зору є доцільною. А саме узагальнення можна розглядати як більш системний рівень ієрархії щодо рівня натурних показників. Аби одержати такі оцінки використовується метод ієрархічного згортання. Він передбачає синтез узагальнених оцінок стану інформаційних блоків різного рівня ієрархії і системи в цілому у вигляді лінійно виважених сум. Причому, синтезуючи узагальнені оцінки стану окремих складових і системи в цілому, слід дотримуватись таких правил:

- кількісне вираження (представлення) будь-якої оцінної функції будь-якого блоку має знаходитись в інтервалі від нуля до одиниці;
- всі оцінні функції мають бути порівнянні між собою за своїми кількісними значеннями;
- вербальне трактування стану виділених блоків і системи в цілому всередині інтервалу $[0, 1]$ має базуватися на єдиній кількісній класифікаційній шкалі.

Зазначимо, що оцінні характеристики виділених блоків і систем у цілому неможливо отримати безпосереднім вимірюванням. Ці оцінки являють собою свого роду інформаційну уніфіковану кількісну міру стану складових ієрархічних рівнів структури інфотому.

Отже, узагальнена оцінка стану інформаційного блоку (δ), що формується на інформаційних показниках, визначається за формулою

$$\delta = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i, \quad (1.3.22)$$

де α_i — вагові коефіцієнти показників; x_i — інформаційні показники; n — число інформаційних показників.

Узагальнена оцінка стану інформаційного блоку (Δ) наступного рівня ієрархії формується як лінійно виважена сума оцінок δ :

$$\Delta = \sum_{j=1}^m \beta_j \delta_j, \quad (1.3.23)$$

де β_j — вагові коефіцієнти інформаційних блоків (δ) нижнього рівня ієрархії, на яких формується оцінка Δ ; m — число інформаційних блоків, що формують оцінку Δ .

Таке сходження по рівнях ієрархії відбувається до одержання оцінки стану системи в цілому. За першим правилом синтезу узагальнених оцінок стану значення всіх оцінок мають належати до інтервалу $[0—1]$.

Для цього треба унормувати вагові коефіцієнти, що входять у кожний вираз (1.3.22), (1.3.23), таким чином, щоб сума ваг по всіх координатах у кожному виразі дорівнювала одиниці. Якщо ваги координат визначаються у довільній шкалі, то нормування кожної ваги забезпечується діленням даної довільної ваги на суму довільних ваг по всіх координатах.

За такого конструювання ієрархічної системи оцінок досягаються позитивні результати:

- значення всіх інформаційних показників і узагальнених оцінок дають інформаційну картину відхилення від норми кожного інформаційного показника, кожного інформаційного блоку будь-якого рівня ієрархії;

- різниця між значеннями узагальнених оцінок дає можливість судити про розходження в стані різних блоків між собою.

Для наочності розглянемо процедуру ієрархічного згортання при формуванні узагальної оцінки стану системи зовнішнього дихання. Згідно з методом ієрархічного згортання процедура згортання багатопараметричного простору в узагальнену одновимірну форму здійснюється на основі лінійно виваженої суми. Враховуючи структуру інфотому (див. рис. 1.14), для оцінки стану системи зовнішнього дихання в цілому доцільно розглянути такі рівні.

Рівень складових підсистем. Складова «структурна характеристика» підсистеми «Легені» характеризується натурними показниками ЖЕЛ і ФЖЕЛ або уніфікованими (інформаційними) їх значеннями $x_{1\text{відн}}$ та $x_{2\text{відн}}$ відповідно. Тоді оцінка стану цього блоку визначається за формулою

$$\delta_1 = \alpha_1 x_{1\text{відн}} + \alpha_2 x_{2\text{відн}},$$

де α_1, α_2 — вагові коефіцієнти показників.

Оцінка стану складової «Функціональна характеристика» підсистеми «Легені» будується на інформаційних показниках $x_{3\text{відн}}$ (натурних показниках ОФВ1/ФЖЕЛ) та $x_{4\text{відн}}$ (натурний показник ПОШ):

$$\delta_2 = \alpha_3 x_{3\text{відн}} + \alpha_4 x_{4\text{відн}},$$

де α_3, α_4 — вагові коефіцієнти показників ОФВ1/ФЖЕЛ та ПОШ відповідно.

Складова «Великі бронхи» підсистеми «Бронхи» характеризується одним показником МОШ25. Отже, уніфіковане значення цього показника і є інформаційною оцінкою функціонального стану великих бронхів:

$$\delta_3 = x_{5\text{відн}}.$$

Лінійно виражена сума інформаційних показників $x_{6\text{відн}}$ (натурний показник МОШ50) і $x_{8\text{відн}}$ (натурний показник СОШ25—75) узагальнено оцінює функціональний стан середніх бронхів:

$$\delta_4 = \alpha_5 x_{6\text{відн}} + \alpha_6 x_{8\text{відн}},$$

де α_5, α_6 — вагові коефіцієнти показників МОШ25 та СОШ25—75 відповідно.

Лінійно виражена сума інформаційних показників $x_{7\text{відн}}$ (натурний показник МОШ75) і $x_{9\text{відн}}$ (натурний показник СОШ75—85) з відповідними ваговими коефіцієнтами α_7, α_8 оцінює функціональний стан малих бронхів:

$$\delta_5 = \alpha_7 x_{7\text{відн}} + \alpha_8 x_{9\text{відн}}.$$

Рівні підсистем. Підсистемами системи зовнішнього дихання є «Легені» та «Бронхи» (рис. 1.14). За методом ієрархічного згортання інформаційні оцінки стану цих підсистем будуються на оцінках стану відповідних складових. Так, оцінка стану легенів в цілому визначається як

$$\Delta_n = \beta_1 \delta_1 + \beta_2 \delta_2,$$

де β_1, β_2 — вагові коефіцієнти.

Оцінка функціонального стану бронхів у цілому має вигляд:

$$\Delta_{бр} = \beta_3\delta_3 + \beta_4\delta_4 + \beta_5\delta_5,$$

де $\beta_3, \beta_4, \beta_5$ — вагові коефіцієнти.

Рівень системи. Оцінка стану системи зовнішнього дихання в цілому об'єднує в лінійно виражену суму оцінки стану підсистем «Легені» та «Бронхи»:

$$\Delta_{сд} = \gamma_1\Delta_{л} + \gamma_2\Delta_{бр},$$

де γ_1, γ_2 — вагові коефіцієнти.

Блок-схема технології ієрархічного згортання при формуванні узагальненої оцінки стану системи зовнішнього дихання наведена на рис. 1.21.

Вибір вагових коефіцієнтів. Завдання вибору вагових коефіцієнтів не є однозначним. Ваги можуть визначатися експертним шляхом або чисто формальним методом, наприклад, відповідно до відносної частоти порушень за кожним показником на експериментальному масиві, одержаному в результаті обстеження достатньо великого контингенту осіб. Зрозуміло, що останній метод значною мірою залежить від обсягу масиву даних спостережень. Розглянемо деякі алгоритми визначення вагових коефіцієнтів для лінійно-виражених сум типу (1.3.22).

Метод визначення вагових коефіцієнтів за співвідношенням діапазону норми і повного діапазону зміни натурних показників. Згідно з цим методом насамперед для кожного показника розраховуємо такий коефіцієнт:

$$K = \frac{x_{\max}^H - x_{\min}^H}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (1.3.24)$$

Далі будемо вважати, що, по-перше, $\alpha_i = f(K_i)$, а по-друге, показник, у якого більший коефіцієнт K , буде мати і більший ваговий коефіцієнт α . Таким чином, ненормований ваговий коефіцієнт дорівнює коефіцієнту K . Нормування вагових коефіцієнтів здійснюємо за формулою

$$\alpha_i = \frac{K_i}{\sum_{i=1}^n K_i}, \quad (1.3.25)$$

де n — число показників, що входять в узагальнену оцінку δ (1.3.22).

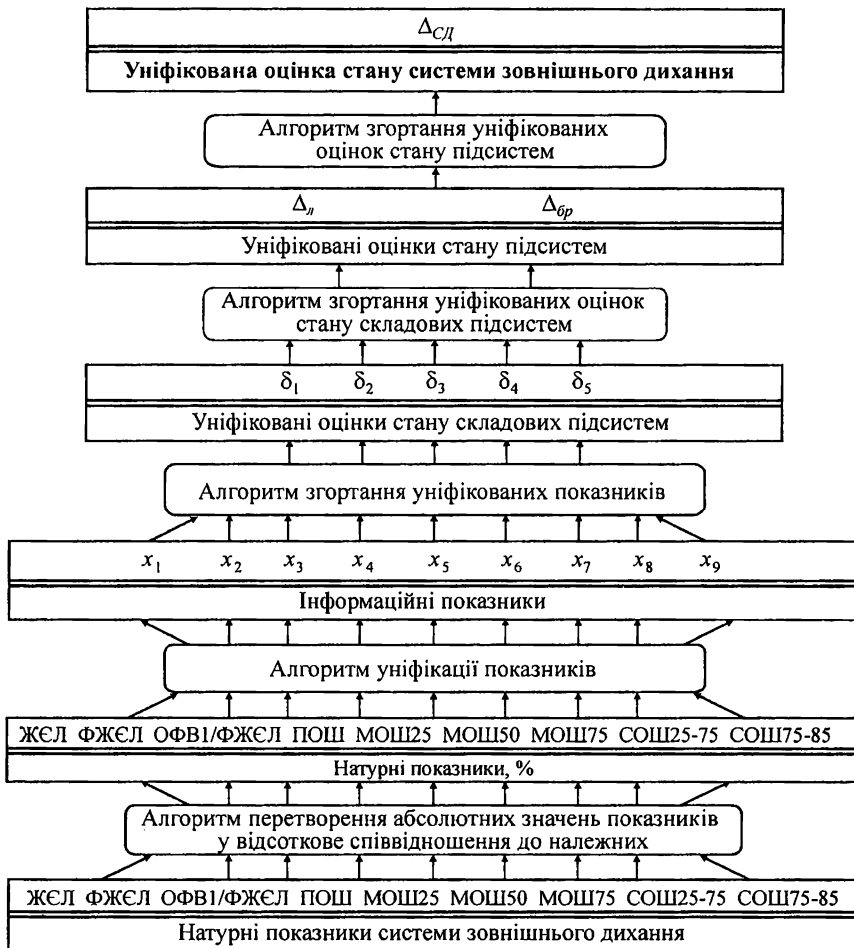


Рис. 1.21. Блок-схема технології ієрархічного згортання та перетворення натурних показників при формуванні узагальненої оцінки стану системи зовнішнього дихання

Як приклад розглянемо визначення вагових коефіцієнтів для узагальненої оцінки стану серцево-судинної системи. Стан цієї системи характеризується, як зазначено у п. 1.3.4, показниками ЧСС, САТ і ДАТ. Узагальнена оцінка стану визначається за формулою

$$\delta_{\text{чсс}} = \alpha_1 \text{ЧСС}_{\text{відн}} + \alpha_2 \text{САТ}_{\text{відн}} + \alpha_3 \text{ДАТ}_{\text{відн}}.$$

Ненормовані вагові коефіцієнти K_1, K_2, K_3 розраховуємо за формулою (1.3.24), використовуючи необхідні дані, що наведені у підрозділі 1.3.4:

$$K_1 = \frac{\text{ЧСС}_{\max}^H - \text{ЧСС}_{\min}^H}{\text{ЧСС}_{\max} - \text{ЧСС}_{\min}} = \frac{85 - 55}{290 - 12} = 0,108;$$

$$K_2 = \frac{\text{САТ}_{\max}^H - \text{САТ}_{\min}^H}{\text{САТ}_{\max} - \text{САТ}_{\min}} = \frac{140 - 90}{292 - 51} = 0,207;$$

$$K_3 = \frac{\text{ДАТ}_{\max}^H - \text{ДАТ}_{\min}^H}{\text{ДАТ}_{\max} - \text{ДАТ}_{\min}} = \frac{80 - 50}{170 - 30} = 0,214.$$

Нормовані вагові коефіцієнти $\alpha_1 \div \alpha_3$ розраховуємо за формулою (1.3.25)

$$\alpha_1 = \frac{0,108}{0,108 + 0,207 + 0,214} = \frac{0,108}{0,529} = 0,204;$$

$$\alpha_2 = \frac{0,207}{0,529} = 0,391; \quad \alpha_3 = \frac{0,214}{0,529} = 0,405.$$

Узагальнена оцінка стану серцево-судинної системи має вигляд

$$\delta_{\text{ССС}} = 0,204 \text{ ЧСС}_{\text{відн}} + 0,391 \text{ САТ}_{\text{відн}} + 0,405 \text{ ДАТ}_{\text{відн}}.$$

Метод визначення вагових коефіцієнтів за величиною діапазону
 $x_{\min}^H - x_{\min}$ застосовують тоді, коли використовують не абсолютні значення показників, а показники, що виражені у балах чи відсотках. У таких випадках доволі часто $x_{\min} = 0$ і фіксується лише нижня границя норми $x_{\min}^H$. Отже, для визначення вагових коефіцієнтів можна скористатися величинами діапазонів $x_{\min}^H - x_{\min}$. Однак, якщо $x_{\min} = 0$, то нормований ваговий коефіцієнт визначаємо за формулою

$$\alpha_i = \frac{x_{i \min}^H}{\sum_{i=1}^n x_{i \min}^H}, \quad (1.3.26)$$

де n — число показників, що входять в узагальнену оцінку δ (1.3.22).

Таке визначення вагового коефіцієнта апріорі передбачає більшу вагу того показника, у якого більше значення $x_{\min}^H$.

Метод визначення вагових коефіцієнтів, що враховує варіабельність показників, які формують узагальнену оцінку стану. За цим методом нормований ваговий коефіцієнт визначаємо за формулою

$$\alpha_i = \frac{x_{i \max} / x_{i \min}}{\sum_{i=1}^n x_{i \max} / x_{i \min}}, \quad (1.3.27)$$

де n — число показників; $x_{i \min}$, $x_{i \max}$ — відповідно мінімальне та максимальне значення i -го показника, що зустрічаються у первинному інформаційному масиві даних.

Зрозуміло, що в цьому випадку величина вагового коефіцієнта залежить від повноти первинного інформаційного масиву.

Метод визначення вагових коефіцієнтів за ступенем кореляційного зв'язку показників, які формують узагальнену оцінку, з системною функцією системи, що досліджується. Системна функція у даному випадку — це вихідна функція системи, динаміка якої характеризує стан системи, що досліджується. Цей метод визначення вагових коефіцієнтів має сенс, коли розв'язується задача, наприклад, пошуку впливу сукупності показників (x_i) на величину системної функції (y). Згідно з цим нормовані вагові коефіцієнти (α_i) узагальненої оцінки (1.3.22) визначаються за формулою

$$\alpha_i = \frac{r_{x_i y}}{\sum_{i=1}^n r_{x_i y}}, \quad (1.3.28)$$

де $r_{x_i y}$ — коефіцієнт парної кореляції між i -м показником і системною функцією, що визначається за формулою (1.3.9).

Вагові коефіцієнти узагальнених оцінок стану інформаційних блоків різних рівнів ієрархії інфотому типу (1.3.23) у більшості випадків визначаються експертним шляхом.

На закінчення зазначимо, що ієрархічна система узагальнених оцінок стану різних відділів системи, яка досліджується, і системи в цілому дає можливість одержати нове інформаційне знання, що принципово не виявляється інструментальними методами.

МОДЕЛЮВАННЯ ЯК УСВІДОМЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Другим кроком усвідомлення тріади «дані—інформація—знання» як головної ідеї інформаційних технологій є усвідомлення інформації. Саме синтез математичних моделей функціонування біологічних систем різного рівня ієрархії від клітини до цілісного організму в нормі та при патології певною мірою допомагає усвідомити інформацію, тобто надати їй змістовності. У цьому розділі завдання синтезу математичних моделей розглядається з позицій:

- ідентифікації класу математичної моделі, тобто математичного апарату моделювання;
- ідентифікації структури моделі у вибраному класі;
- ідентифікації параметрів математичної моделі.

1.4.1. Основні положення методу математичного моделювання

Математичні моделі мають високий ступінь абстрактності, оперують символами, що визначають параметри системи будь-якої природи, в тому числі біологічної, припускають кількісну інтерпретацію. Саме математичні моделі дали змогу в біології та медицині перейти до стислого викладення гіпотез і закономірностей, широкого впровадження технічних обчислювальних засобів.

Розглянемо ієрархію математичних моделей за ступенем відображення властивостей біосистеми, що вивчається.

Функціональні моделі. Метод «чорного ящика» став символом кібернетичного підходу до вивчення систем. Цей підхід має свої особливості, переваги та недоліки. Розглянемо їх.

Насамперед метод «чорного ящика» є *абстрактно-математичним*. Його застосування не потребує знання фізико-хімічних основ роботи системи, що моделюється. Для побудови моделі треба лише знати значення вхідних дій та вихідних координат си-

стеми, заданих у вигляді таблиць, графіків тощо. Постає завдання відшукати систему функцій, що перетворюють вхідні дії та вихідні координати.

Взагалі вид оператора функціонального перетворення задається, тобто задаються його структура і відповідно кількість параметрів, що потребують визначення. Часто якщо є відповідний критерій, за яким порівнюється робота моделей з різною структурою, можна здійснити процедуру автоматичного пошуку найкращої і за структурою, і за параметрами математичної моделі. При цьому все ж необхідно задавати клас функцій, в якому здійснюється пошук математичної моделі. Наприклад, модель може бути задана у класі поліноміальних функцій, а конкретний вид поліному та його коефіцієнти визначаються алгоритмом пошуку моделі та пошуку параметрів моделі. Критерієм порівняння моделей може слугувати, наприклад, сума квадратів відхилень від експериментальних даних або відношення дисперсій. Здійснюючи такі процедури, треба задавати також критерій, за яким можна зупинити процедури пошуку.

Координати, які для даної системи вважаються вихідними, можуть бути пов'язані між собою і з вхідними діями за рахунок внутрішніх зв'язків підсистем системи. Ця обставина не впливає на вибір системи функцій моделі. Саме тому функціональна модель не може претендувати на розкриття механізмів, що діють у системі. Таким чином, для побудови функціональної моделі нема необхідності замислюватися над сутністю процесів, що мають місце у системі. Важливо лише вдало підібрати функціональне перетворення входів на вихідні координати.

Функціональні моделі використовуються для вивчення різних типів біологічних і медичних систем — від детермінованих до імовірнісних. Функціональні моделі пов'язані з апроксимацією якісних властивостей та кількісних даних систем, що вивчаються.

Функціональна модель для врахування умов і результатів нового експерименту, за якими вона не будувалась, щоразу потребує ускладнення. Разом із тим праця, затрачена на пошук спеціальних функцій, що здійснюють перетворення входу і виходу, часто може бути використана продуктивніше. Мова йде про побудову структурно-функціональних моделей, які звичайно пов'язані з попереднім вивченням внутрішніх підсистем «чорного ящика».

Однак перед тим, як перейти до розгляду особливостей цих моделей, нагадаємо ще одну властивість процедури побудови функціональних моделей. Функціональна модель системи будується на всьому доступному масиві вхідних дій і вихідних координат.

нат. Вихідні координати, які є змінними моделі, доступні для вимірювання. Координати системи, які впливають на вихідні, але недоступні для вимірювання, не беруться до розрахунку. Ця умова дає змогу поставити в коректній формі завдання пошуку коефіцієнтів моделі, що дуже важливо для строгого математичного розв'язання задачі синтезу моделі.

Структурно-функціональні моделі. Для біологічних систем характерне внутрішнє структурування. Наприклад, функціональні системи регуляції рівня цукру крові або частоти пульсу містять внутрішні підсистеми, що представляють органи, утворені в ході еволюції організму. Таке природне структурування при побудові моделі доцільно враховувати. В цьому випадку доводиться мати справу не з системою типу «чорного ящика», а з такою, що містить кілька блоків, які взаємодіють між собою. Якщо входи та виходи всіх блоків системи відомі і можуть бути виміряні, то стосовно кожного блоку може бути поставлено завдання пошуку функціональної моделі. При цьому ми повертаємося до уже розглянутої задачі, а модель системи представимо системою рівнянь, що описують функціональні перетворення координат у блоках. І тут, вирішуючи питання пошуку структур і параметрів математичних моделей блоків, задача може бути поставлена в математично коректній формі.

Зовсім іншим є становище, коли, з одного боку, система розпадається на очевидні, наприклад, з точки зору фізіології структурні підсистеми (блоки), а з іншого — входи та виходи всіх або частини блоків не піддаються контролю і не можуть бути виміряні. Тут ми стикаємося з протилежними вимогами. Якщо математична модель містить структурні блоки системи, що не піддаються фізіологічному контролю, неможливо коректно поставити задачу пошуку моделей блоків та їх параметрів. Щоб задовольнити ці протилежні вимоги, доводиться йти на компроміс. Для опису роботи кожного блоку можна застосувати мінімальний математичний опис. Такий шлях дає змогу одержати систему рівнянь, які описують роботу блоків, що моделюються. Для визначення коефіцієнтів системи рівнянь є неповна інформація: відома тільки вхідна координата або вихідна і деяка частина проміжних координат. Ясно, що у цьому випадку задача є в принципі математично некоректною. Для одних і тих самих неповних експериментальних даних можна, очевидно, визначити деяку множину наборів коефіцієнтів системи рівнянь з приблизно однаковою точністю, що задовольняють заданому критерію пошуку коефіцієнтів.

Для зменшення множини наборів коефіцієнтів повною мірою мають бути використані якісні відомості фізіології. Вони да-

ють можливість майже завжди визначити напрямки і знаки зв'язків виділених блоків з іншими блоками. Таке якісне уточнення в багатьох випадках зменшує невизначеність вибору коефіцієнтів, наближаючи її до нуля, а коефіцієнти — до єдиного можливого значення. Однак повністю бути впевненим, що даний набір коефіцієнтів є єдиним можливим, майже ніколи не можна. Щоб зміцнити впевненість у правильності вибору структурно-функціональної моделі системи, треба перевірити її роботу в умовах, які не було використано як базові для визначення коефіцієнтів. Якщо в цих «нових» умовах вона дає якісний і кількісний збіг з експериментом, то модель визначено правильно.

Знайдена у разі математично некоректно поставленої задачі структурно-функціональна модель має велике значення для відносних зіставлень. На ній можна вивчати можливі кількісні зрушення в роботі блоків за нормальної та патологічної роботи системи. При цьому кількісні зміни коефіцієнтів і будуть характеризувати різницю між нормою та патологією.

Структурно-функціональна модель такого типу є феноменологічною моделлю системи відносно структурно виділених блоків.

Математична модель, побудована на основі фундаментальних фізико-хімічних законів. Коротко розглянемо особливості таких моделей. Певна річ, найважчим при їх побудові є визначення закону, якому підкоряється система або її блоки. Якщо ж закон відомий, то виникає проблема знаходження певного математичного трактування закону стосовно даної системи і, звичайно, з урахуванням особливостей і специфіки її роботи. Вдало підібрану модель такого роду можна безпідставно назвати теорією роботи системи. На жаль, фізико-хімічні закони можуть бути застосовані до біосистем в обмеженому масштабі і майже завжди потребують нової інтерпретації. Щодо вибору параметрів рівнянь, які визначають роботу системи, то, побудувавши таку модель, ми можемо одержати і математично коректну, і математично некоректну задачу. Це залежить від глибини моделі та масиву наявних експериментальних даних.

1.4.2. Міра складності та організації біосистем.

Класифікаційна діаграма

Перш ніж розглядати поняття складності та організації біосистем, дамо деякі визначення, що стосуються класу та структури математичної моделі.

Класом моделі можуть слугувати, наприклад, клас алгебраїчних функцій, диференціальні рівняння, статистичні закони роз-

поділу. Вибір класу певною мірою залежить від властивостей біосистеми, що досліджується, мети та завдань моделювання.

Під структурою моделі у вибраному класі розуміємо:

- у класі алгебраїчних функцій: елементарні функції (лінійну, обернено пропорційну, степеневу, логарифмічну, тригонометричну та ін.); поліноми різного виду та степеня;
- у класі диференціальних рівнянь: вид і порядок диференціального рівняння.

Найкращим критерієм вибору структури математичної моделі є знання фізіологічних закономірностей функціонування біосистем і закономірностей їх зв'язку з навколишнім середовищем.

Міра складності та організації біосистем. Отже, як уже зазначалося, клас математичної моделі, тобто математичний апарат моделювання є функцією властивостей біосистеми, що досліджується. Одна із головних властивостей біосистем — структурна та функціональна складність. Прояви складності різноманітні та пов'язані з великою кількістю можливих станів біосистеми, які характеризуються станами елементів, що утворюють біосистему, і станами зв'язків між елементами. Зі складністю пов'язані багатомірність та багатопов'язаність біосистем, що виявляються у великій кількості різнорідних параметрів, які характеризують дану біосистему, та у різноманітності зв'язків між однорідними та різнорідними параметрами.

Міра складності. Ще не сформувалася єдина думка щодо міри складності системи. Однак ближче від усіх, на наш погляд, підійшов до відповіді на це запитання У. Ешбі. На його думку, складність системи можна характеризувати її різноманітністю, під якою зазвичай розуміють кількість станів, що може приймати система. Різноманітність є цілком прийнятною оцінкою для порівняння систем різної природи. Число станів доволі важко піддається точному кількісному розрахунку. Введення спрощуючих припущень дає змогу, однак, розрахувати кількісні значення складності структурних елементів і функціональну різноманітність.

Число станів достатньо складної системи велике. Тому під кількісною мірою складності системи розуміють не число її станів, а логарифм цього числа. Таким чином, якщо число станів дорівнює n , то складність системи (H_m) визначається за формулою

$$H_m = \lg n. \quad (1.4.1)$$

Таке визначення складності зручне ще й тим, що дає змогу зв'язати її з організацією системи.

Неозначеність. Розглянемо визначення неозначеності, або ентропії, системи. Оцінка складності H_m щодо числа станів системи не виявляє, в якому із можливих станів знаходиться система і в який вона перейде у наступний момент часу. Для виявлення цього треба спостерігати за системою доволі тривалий час. Нехай система, що знаходиться в одному зі структурних станів, приймає будь-який з n функціональних станів. Якщо доволі довго спостерігати систему, то за частотою появи функціональних станів можна приблизно робити висновок про ймовірність її знаходження у цих станах. Позначимо ймовірність через p_i . Для загальної оцінки системи за ймовірностями К.-Е. Шенон ввів евристичне поняття неозначеності, або ентропії.

Нехай виміряно відносні частоти (у разі доволі великої кількості спостережень останні прямують до ймовірностей) для визначення функціональних станів системи. Усі функціональні стани утворюють повну систему подій, тобто

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (1.4.2)$$

Під неозначеністю (ентропією) функціонування системи розуміють таку величину:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \lg p_i. \quad (1.4.3)$$

Якщо, наприклад, система частіше знаходиться у l -му стані, то $p_l \rightarrow 1$. У граничному випадку, коли $p_l = 0$, ентропія $H = 0$ і система стає детермінованою. Якщо система байдужа до своїх станів, то ймовірності дорівнюють одна одній, а неоднозначність набуває максимального значення $H = H_m$.

Таким чином, неоднозначність системи лежить у межах

$$0 \leq H \leq H_m. \quad (1.4.4)$$

Абсолютна організація. Неозначеність системи характеризує її хаотичність, неорганізованість. За умови рівності ймовірностей прийняття системою своїх станів система може вважатися повністю дезорганізованою, оскільки в будь-який момент часу вона з рівною можливістю може перейти в будь-який стан. У цьому випадку система має максимальну неозначеність, що збігається з мірою її складності. Можна припустити, що у дезорганізованій системі її стани не зв'язані між собою.

Якщо система віддає перевагу одним станам, то закон рівних імовірностей порушується, а неозначеність системи зменшується, тобто

$$H < H_m.$$

Зменшення неозначеності можна зв'язати зі збільшенням організації системи. Таким чином, **організація системи** є реалізована у системі неозначеність (згідно з визначенням проф. Ю.Г. Антомонова):

$$O = H_m - H, \quad (1.4.5)$$

де O — абсолютна організація системи; H_m — максимальна неозначеність системи; H — її плінна неозначеність.

Припустимо далі, що у системі продовжується процес зменшення плінної неозначеності. Границею цього процесу є нульове значення плінної неозначеності, тобто у системі реалізована уся можлива неозначеність. У такому випадку система стає детермінованою

$$O = H_m.$$

Таким чином, детерміновані системи можна порівнювати між собою за величиною максимальної неозначеності, тобто за логарифмом числа можливих станів.

Відносна організація. Г. Ферстер запропонував оцінювати організацію системи (R) за формулою

$$R = 1 - \frac{H}{H_m}. \quad (1.4.6)$$

Очевидно, що міра R характеризує величину відносної організації системи і лежить у межах

$$0 \leq R \leq 1.$$

Зрозуміло, що для детермінованої системи ($H = 0$) відносна організація $R = 1$; для повністю дезорганізованої системи ($H = H_m$) $R = 0$.

Поняття відносної організації дає змогу порівнювати між собою різні системи.

Класифікація біосистем. Використовуючи оцінки складності H_m та відносної організації R , можна провести класифікацію систем за рівнем складності та організації. Аналізуючи системи, С. Бір поділив їх на прості, складні, дуже складні й детерміновані та ймовірнісні. Комбінації цих якостей дають шість класів систем, що можуть бути використані для класифікації біосистем.

Класифікаційна діаграма. Складність та рівень відносної організації не зв'язані між собою лінійно. Зважаючи на їх незалежність і на те, що вони характеризують різні сторони біосистеми (H_m визначає число станів, а R — відносну організацію), використовуємо їх для побудови класифікаційної діаграми в осях (R , H_m). Для класифікації біосистем за складністю скористаємось шкалою С. Біра:

$$\left. \begin{array}{ll} 1. \text{Прості біосистеми} & 0 \leq H_m < 3 \\ 2. \text{Складні біосистеми} & 3 \leq H_m < 6 \\ 3. \text{Дуже складні біосистеми} & 6 \leq H_m \end{array} \right\}. \quad (1.4.7)$$

Досвід визначення організації біосистем різної природи (система керування рівнем цукру в крові, міжімпульсні інтервали, структурно-функціональна організація ока як системи) дав змогу Ю.Г. Антомонову запропонувати таку шкалу для класифікації систем за рівнем організації:

$$\left. \begin{array}{ll} 1. \text{Детерміновані біосистеми} & 0,3 < R \leq 1 \\ 2. \text{Квазідетерміновані біосистеми} & 0,1 < R \leq 0,3 \\ 3. \text{Ймовірнісні біосистеми} & 0 < R \leq 0,1 \end{array} \right\}. \quad (1.4.8)$$

Зазначимо, що стосовно біосистем границі між цими трьома групами не є жорсткими, оскільки значення відносної організації може змінюватися залежно від внутрішнього стану біосистеми та від зовнішніх дій. З точки зору вирішення завдання ідентифікації біосистеми за властивостями квазідетерміновані біосистеми доцільно, мабуть, віднести до детермінованих, оскільки математичний апарат опису останніх дає більше можливостей конкретного аналізу. У всякому разі ефективність вирішення прикладних завдань діагностики, прогнозування та керування підтвердять правомірність такої ідентифікації.

Розглянемо класифікацію біосистем на площині в осях R — H_m (рис. 1.22). Згідно з рис. 1.22 та (1.47) і (1.48) біосистеми можна класифікувати так:

- 11 — проста детермінована біосистема;
- 12 — проста квазідетермінована біосистема;
- 13 — проста ймовірнісна біосистема;
- 21 — складна детермінована біосистема;
- 22 — складна квазідетермінована біосистема;
- 23 — складна ймовірнісна біосистема;
- 31—33 — дуже складні біосистеми.

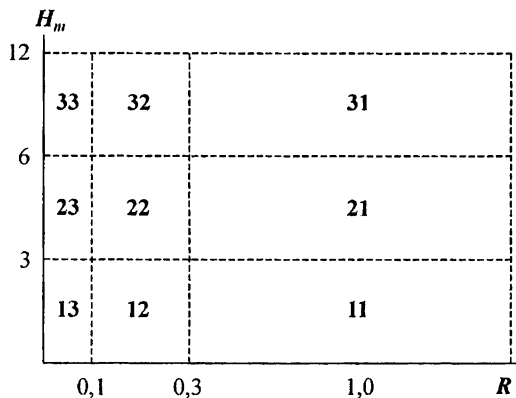


Рис. 1.22. Класифікаційна діаграма

Визначення адекватного математичного апарату для моделювання функціонування біосистем. Кожній області класифікаційної діаграми можна поставити у відповідність математичний апарат (клас), що найкращим чином описує поведінку біосистем. Будемо вважати, що для моделювання простих та складних детермінованих біосистем (області 11 і 21 рис. 1.22) цілком прийнятні алгебраїчні методи, апарат диференціальних рівнянь і теорії автоматичного управління.

Для областей 12 і 22 (рис. 1.22), мабуть, можна скористатися нелінійними диференціальними рівняннями, параметричними рівняннями та рівняннями, коефіцієнти яких підпорядковуються деяким законам розподілу.

Області 13 і 23 — теорія автоматів, теорія Марковських і випадкових процесів, алгебраїчні та диференціальні рівняння для опису ймовірностей і параметрів законів розподілу.

Для дуже складних біосистем (області 31—33) важко запропонувати що-небудь окрім оцінок складності та організації.

1.4.3. Інформаційні технології синтезу алгебраїчних моделей біосистем

Алгебраїчні моделі є одним із методів опису функціонування детермінованих біосистем. Кінцевим результатом синтезу математичних моделей біосистем є аналітичний вираз шуканої функціональної залежності. У біології та медицині шлях синтезу пов'язаний з природним послідовним проходженням трьох способів завдання функції:

1. Табличний як результат експериментальних досліджень і первинної статистичної обробки.

2. Графічний як необхідний етап усвідомлення результатів, що дає змогу зробити первинний вибір структури залежності.

3. Аналітичний — синтез алгебраїчної моделі: вибір структури та визначення параметрів.

Зазначимо, що перехід від табличного представлення до аналітичного, не вдаючись до графічного розгляду, хоч і дає можливість одержати функціональні залежності, може привести до математичних моделей, але останні не завжди найкращим чином відображають зв'язок між змінними, що досліджуються.

Слід також нагадати, що алгебраїчні моделі майже завжди являють собою найпростіші функціональні моделі, що у кращому випадку дають можливість розв'язати задачу згладжування експериментальних даних, задачу апроксимації. *Недоліком* їх є неможливість урахування в них причинно-наслідкових зв'язків між змінними, урахування фізіологічних гіпотез. До *переваги* алгебраїчних моделей можна віднести достатньо добру розробку формальних, комп'ютерних способів ідентифікації структури моделі.

Розглянемо **синтез алгебраїчної моделі з усіма необхідними етапами** (експериментальні дані, первинна статистична обробка, класифікація біосистеми, модель) на прикладі конкретної задачі.

Задача: знайти залежність між максимальним відхиленням рівня цукру у крові та дозою дії — навантаження глюкозою.

Для розв'язання цієї задачі використовуємо дані експерименту (табл. 1.11), одержані на тваринах, а саме для кожної з шести різних доз глюкози маємо значення максимального відхилення рівня цукру у крові від норми ($y_{i \max}$, де i — число вимірів). Зазначимо, що для виявлення максимального відхилення треба прослідкувати динаміку зміни рівня глікемії достатньо детально: проби на цукор брали кожні 15 хв. Як показує табл. 1.11, для кожної дози глюкози значення показника змінюються. Тому синтез математичної моделі

$$y_{\max} = f(d),$$

де d — доза глюкози, в першу чергу потребує проведення *первинної статистичної обробки* результатів експерименту, яка передбачає для кожної дози такі розрахунки:

- середнє значення максимального відхилення рівня цукру у крові за формулою

$$\bar{y}_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^{15} y_{i \max}}{15};$$

Таблиця 1.11. Максимальне відхилення рівня цукру у крові ($y_{\max}$) для різних

Доза глюкози, мг/кг	Номер						
	1	2	3	4	5	6	7
33	22	25	13	21	20	27	21
333	51	55	52	51	58	45	59
666	80	83	84	71	81	80	85
1333	71	78	79	61	71	71	78
2000	70	77	60	71	70	92	69
2666	71	70	83	60	71	75	78

- середнє квадратичне відхилення (σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{D}{15}},$$

де D — дисперсія, що обчислюється за формулою

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{15} (y_{i\max} - \bar{y}_{\max})^2}{14};$$

- довірчі інтервали (ε_β):

$$\varepsilon_\beta = \pm t_\beta \cdot \sigma,$$

де значення t_β для заданої довірчої ймовірності знаходиться за таблицями.

У табл. 1.12 наведено результати первинної статистичної обробки даних табл. 1.11 для довірчої ймовірності $\beta = 0,99$.

Наступним кроком синтезу математичної моделі

$$\bar{y}_{\max} = f(d)$$

є *ідентифікація математичного апарату моделювання* (вибір класу моделі). Для цього треба класифікувати системи вуглеводного обміну за показником максимальне відхилення рівня цукру у крові від норми. Як було розглянуто у попередньому підрозділі (1.4.1), класифікація біосистем базується на оцінках складності H_m та відносної організації — R біосистеми, що досліджується. Для розрахунку цих показників треба визначити число станів системи вуглеводного обміну за показником $y_{i\max}$ для кожної дози глюкози та частоту появи кожного зі станів.

Вихідним масивом для визначення H_m та R є дані табл. 1.11. Число станів визначається аналогічно визначенню числа інтервалів

доз глюкози, мг%

вимірювання

8	9	10	11	12	13	14	15
20	9	27	18	23	22	27	21
56	57	54	31	54	53	48	52
91	86	60	82	78	84	—	—
72	91	72	77	67	76	87	79
71	76	73	79	83	71	78	—
95	68	72	80	75	86	72	86

при побудові гістограм (підрозділ 1.3.3), тобто під *станом* розуміємо інтервал значень максимальних відхилень ($y_{i \max}$), який береться з певним кроком. Тоді число станів дорівнює числу інтервалів.

Якщо нема ніяких додаткових умов, то число інтервалів можна визначити за формулою (1.3.5). Проте на величину інтервалу накладається допоміжна умова, а саме точність методики вимірювання показника $y_{i \max}$. У такому випадку число інтервалів розраховується за формулою (1.3.8):

$$K = E \left(\frac{(y_{i \max})_{\max} - (y_{i \max})_{\min}}{\Delta y} \right) + 1,$$

де Δy — точність вимірювання; K — число станів.

У даному експерименті $\Delta y = 10$ мг%. Тоді складність системи становить

$$H_m = \lg K.$$

Для розрахунку відносної організації R (формула (1.4.6)) треба визначити неозначеність системи вуглеводного обміну за показником $y_{\max} - H$:

$$H = - \sum_{j=1}^K p_j \lg p_j;$$

де p_j — відносна частота появи j -го стану.

Таблиця 1.12. Результати первинної статистичної обробки

Параметр	Доза глюкози, мг/кг					
	33	333	666	1333	2000	2666
$\bar{y}_{\max}$	21,1	57,73	80,44	74,9	74,78	74,8
σ	1,22	1,55	2,01	2,02	1,83	2,09
$\pm \epsilon_p$	3,624	4,64	6,15	6,08	5,5	6,24

Таблиця 1.13. Значення інтервалів та відносних частот

Інтервал	[61—69)	[69—77)	[77—85)	[85—99]
p_j	$\frac{2}{15}$	$\frac{6}{15}$	$\frac{5}{15}$	$\frac{2}{15}$

Розрахуємо H_m і R , наприклад, для дози глюкози 1333 мг/кг. За даними табл. 1.11 знаходимо

$$(y_{i \max})_{\max} = 91 \text{ мг\%}; (y_{i \max})_{\min} = 61 \text{ мг\%}.$$

Число станів K розраховується за формулою

$$K = E\left(\frac{91 - 61}{10}\right) + 1 = 4.$$

Величина інтервалу у цьому разі дорівнює точності методики, тобто 10 мг%. Відносні частоти p_j розраховуємо за формулою

$$p_j = \frac{m_j}{n}, j = 1, \dots, K,$$

де m_j — число значень $y_{i \max}$, що потрапляють в j -й інтервал; n — число вимірювань. Для розглянутого випадку $K = 4$ і $n = 15$.

Результати розрахунку величин інтервалів і відносних частот наведені у табл. 1.13.

Максимальна неоднозначність або складність системи вуглеводного обміну за показником $y_{i \max}$ для дози глюкози 1333 мг/кг

$$H_m = \lg 4 = 0,602.$$

Неоднозначність системи (формула 1.4.3)

$$H = -(p_1 \lg p_1 + p_2 \lg p_2 + p_3 \lg p_3 + p_4 \lg p_4) = 0,3723.$$

Відносна організація системи (формула 1.4.6)

$$R = 1 - \frac{H}{H_m} = 0,392.$$

Аналогічно розраховуємо параметри H_m і R для усіх доз глюкози (табл. 1.11). Результати розрахунку наведені у табл. 1.14. Зіставивши значення H_m та R з класифікаційною діаграмою (див. рис. 1.22), одержимо:

- за складністю — це проста система;
- за більшістю значень відносної організації — це детермінована система.

Таблиця 1.14. Значення H_m та R

Параметр	Доза глюкози, мг/кг					
	33	333	666	1333	2000	2666
H_m	0,301	0,477	0,602	0,602	0,602	0,602
R	0,278	0,482	0,324	0,392	0,355	0,284

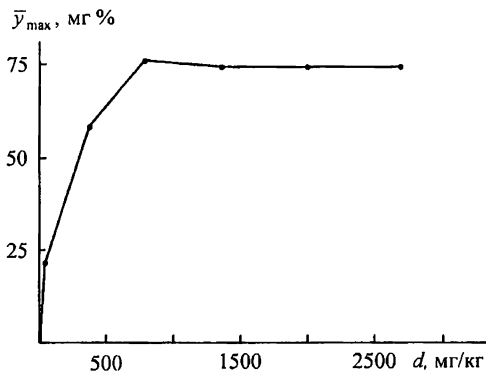
А це означає, що можна знайти функціональну залежність максимального відхилення рівня цукру від норми $\bar{y}_{\max}$ як функцію дози глюкози (d), наприклад, у класі алгебраїчних моделей.

Вибір структури шуканої функції. Перш за все побудуємо графік $\bar{y}_{\max} = f(d)$ за даними табл. 1.12 як необхідний етап усвідомлення результатів експерименту (рис. 1.23). Проаналізувавши графік можна стверджувати, що даний показник ($\bar{y}_{\max}$) не змінюється лінійно від дози (d), а має відповідну границю. Графік цієї функції може бути описаний експоненціальною залежністю виду

$$\bar{y}_{\max} = (\bar{y}_{\max})_{\max} (1 - e^{-ad}), \quad (1.4.9)$$

де $(\bar{y}_{\max})_{\max}$ — граничне значення $\bar{y}_{\max}$; a — показник експоненти.

Ідентифікація параметрів моделі. Математична модель (1.4.9) має два невідомих: $(\bar{y}_{\max})_{\max}$ та a , які можна визначити за даними табл. 1.12, використовуючи, наприклад, *метод найменших квадратів*. Відповідно до цього методу параметри деякої функції, що описує процеси, які досліджуються, мають бути такими, щоб сума квадратів відхилень теоретичних значень функції від експериментальних була мінімальною. У даному випадку розглянемо інший придатний метод визначення невідомих. Так, аналіз графіка (рис. 1.23) дає можливість відразу визначити $(\bar{y}_{\max})_{\max}$. Згідно з графіком останні чотири дози глюкози (666, 1333, 2000 і 2666 мг/кг) дають приблизно однакові значення $\bar{y}_{\max}$. Тому за грани-

Рис. 1.23. Графік залежності $\bar{y}_{\max} = f(d)$

цю функціональної залежності можна взяти середнє значення максимального відхилення рівня цукру у крові від норми для цих чотирьох точок

$$(\bar{y}_{\max})_{\max} = \frac{80,44 + 74,9 + 74,78 + 74,8}{4} \approx 76 \text{ (мг\%)}.$$

Крутість експоненціальної залежності (1.4.9) — показник a — визначаємо за даними двох доз глюкози ($d = 33$ мг/кг і $d = 333$ мг/кг), що не використовувались для визначення $(\bar{y}_{\max})_{\max}$.

Згідно з формулою (1.4.9)

$$a = \frac{\ln \frac{76}{76 - \bar{y}_{\max}(d)}}{d};$$

для $d = 33$ мг/кг $a_1 = 0,00975$; для $d = 333$ мг/кг $a_2 = 0,00345$.

За значення показника a беремо середнє значення a_1 та a_2 .

Шукана функціональна залежність становить

$$\bar{y}_{\max} = 76(1 - e^{-0,0066d}). \quad (1.4.10)$$

У табл. 1.15 наведено експериментальні $(\bar{y}_{\max}^{\text{екс}})$ та теоретичні $(\bar{y}_{\max}^{\text{т}})$, розраховані за формулою 1.4.10, значення та похибка моделювання (Δ).

Отже, розглянуто технологію синтезу математичної моделі залежності максимального відхилення рівня цукру у крові від норми у разі дії різних доз глюкози. При цьому:

- ідентифікація класу моделі здійснена за класифікаційною діаграмою з попереднім розрахунком складності та відносної організації за даним показником;

Т а б л и ц я 1.15. Зіставлення експериментальних даних з результатами моделювання

Показник	Доза, мг/кг					
	33	333	666	1333	2000	2666
$\bar{y}_{\max}^{\text{екс}}$	21,1	51,73	80,44	74,9	74,78	74,8
$\bar{y}_{\max}^{\text{т}}$	17,87	67,56	75,06	75,99	76	76
Δ , %	29,5	30,6	6,7	1,4	1,6	1,6

Таблиця 1.16. Експериментальні дані середньої тривалості життя щурів для різних доз бензпірену

Доза, мг/кг	Контроль	0,005	0,02	0,1	0,5	2,5	25
Тривалість життя, міс	27,1	27	27,75	20,5	20,7	21,7	19,3

• ідентифікація структури моделі (вид алгебраїчної функції) — на основі закономірності зміни показника, що вивчається (аналіз графіка);

• ідентифікація параметрів моделі — з використанням характерних точок, а саме значення $(\bar{y}_{\max})_{\max}$ за поведінкою графіка.

Розглянемо ще на одному прикладі вибір структури математичної моделі у класі алгебраїчних функцій з використанням фізіологічних закономірностей функціонування біосистеми. Зауважимо, що ідентифікацію класу моделі для цього прикладу опускаємо.

Задача: синтезувати функціональну залежність середньої тривалості життя експериментальних тварин від дози канцерогенної речовини, що діє на організм і викликає появу ракових пухлин.

Для синтезу математичної моделі використовуємо дані середньої тривалості життя щурів, що загинули від раку, яким однократно інтратрахеально було введено різні дози бензпірену (табл. 1.16).

Вибір структури моделі. Перш ніж зупинитися на тій чи іншій структурі алгебраїчної моделі (вид функції), наведемо деякі особливості залежності середньої тривалості життя (T) від дози:

• зі збільшенням дози бензпірену середня тривалість життя зменшується;

• практично це зменшення є монотонним;

• за нульової дози середня тривалість життя дорівнює тривалості життя контрольної групи (T_K), тобто $T(d=0) = T_K$;

• навіть дуже великі дози не зводять тривалість життя до нуля;

• мінімальне значення тривалості життя не може бути меншим за латентний час (T_d) прояву дії канцерогену в організмі та час життя тварин, впродовж якого розвивається ракова пухлина, тобто $T(d \rightarrow \infty) \geq T_d$.

Розглянемо, як зазначені особливості можуть вплинути на вибір структури математичної моделі $T = f(d)$.

Модель $T = f(d)$ Блюма і Дракрі. Американські вчені Блум і Дракрі запропонували використовувати таку залежність:

$$dT^n = C \text{ або } T^n = \frac{C}{d}, \quad (1.4.11)$$

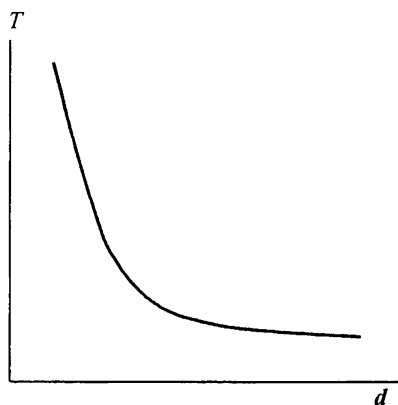


Рис. 1.24. Графік функції (1.4.11)

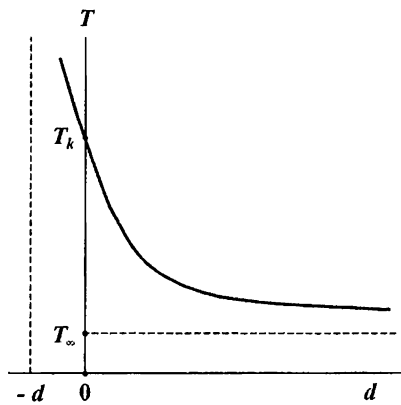


Рис. 1.25. Графік функції (1.4.12)

де d — доза канцерогену; T — середня тривалість життя; n , C — константи, що визначаються за експериментальними даними.

Графік цієї функції — рівнобічна степенева гіпербола (рис. 1.24), причому при $d = 0$ $T \rightarrow \infty$, а при $d \rightarrow \infty$ $T \rightarrow 0$. Отже, структура алгебраїчної моделі (1.4.11) задовольняє лише першим двом особливостям залежності, що досліджується. За малих і великих доз канцерогену ця модель дає великі похибки.

Модифікована модель Блюма і Дракрі. Щоб задовольнити усім особливостям залежності $T = f(d)$, доцільно модифікувати підхід американських вчених і розглядати таку степеневу гіперболу:

$$(T - T_{\infty})^n = \frac{C}{d + d_0}, \quad (1.4.12)$$

де T_{∞} , C , n , d_0 , T — константи, що визначаються за експериментальними даними.

Графік цієї функції наведено на рис. 1.25.

Така структура моделі дає змогу задовольнити за рахунок введення величини d_0 третій особливості, а саме, якщо $d = 0$, гіпербола перетне вісь ординат у точці, що відповідає тривалості життя контрольної групи T_k . За рахунок введення T_{∞} задовольняються четверта та п'ята особливості залежності $T = f(d)$.

Експоненціальна структура моделі також задовольняє усім особливостям залежності, що досліджується:

$$T = Ce^{-ad} + P, \quad (1.4.13)$$

причому константи C і P можна виразити через T_k і T_n , використовуючи третю та п'яту особливості: при $d = 0$ $T = T_k$; при $d \rightarrow \infty$ $T = T_n$.

Тоді вираз (1.4.13) має вигляд

$$T = (T_k - T_n) e^{-ad} + T_n, \quad (1.4.14)$$

де T_n , a — константи, що визначаються за експериментальними даними.

Для усіх структур алгебраїчних моделей (1.4.11, 1.4.12, 1.4.14) за експериментальними даними були знайдені невідомі константи. Одержані такі моделі:

за формулою (1.4.11):

$$\ln d + 15,05 \ln T = 45,1; \quad (1.4.15)$$

за формулою (1.4.12):

$$\ln(d + 1) + 0,17 \ln(T - 19) = 0,359; \quad (1.4.16)$$

за формулою (1.4.13):

$$T = 8,157 e^{-6,627d} + 19. \quad (1.4.17)$$

Найкращий збіг з експериментальними даними дають моделі (1.4.16) та (1.4.17). Щодо математичної моделі (1.4.15), то у діапазоні малих ($d < 0,005$ мг/кг) і достатньо великих доз канцерогену вона дає велику похибку. Так, наприклад, для $d = 0,001$ мг/кг тривалість життя за даною формулою $T = 31,7$ міс перевищує навіть тривалість життя контрольної групи тварин.

Таким чином, на підставі розглянутих розв'язків задач можна стверджувати, що знання фізіологічних закономірностей функціонування біосистеми відіграють неабияку роль у виборі структури алгебраїчних моделей.

Завершуючи цей підрозділ, розглянемо деякі прийоми ідентифікації параметрів за характерними точками.

Нехай дана функція

$$y = y_m (1 - e^{-kx}),$$

де y_m , k — невідомі.

Характерною точкою у даному випадку є асимптота $y_\infty = y_m$. Якщо вона визначається на підставі аналізу експериментального графіка, то для визначення коефіцієнта k можна взяти експеримен-

тальну точку (x_1) на інтервалі крутого зростання експоненти. Тоді

$$k = \frac{\ln \frac{y_m}{y_m - y(x_1)}}{x_1}.$$

Якщо асимптота невідома, то визначити показник експоненти k можна в такий спосіб. Беремо дві експериментальні точки

$$x = x_1 \text{ і } x = 2x_1.$$

Цим точкам відповідають функції

$$y_1 = y_m(1 - e^{-kx_1});$$

$$y_2 = y_m(1 - e^{-2kx_1}) = y_m(1 - e^{-kx_1})(1 + e^{-kx_1}).$$

Поділимо y_2 на y_1 :

$$\frac{y_2}{y_1} = 1 + e^{-kx},$$

звідси

$$k = \frac{1}{x_1} \ln \frac{y_2}{y_2 - y_1}.$$

Знаючи параметр k , знаходимо параметр y_m за будь-якою експериментальною точкою або методом найменших квадратів.

Доволі часто дані експерименту допомагають відразу визначити деякі параметри алгебраїчних моделей і тим самим зменшити число невідомих.

1.4.4. Інформаційні технології синтезу динамічних моделей біосистем

Один із поширених методів інформаційних технологій в біології та медицині базується на теорії диференціальних рівнянь. Саме методи теорії диференціальних рівнянь використовуються при синтезі математичних моделей динамічних режимів біологічних систем. Так, для опису функціонування біосистем застосовується теорія лінійних диференціальних рівнянь, для опису функціонування біосистем за одним показником — диференціальні рівняння першого або другого порядку, при синтезі математичних моделей, що описують динаміку багатьох показників, використовуються системи лінійних диференціальних рівнянь. У разі конкретного моделюван-

ня застосовується увесь спектр формальних методів розв'язування диференціальних рівнянь, у тому числі методи обчислювальної математики.

Відомо, що поведінка біосистем у динаміці є доволі складною та настільки багатогранною, що математичні моделі, які базуються на лінійних диференціальних рівняннях, можуть вважатися лише першим наближенням моделювання. Для функціонування біосистем характерним є єдність структури та функції. І тоді, коли це треба відобразити, часто (а в подальшому для одержання нового знання все частіше) доводиться використовувати способи опису форми різних структур (органа, судин) і розподілу за структурами тих змінних (концентрації, потенціалу, тиску), що визначають функціональний стан біосистем. У цьому разі застосовується теорія диференціальних рівнянь у частинних похідних.

Умовно можна виділити два основних напрями застосування диференціальних рівнянь у частинних похідних розв'язку задач біологічної та медичної спрямованості.

Перший пов'язаний зі створенням математичної теорії біологічних явищ, в основі яких лежать фізичні процеси (дифузія, теплопровідність та ін.) — верхній рівень усвідомлення тріади «дані—інформація—знання». Ілюстрацією цього напрямку є застосування диференціальних рівнянь у частинних похідних для опису поширення пульсових хвиль у кровоносних судинах, дифузії кисню та інших речовин у клітинах та інші явища.

Другий пов'язаний з використанням диференціальних рівнянь у частинних похідних для кількісного опису біологічних процесів, які хоч і мають деяку аналогію з певними фізичними процесами, однак, по суті, є біологічними. Цей напрям можна ілюструвати прикладами теорії запальних процесів.

Розглянемо лінійні диференціальні рівняння першого та другого порядків, розв'язок цих рівнянь з їх графічною інтерпретацією. Графічна інтерпретація розв'язків важлива при переході від графічного аналізу експериментальних даних до їх аналітичного виразу, тобто на етапі вибору структури математичної моделі у класі диференціальних рівнянь.

Поняття про диференціальні рівняння. Диференціальним рівнянням називається рівняння, що містить похідні невідомої функції або декількох невідомих функцій. Якщо невідомі функції залежать від одного аргументу, то диференціальне рівняння називається звичайним, якщо від декількох — то *диференціальним рівнянням у частинних похідних*.

Загальний вигляд диференціального рівняння з однією невідомою функцією такий:

$$\Phi(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0,$$

де x — аргумент; y — невідома функція; $y', y'', \dots, y^{(n)}$ — похідні.

Порядком диференціального рівняння називається порядок найвищої похідної, що входить у нього.

Диференціальні рівняння доцільно використовувати, коли біологічні та медичні явища і процеси, що досліджуються, описуються гладкими функціями та коли при моделюванні цих явищ і процесів необхідно враховувати такі величини, як швидкість та (або) прискорення зміни явища чи процесу.

Лінійні диференціальні рівняння першого порядку. Загальний вигляд диференціального рівняння першого порядку такий:

$$\Phi(x, y, y') = 0.$$

Рівняння, яке розв'язане відносно першої похідної, має вигляд:

$$y' = f(x, y).$$

Функція $y = \varphi(x)$ називається розв'язком диференціального рівняння, якщо останнє перетворюється на тотожність після підставлення у нього цієї функції.

Як відомо, основною задачею теорії диференціальних рівнянь є відшукання усіх його розв'язків. Розв'язок диференціального рівняння називається його *інтегралом*, а лінія, що відображає його графічно, — інтегральною лінією цього рівняння.

Застосування диференціальних рівнянь в біології та медицині має характерні особливості. Насамперед дослідник має справу з експериментальною кривою, що може бути інтегральною лінією якого-небудь диференціального рівняння, або являти собою сукупність інтегральних ліній декількох рівнянь. Таким чином, головною трудностю для розв'язку задач біологічної та медичної спрямованості на відміну від теорії диференціальних рівнянь є не пошук розв'язку відомого диференціального рівняння, а пошук самого диференціального рівняння, розв'язок якого відповідає виду експериментальної кривої.

Розглянемо лінійне диференціальне рівняння першого порядку. Його прийнято записувати таким чином:

$$y' + P(x)y = Q(x), \quad (1.4.18)$$

де $P(x)$ і $Q(x)$ — деякі неперервні функції x .

Якщо $Q(x) \neq 0$, то рівняння (1.4.18) називається неоднорідним, або рівнянням з правою частиною. Якщо $Q(x) = 0$, то рівняння (1.4.18) називається однорідним, або рівнянням без правої частини. В останньому разі змінні можна розділити і записати у вигляді

$$\frac{dy}{y} = -P(x) dx.$$

Загальний розв'язок цього рівняння

$$y = Ce^{-\int P(x) dx},$$

де C — стала інтегрування, яку можна визначити за початковим значенням змінної $y(x=0) = y_0$.

Загальний розв'язок неоднорідного рівняння (1.4.18) може бути записаний так:

$$y = \left[\int dx \cdot Q(x) e^{\int P(x) dx} + C \right] e^{-\int P(x) dx}, \quad (1.4.19)$$

де C — стала інтегрування.

Взагалі диференціальне рівняння першого порядку має нескінченну множину розв'язків. Як пройде конкретна інтегральна лінія залежить від вибору сталої інтегрування. Зазвичай її вибирають таким чином, щоб розв'язок пройшов через відоме значення функції y при нульовому значенні аргументу x .

Рівняння з $P(x) = 0$. Цей випадок визначає найпростіший вид лінійного диференціального рівняння першого порядку:

$$y' = Q(x). \quad (1.4.20)$$

Очевидно, що характер зміни y визначається сталою інтегрування C та видом функції $Q(x)$. Для $Q(x) = 0$ розв'язок має вигляд: $y = C$. У цьому разі швидкість зміни y за аргументом x дорівнює нулю, функція y не залежить від x та за будь-якого його значення дорівнює сталій величині.

Біологічна інтерпретація цього найпростішого випадку очевидна. Нехай в експерименті вимірюються декілька параметрів біосистеми за різних вхідних дій. Нехай серед змінних, що спостерігаються, одна залишається сталою. Її сталість можна трактувати як незалежність від інших змінних, вхідної дії та часу. Аналогом змінних біосистеми, що практично не залежить від часу, с, наприклад, середні значення норми будь-якого показника.

Нехай тепер права частина рівняння (1.4.20) $Q(x) \neq 0$. Розглянемо поведінку змінної y для деяких видів функції $Q(x)$.

1. $Q(x) = \text{const}$. Рівняння набуває вигляду

$$y^{(1)} = Q, \quad (1.4.21)$$

де Q — стала величина.

Розв'язок рівняння (1.4.21)

$$y = Qx + C \quad (1.4.22)$$

дає прямо пропорційну залежність між функцією та її аргументом. Стала інтегрування C знаходиться за початковими умовами.

У координатних осях x , y розв'язком є пряма лінія, що проходить через початок координат, якщо $y(x=0) = 0$, чи перетинає вісь ординат у точці $y = y_0$, якщо $y(x=0) = y_0$. У першому випадку $C = 0$ і розв'язок

$$y = Qx, \quad (1.4.23)$$

у другому — $C = y_0$ і розв'язок

$$y = Qx + y_0. \quad (1.4.24)$$

Зауважимо, що функція y зростає, якщо $Q > 0$, і зменшується, якщо $Q < 0$. Кут нахилу прямої лінії залежить від величини Q . Графіки цих функцій наведені на рис. 1.26.

Зазначимо, що при синтезі математичних моделей біосистем такого типу стало значення правої частини доволі часто є невідомою величиною, що визначається за експериментальними даними. Для обґрунтування можливості використання такої моделі достатньо бути упевненим у справедливості гіпотези про лінійну залежність між функцією та аргументом або в тому, що процес, який досліджується у біосистемі, змінюється зі сталою швидкістю. *Аналогами* таких процесів в організмі можуть виступати, наприклад, секреція гормонів у нормі чи розсмоктування речовин, що введені в організм внутрішньом'язово.

2. Для біологічних процесів лінійна залежність між функцією та аргументом зазвичай спостерігається не в усьому діапазоні зміни аргументу. Ця залежність, як правило, має складніший нелінійний характер. Зазвичай при зміні аргументу у великому діапазоні змінна біосистеми, що є його функцією, не може, наприклад, зростати необмежено. Для достатньо великих значень аргументу змінна у більшості випадків досягає деякої границі і далі залишається на цьому рівні. Однією з можливих математичних моделей такого процесу

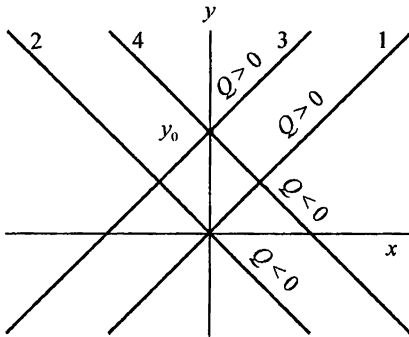


Рис. 1.26. Графіки розв'язків (1.4.23) — лінії 1 і 2 та (1.4.24) — лінії 3 і 4

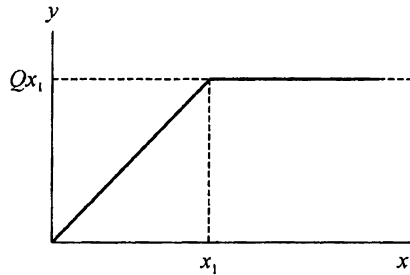


Рис. 1.27. Графік розв'язку (1.4.26)

може слугувати диференціальне рівняння (1.4.21), але з правою частиною, що діє на деякому інтервалі зміни аргументу

$$y' = \begin{cases} Q, & 0 \leq x \leq x_1; \\ 0, & x \geq x_1. \end{cases} \quad (1.4.25)$$

У разі нульових початкових умов розв'язок диференціального рівняння (1.4.25) для різних інтервалів зміни аргументу запи-сується у вигляді

$$y = \begin{cases} Qx, & 0 \leq x \leq x_1; \\ Q \cdot x_1, & x \geq x_1. \end{cases} \quad (1.4.26)$$

Графік розв'язку (1.4.26) наведено на рис. 1.27.

Рівняння з $P(x) = \text{const} > 0$.

1. Розглянемо випадок, коли $Q(x) = \text{const}$. Тоді дифе-ренціальне рівняння (1.4.18) має вигляд

$$y' + Py = Q. \quad (1.4.27)$$

Використовуючи загальний вид розв'язку (1.4.19), для сталих P і Q , дістаємо

$$y = Ce^{-Px} + \frac{Q}{P}, \quad (1.4.28)$$

де C — стала інтегрування, що визначається за початковими умовами.

За умовою $y(x=0) = 0$ знаходимо

$$C = -\frac{Q}{P}.$$

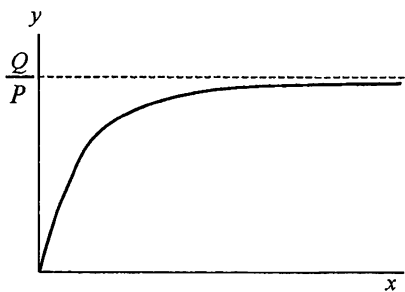


Рис. 1.28. Графік розв'язку (1.4.29)

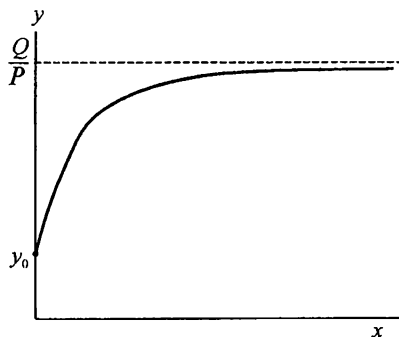


Рис. 1.29. Графік розв'язку (1.4.30)

Розв'язок (1.4.28) набуває вигляду

$$y = \frac{Q}{P}(1 - e^{-Px}). \quad (1.4.29)$$

Графік цього розв'язку є експонента, наведена на рис. 1.28. Крутість експоненти залежить від величини P .

2. Для ненульових початкових умов, тобто

$$y(x=0) = y_0,$$

розв'язок (1.4.28) набуває вигляду

$$y = \left(y_0 - \frac{Q}{P}\right)e^{-Px} + \frac{Q}{P}. \quad (1.4.30)$$

Графік цього розв'язку теж є експонента (рис. 1.29), яка починається зі значення y_0 і має границю, що дорівнює $\frac{Q}{P}$, тобто таку саму, як і для розв'язку (1.4.29). Крутість експоненти також залежить від величини P .

Такий вид рівняння першого порядку (1.4.27) часто застосовується при моделюванні великої кількості біологічних процесів. До таких процесів, наприклад, можна віднести допорогову зміну потенціалу мембрани нервової клітини, зміну концентрації глюкози у крові воротної вени та ін. У цих випадках аргументом є час, а функція Q характеризує зовнішню щодо біосистеми дію. Зазначимо, що гранична величина функції $\left(\frac{Q}{P}\right)$ характеризує граничні можливості біосистеми.

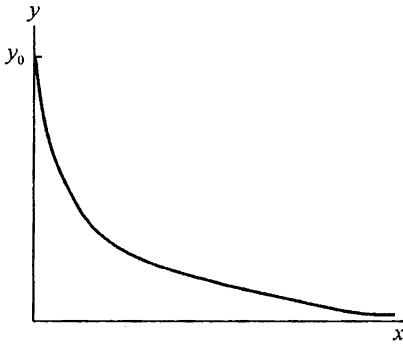


Рис. 1.30. Графік розв'язку (1.4.32)

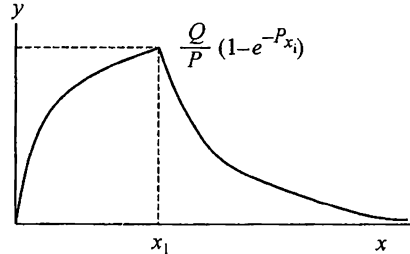


Рис. 1.31. Графік розв'язку (1.4.33)

Рівняння (1.4.27) широко використовується для синтезу математичних моделей біосистем, якщо треба описати перетворення деякої вхідної величини (наприклад, дози) на дію, адекватну для даної біосистеми. Процес такого перетворення пов'язаний з тим, що хоча вхідний сигнал (доза) в експерименті чи в реальних умовах може набувати якого завгодно великого значення, біологічні змінні практично завжди мають обмеження. Це перетворення дає змогу перевести необмежено зростаючий вхідний сигнал в адекватну дію, що в нашому випадку обмежена за дозою. У цьому разі аргументом виступає вхідний сигнал (доза), а функція визначає адекватну дію. У попередньому підрозділі (1.4.2) було розглянуто залежність максимального відхилення рівня цукру від норми як функцію дози глюкози (рис. 1.23). Графік цієї залежності відповідає графіку розв'язку (1.4.29) (рис. 1.28).

3. Розглянемо випадок, коли у рівнянні (1.4.27) права частина $Q = 0$. Рівняння має вигляд

$$y' + Py = 0. \quad (1.4.31)$$

У цьому випадку розв'язок є таким:

$$y = Ce^{-Px}.$$

Очевидно, що рівняння має сенс лише за ненульових початкових умов (бо за нульових початкових умов $y = 0$), тобто

$$y(x = 0) = y_0.$$

Тоді розв'язок

$$y = y_0 e^{-Px}. \quad (1.4.32)$$

Графічне зображення розв'язку (1.4.32) для $P > 0$ наведено на рис. 1.30. Така експоненціальна зміна функції характерна, наприклад, для повернення до початкового рівня біологічних змінних після закінчення дії збуджувального чинника.

4. Природним сполученням розглянутих вище двох випадків є рівняння виду (1.4.27) з «імпульсною» правою частиною

$$y' + Py = \begin{cases} Q, & 0 \leq x \leq x_1, \\ 0, & x \geq x_1. \end{cases}$$

Розв'язок цього рівняння для нульових початкових умов складається з двох гілок: зростаючої на інтервалі $0 \leq x \leq x_1$ та такої, що зменшується на інтервалі $x \geq x_1$:

$$y = \begin{cases} \frac{Q}{P}(1 - e^{-Px}), & 0 \leq x \leq x_1; \\ \frac{Q}{P}(1 - e^{-Px_1})e^{-P(x-x_1)}, & x \geq x_1. \end{cases} \quad (1.4.33)$$

Розв'язок на інтервалі $x \geq x_1$ одержано за умови, що

$$y(x_1) = \frac{Q}{P}(1 - e^{-Px_1})$$

для обох гілок розв'язку.

Графічне зображення розв'язку (1.4.33) представлено на рис. 1.31.

При синтезі математичних моделей біосистем дослідник доволі часто має справу саме з такою зміною біологічних змінних. Це пов'язане з тим, що в експерименті зазвичай вхідна дія є імпульсною. Такий характер динаміки має, наприклад, допорогова зміна потенціалу мембрани нервової клітини при зовнішньому подразненні, що діє впродовж певного часу (до моменту t_1). Очевидно, що в цьому випадку аргумент x відповідає часу, права частина Q — зовнішньому подразненню, а коефіцієнт p характеризує інерційні властивості нервової мембрани щодо електричного струму.

Розглянемо синтез динамічної математичної моделі на прикладі конкретної задачі.

Задача: провести синтез математичної моделі допорогової зміни потенціалу нервової клітини при внутрішньоклітинному подразненні імпульсом сталого струму.

Для розв'язання задачі використовуємо дані такого експерименту. При внутрішньоклітинному подразненні нервової клітини імпульсом сталого струму тривалістю 10 умов. од. реєструвався рівень деполяризації нервової клітини (u , мВ) у різні моменти часу (t ,

Таблиця 1.17. Експериментальні дані рівня деполяризації нервової клітини

t , умов. од.	0	2	5	10	15	20
u , мВ	0	3,5	6,1	8,1	2,6	0,7

умов. од.). Дані експерименту наведено у табл. 1.17. За цими даними побудуємо графік зміни деполяризації у часі (рис. 1.32). Згідно з рис. 1.32 динаміка функції $u(t)$ характеризується зростанням на інтервалі $0 \div 10$ (час дії імпульсу сталого струму) і зменшенням (поверненням до початкового стану) на інтервалі $t > 10$.

Для синтезу моделі використовуємо диференціальне рівняння типу (1.4.33)

$$u' + pu = \begin{cases} Q, & 0 \leq t \leq 10, \\ 0, & t \geq 10. \end{cases}$$

Його розв'язок

$$u = \begin{cases} A(1 - e^{-pt}), & 0 \leq t \leq 10; \\ A(1 - e^{-10p})e^{-p(t-10)}, & t \geq 10, \end{cases} \quad (1.4.34)$$

де $A = \frac{Q}{p}$.

Зазначимо, що коефіцієнт p характеризує внутрішні властивості біосистеми. Невідомі коефіцієнти A та p можна знайти за експериментальними даними табл. 1.17, використовуючи, наприклад, метод найменших квадратів. Одержана при цьому система трансцендентних рівнянь може бути розв'язана за допомогою будь-якого чисельного метода.

Для спрощення розв'язання задачі ідентифікації коефіцієнтів можна прийняти, що рішення (1.4.34) точно проходить через точку $u(t = 10) = 8,1$. Тоді запишемо

$$8,1 = A(1 - e^{-10p}).$$

Звідси

$$A = \frac{8,1}{1 - e^{-10p}}. \quad (1.4.35)$$

Розв'язок (1.4.34) з урахуванням (1.4.35)

$$u = \begin{cases} \frac{8,1}{1 - e^{-10p}}(1 - e^{-pt}), & 0 \leq t \leq 10; \\ 8,1(1 - e^{-p(t-10)}), & t \geq 10. \end{cases} \quad (1.4.36)$$

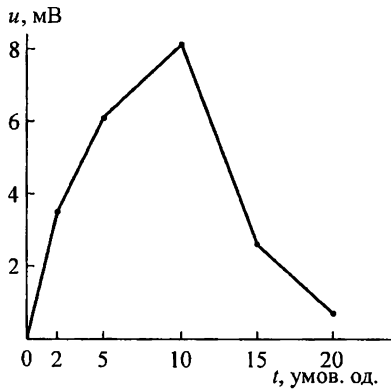


Рис. 1.32. Зміна деполяризації у часі

Невідомий коефіцієнт p можна знайти в такий спосіб. Для кожної експериментальної точки (за винятком значення ($u(t=10) = 8,1$), використовуючи відповідне розв'язання, знаходимо чотири значення коефіцієнта p та беремо його середнє. Так, для точок $t = 15$ та $t = 20$ з рішення (1.4.36) для інтервалу маємо

$$p = \frac{\ln \frac{8,1}{u_{\text{екс}}}}{t - 10},$$

де $u_{\text{екс}}$ — експериментальне значення. Для $t = 15$ $p = 0,227$; для $t = 20$ $p = 0,245$.

Використовуючи розв'язок (1.4.36) на інтервалі $0 \leq t \leq 10$, для кожної експериментальної точки ($t = 2$ і $t = 5$) можна одержати відповідні трансцендентні рівняння для знаходження p :

для $t = 2$ $8,1e^{-2p} - 3,5e^{-10p} = 4,6$; для $t = 5$ $8,1e^{-5p} - 6,1e^{-10p} = 2$.

Ці рівняння розв'язуються чисельним способом. У результаті маємо

для $t = 2$ $p = 0,253$; для $t = 5$ $p = 0,222$.

Знаходимо середнє значення $p = 0,253$. З формули (1.4.35) знаходимо A : $A = 8,935$.

Остаточна синтезована математична модель $u = f(t)$:

$$u = \begin{cases} 8,935(1 - e^{-0,237t}), & 0 \leq t \leq 10; \\ 8,1e^{-0,237(t-10)}, & t \geq 10. \end{cases}$$

У табл. 1.18 наведено експериментальні ($u_{\text{екс}}$) і теоретичні ($u_{\text{т}}$) значення рівня деполяризації нервової клітини та значення похибки (Δ).

Таким чином, синтезована математична модель з використанням диференціального рівняння першого порядку зі сталим коефіцієнтом та імпульсною правою частиною цілком прийнятна для дослідження допорогової зміни потенціалу нервової клітини у разі дії імпульсом сталого струму.

Лінійні диференціальні рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами. Загальний вигляд диференціального рівняння другого порядку:

$$F(x, y, y', y'') = 0.$$

Його можна розв'язати відносно старшої похідної:

$$y'' = f(x, y, y'). \quad (1.4.37)$$

Зазвичай початкові умови $y(x = x_0) = y_0$ і $y'(x = x_0) = y'_0$ визначають єдине розв'язання рівняння (1.4.37). Такий розв'язок називається частинним, а сукупність усіх частинних розв'язків називається загальним. Загальний розв'язок може бути представлений у вигляді деякої функції

$$y = \varphi(x, C_1, C_2),$$

де C_1, C_2 — сталі інтегрування, відповідний вибір яких визначає конкретну інтегральну лінію.

Лінійним диференціальним рівнянням другого порядку зветься рівняння

$$y'' + p(x)y' + q(x)y = R(x). \quad (1.4.38)$$

Якщо $R(x) = 0$, то рівняння (1.4.38) називається однорідним або без правої частини, якщо $R(x) \neq 0$ — неоднорідним або рівнянням з правою частиною.

Загальний розв'язок неоднорідного лінійного диференціального рівняння є сума будь-якого частинного його розв'язку та загального розв'язку відповідного однорідного рівняння.

Якщо у рівнянні (1.4.38) $p(x) = \text{const}$, $q(x) = \text{const}$, а $R(x)$ залежить лише від x або є сталою величиною, то рівняння

$$y'' + py' + qy = R(x) \quad (1.4.39)$$

називається лінійним диференціальним рівнянням другого порядку зі сталими коефіцієнтами.

Таблиця 1.18. Порівняння експериментальних та теоретичних даних рівня деполяризації нервової клітини

t , умов. од.	0	2	5	10	15	20
$U_{\text{екс}}$, мВ	0	3,5	6,1	8,1	2,6	0,7
$u_{\text{т}}$, мВ	0	3,373	6,203	8,1	2,477	0,757
Δ , %	0	3,6	1,67	0	4,73	8,14

Однорідне рівняння. Якщо $R(x) = 0$, одержимо рівняння

$$y'' + py' + qy = 0. \quad (1.4.40)$$

Його розв'язок шукається у вигляді

$$y = e^{rx}, \quad (1.4.41)$$

де r — стала величина, яку треба визначити.

Для визначення r треба двічі продиференціювати (1.4.41) і підставити в (1.4.40) y , y' та y'' . У результаті після скорочення на e^{rx} одержимо алгебраїчне рівняння

$$r^2 + pr + q = 0, \quad (1.4.42)$$

яке називається характеристичним. З нього визначається r . Відомо, що таке рівняння залежно від величин коефіцієнтів p і q може мати корені трьох видів:

- дійсні та різні;
- дійсні та рівні;
- комплексноспряжені.

Розв'язок рівняння (1.4.42) шукаємо за формулою

$$r_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} - q},$$

де вид коренів визначається значенням $\left(\frac{p^2}{4} - q\right)$.

Нехай $\frac{p^2}{4} - q > 0$. Тоді корені дійсні та різні, а загальний розв'язок диференціального рівняння (1.4.40) має вигляд

$$y = C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x}, \quad (1.4.43)$$

де C_1 і C_2 — сталі інтегрування, що визначаються за початковими умовами

$$y(x=0) = y_0; \quad y'(x=0) = y'_0.$$

Для визначення C_1 і C_2 продиференціюємо (1.4.43):

$$y' = r_1 C_1 e^{r_1 x} + r_2 C_2 e^{r_2 x}.$$

Використовуючи початкові умови, одержимо таку систему алгебраїчних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= C_1 + C_2 \\ y'_0 &= r_1 C_1 + r_2 C_2 \end{aligned} \right\}.$$

З цієї системи знаходимо C_1 і C_2 :

$$C_1 = -\frac{y'_0 - r_2 y_0}{r_2 - r_1}; \quad C_2 = \frac{y'_0 - r_1 y_0}{r_2 - r_1}.$$

Остаточний розв'язок (1.4.43) набуває вигляду

$$y = -\frac{y'_0 - r_2 y_0}{r_2 - r_1} e^{r_1 x} + \frac{y'_0 - r_1 y_0}{r_2 - r_1} e^{r_2 x}. \quad (1.4.44)$$

Залежно від значень y_0 і y'_0 графічне зображення розв'язку (1.4.44) буде різним. На рис. 1.33 наведено графічні зображення розв'язку (1.4.44) для різних початкових умов. На відміну від графіків розв'язків диференціальних рівнянь першого порядку (рис. 1.27—1.31) графіки рис. 1.32 завжди містять хоча б одну точку перегину.

Нехай $\frac{p^2}{4} - q = 0$. У цьому випадку маємо дійсні рівні корені: $r_1 = r_2 = -\frac{p}{2}$. Загальний розв'язок диференціального рівняння (1.4.40) за цією умовою запишеться так:

$$y = (C_1 + C_2 x) e^{-\frac{p}{2} x} \quad (1.4.45)$$

Сталі інтегрування за умов $y(x=0) = y_0$; $y'(x=0) = y'_0$ визначаються розв'язанням системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} y_0 = C_1, \\ y'_0 = C_2 - \frac{p}{2} C_1. \end{cases}$$

Звідси

$$C_1 = y_0; \quad C_2 = y'_0 + \frac{p}{2} y_0.$$

Загальний розв'язок (1.4.45) набуває вигляду

$$y = \left[y_0 + \left(y'_0 + \frac{p}{2} y_0 \right) x \right] e^{-\frac{p}{2} x}. \quad (1.4.46)$$

Графічне зображення розв'язку (1.4.46) для різних значень початкових умов практично не буде відрізнятися від попереднього випадку.

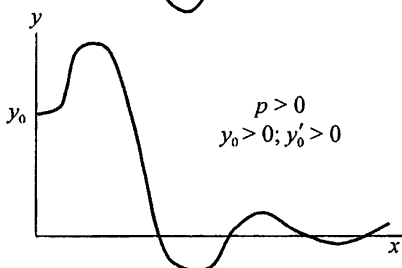
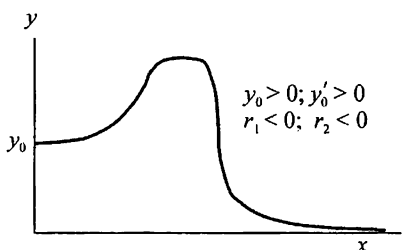
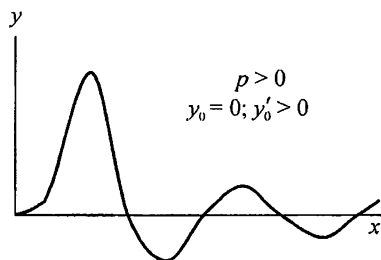
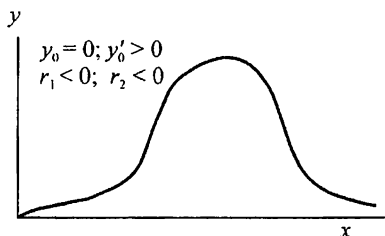
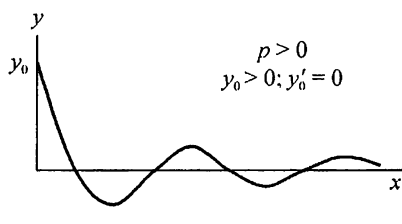
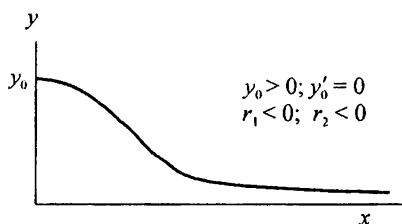


Рис. 1.33. Графіки розв'язку (1.4.44) для різних початкових умов

Рис. 1.34. Графіки розв'язку (1.4.48) для різних початкових умов

Нехай $\frac{p^2}{4} - q < 0$. У цьому разі характеристичне рівняння має комплексні спряжені корені

$$r_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \beta i,$$

де

$$\beta = \sqrt{q - \frac{p^2}{4}}.$$

Загальний розв'язок диференціального рівняння (1.4.40) для даного випадку запишеться таким чином:

$$y = e^{-\frac{p}{2}x} (C_1 \sin \beta x + C_2 \cos \beta x). \quad (1.4.47)$$

Сталі інтегрування за умов $y(x=0) = y_0$; $y'(x=0) = y'_0$ визначаються розв'язанням системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} y_0 = C_2 \\ y'_0 = -\frac{p}{2} C_2 + \beta C_1 \end{cases}$$

Звідси

$$C_1 = \frac{y'_0 + \frac{p}{2} y_0}{\beta}; \quad C_2 = y_0.$$

Розв'язок (1.4.47) набуває вигляду

$$y = e^{-\frac{p}{2}x} \left(\frac{y'_0 + \frac{p}{2} y_0}{\beta} \sin \beta x + y_0 \cos \beta x \right). \quad (1.4.48)$$

Графічне зображення розв'язку (1.4.48) залежить від значень початкових умов y_0 та y'_0 (рис. 1.34). Динаміка змінної y є коливальною для всіх випадків і зі зростанням x згасає. Швидкість згасання залежить від величини p . Процес періодичний з періодом

$$T = \frac{2\pi}{\beta}.$$

Неповне однорідне рівняння. Нехай $p = 0$, тоді рівняння (1.4.40) набуває вигляду

$$y'' + qy = 0. \quad (1.4.49)$$

Характеристичне рівняння:

$$r^2 + q = 0.$$

Корені характеристичного рівняння уявні:

$$r_{1,2} = \pm \beta i, \quad \beta = \sqrt{q}.$$

Загальний розв'язок рівняння (1.4.49):

$$y = C_1 \sin \beta x + C_2 \cos \beta x.$$

Для нульових початкових умов

$$y = \frac{y'_0}{\beta} \sin \beta x + y_0 \cos \beta x.$$

Графічний вид цього розв'язку — незгасаючі коливання.

Зазначимо, що біологічні змінні можуть мати незгасаючий коливальний характер у часі (наприклад, періодичні добові коливання значень норми різних параметрів або періодичні процеси у нервовій клітині).

Нехай $q = 0$. Тоді рівняння (1.4.40) має вигляд

$$y'' + py = 0. \quad (1.4.50)$$

Характеристичне рівняння

$$r^2 + pr = 0.$$

Корені характеристичного рівняння

$$r_1 = 0; \quad r_2 = -p.$$

Загальний розв'язок рівняння (1.4.50)

$$y = C_1 e^{-px} + C_2.$$

У разі ненульових початкових умов

$$y = \frac{y'_0}{p} (1 - e^{-px}) + y_0.$$

Цей розв'язок характеризується експоненціальною зміною функції y , яка з ростом x прагне до величини

$$\left(\frac{y'_0}{p} + y_0 \right).$$

Неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами (1.4.39). Загальний розв'язок рівняння $y'' + py' + qy = R(x)$ складається із загального розв'язку однорідного рівняння $y'' + py' + qy = 0$ і будь-якого частинного розв'язку неоднорідного рівняння. Загальні розв'язки однорідного рівняння розглянуто вище.

Частинний розв'язок неоднорідного рівняння шукається згідно з видом правої частини $R(x)$.

Нехай $R(x) = \text{const}$ і корені характеристичного рівняння дійсні та різні. У цьому випадку розв'язок неоднорідного рівняння (1.3.68) має вигляд

$$y = C_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 e^{\lambda_2 x} + \frac{R}{q}, \quad (1.4.51)$$

де $\frac{R}{q}$ — частинний розв'язок рівняння (1.4.51).

Для неоднорідного диференціального рівняння (1.4.39) початкові умови можуть бути як нульовими, так і ненульовими на відміну від однорідного, для якого необхідна наявність принаймні одного ненульового значення: $y_0 \neq 0$ або $y'_0 \neq 0$.

Сталі інтегрування C_1 і C_2 залежать від початкових умов. Для ненульових початкових умов маємо таку систему алгебраїчних рівнянь для визначення C_1 і C_2 :

$$\begin{cases} y_0 = C_1 + C_2 + \frac{R}{q}, \\ y'_0 = r_1 C_1 + r_2 C_2. \end{cases}$$

Розв'язок цієї системи

$$C_1 = -\frac{r_2}{r_1 - r_2} \left(y_0 - \frac{R}{q} - \frac{y'_0}{r_2} \right);$$

$$C_2 = \frac{r_1}{r_1 - r_2} \left(y_0 - \frac{R}{q} - \frac{y'_0}{r_1} \right).$$

Загальний розв'язок (1.4.51) набуває вигляду

$$y = -\frac{r_2}{r_1 - r_2} \left(y_0 - \frac{R}{q} - \frac{y'_0}{r_2} \right) e^{r_1 x} + \frac{r_1}{r_1 - r_2} \left(y_0 - \frac{R}{q} - \frac{y'_0}{r_1} \right) e^{r_2 x} + \frac{R}{q}. \quad (1.4.52)$$

Для нульових початкових умов $y_0 = 0$ і $y'_0 = 0$ розв'язок (1.4.52) є таким:

$$y = \frac{R}{q} \left(\frac{r_2}{r_1 - r_2} e^{r_1 x} - \frac{r_1}{r_1 - r_2} e^{r_2 x} + 1 \right). \quad (1.4.53)$$

Якщо $r_1 < 0$ і $r_2 < 0$, то розв'язки (1.4.52) і (1.4.53) з ростом x прагнуть до величини $\frac{R}{q}$. Графічне зображення розв'язку (1.4.53) наведено на рис. 1.35. Це S-подібна крива, що має границю $\frac{R}{q}$.

Нехай $R(x) = \text{const}$, корені характеристичного рівняння дійсні та рівні: $r_1 = r_2 = -\frac{p}{2}$. Загальний розв'язок для цього випадку

$$y = (C_1 + C_2 x) e^{-\frac{p}{2} x} + \frac{R}{q}.$$

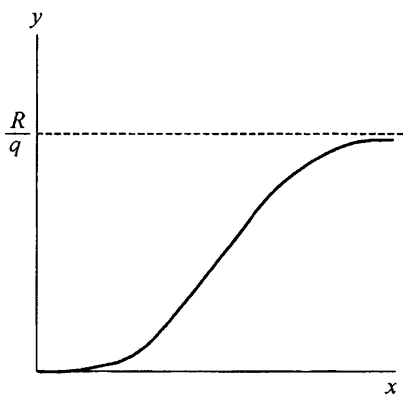


Рис. 1.35. Графік розв'язку (1.4.53)

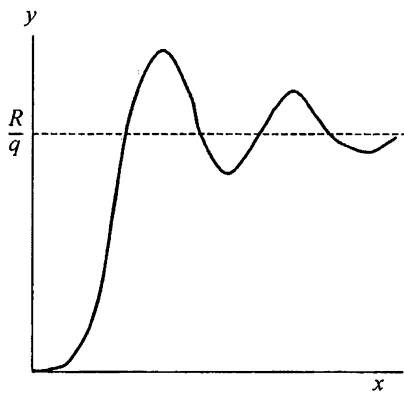


Рис. 1.36. Графік розв'язку (1.4.56)

Для нульових початкових умов

$$C_1 = -\frac{R}{q}; \quad C_2 = -\frac{p}{2} \frac{R}{q}.$$

Тоді

$$y = \frac{R}{q} \left[1 - \left(1 + \frac{p}{2} x \right) e^{-\frac{p}{2} x} \right]. \quad (1.4.54)$$

Графічний вигляд розв'язку (1.4.54) — це S -подібна симетрична крива, що прямує при $p > 0$ до величини $\frac{R}{q}$.

Нехай $R(x) = \text{const}$, корені характеристичного рівняння комплексноспряжені: $r_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \beta i$, де $\beta = \sqrt{q - \frac{p^2}{4}}$.

Загальний розв'язок рівняння (1.4.39) для цього випадку

$$y = e^{-\frac{p}{2} x} (C_1 \sin \beta x + C_2 \cos \beta x) + \frac{R}{q}. \quad (1.4.55)$$

Для ненульових початкових умов ($y_0 \neq 0$; $y'_0 \neq 0$)

$$C_1 = \frac{y'_0 + \frac{p}{2} \left(y_0 - \frac{R}{q} \right)}{\beta}; \quad C_2 = y_0 - \frac{R}{q}.$$

Тоді розв'язок (1.4.55) набуває вигляду

$$y = e^{-\frac{p}{2}x} \left[\frac{y'_0 + \frac{p}{2} \left(y_0 - \frac{R}{q} \right)}{\beta} \sin \beta x + \left(y_0 - \frac{R}{q} \right) \cos \beta x \right] + \frac{R}{q}.$$

Для нульових початкових умов

$$y = \frac{R}{q} \left[1 - \left(\frac{p}{2\beta} \sin \beta x + \cos \beta x \right) e^{-\frac{p}{2}x} \right]. \quad (1.4.56)$$

Графічне зображення розв'язку (1.4.56) для $p > 0$ наведено на рис. 1.36.

При дослідженні біосистем виникають завдання, пов'язані з вивченням відхилення біологічної змінної від норми під дією будь-якого зовнішнього чинника. Використання неоднорідного диференціального рівняння другого порядку дає змогу описати сталу зовнішню дію правою частиною рівняння, а різну динаміку біологічної змінної — різним сполученням початкових умов і різним видом коренів характеристичного рівняння. Так, нульові початкові умови дають можливість у «чистому вигляді» відобразити відхилення біологічної змінної від норми. В цьому випадку експериментальний матеріал, за яким визначаються коефіцієнти диференціального рівняння, має бути представлений у вигляді різниці між значенням змінної, що досліджується, у разі дії зовнішнього фактора та її значенням у нормі. При досліджуванні динаміки біологічної змінної в абсолютних одиницях значення норми треба вводити у початкові умови.

Випадки, що розглянуті вище, відповідають постійно діючому у часі на біосистему сталому зовнішньому сигналу, якщо час є незалежна змінна.

Диференціальне рівняння другого порядку з імпульсною правою частиною $R(t) = \text{const}$. Для біосистем характерна також короткотермінова дія сталого за величиною зовнішнього чинника. Такий випадок може бути відображений диференціальним рівнянням з імпульсною правою частиною:

$$y'' + py' + qy = \begin{cases} R, & 0 \leq t \leq \tau; \\ 0, & t \geq \tau, \end{cases} \quad (1.4.57)$$

де τ — час дії зовнішнього фактора.

На інтервалі $0 \leq t \leq \tau$ маємо неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку зі сталою правою частиною, розв'язок якого для різних коренів характеристичного рівняння розглянуто вище. На інтервалі $t \geq \tau$ маємо однорідне диференціальне рівняння з початковими умовами, що відповідають значенню розв'язку неоднорідного диференціального рівняння та його похідної на момент часу $t = \tau$, оскільки припинення дії зовнішнього фактора у момент $t = \tau$ не означає розриву у зміні функції y та її швидкості y' .

Диференціальне рівняння другого порядку з імпульсною правою частиною $R(t) \neq \text{const}$; $R = Pt$. Розглянемо випадок, коли зовнішній фактор, тобто права частина диференціального рівняння, є величиною, змінною у часі, та змінюється за лінійним законом. Лінійний закон зміни правої частини впливає лише на вид частинного розв'язку неоднорідного диференціального рівняння, яке у даному випадку шукається у вигляді лінійного поліному.

Покажемо процедуру пошуку розв'язку диференціального рівняння другого порядку з лінійним законом зміни правої частини на інтервалі $0 \leq t \leq \tau$ на конкретному біологічному прикладі. Зазначимо, що права частина при дослідженні біологічних змінних відображає специфіку дії зовнішнього фактора — метод введення речовини в організм. Наприклад, швидка ін'єкція речовини — короткочасна дія сталою за величиною зовнішнього фактора; введення в кров речовини зі сталою швидкістю чи перебування організму в атмосфері, що містить шкідливу речовину, — лінійна зміна правої частини.

Приклад. Нехай організм знаходиться в атмосфері, що містить чотирихлористий вуглець (CCl_4) упродовж 4 год. Отже, речовина надходить в організм дихальними шляхами. Зрозуміло, що вона накопичується впродовж часу дії, оскільки концентрація в атмосфері підтримується сталою.

Зміна біологічної змінної, що реєструється (x), підпорядковується диференціальному рівнянню

$$\frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + b_0x = \begin{cases} Pt, & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & t \geq \tau \end{cases}, \quad (1.4.58)$$

де $\tau = 4$ год.

Це рівняння адекватно описує реакцію організму у відповідь на дію зовнішнього фактора. Невідомими коефіцієнтами моделі (1.4.58) є b , b_0 та P .

Для скорочення числа невідомих будемо вважати, що корені характеристичного рівняння дійсні та рівні, тобто

$$b^2 = 4b_0 \text{ і } r_1 = r_2 = -0,5b.$$

Для інтервалу $0 \leq t \leq \tau$ розв'язок виглядає так:

$$x = e^{-0,5bt}(C_1 + C_2 t) + X,$$

де X — частинний розв'язок диференціального рівняння; C_1, C_2 — сталі інтегрування.

Частинний розв'язок шукаємо за видом правої частини:

$$X = A + Bt. \quad (1.4.59)$$

Коефіцієнти A і B визначаємо в такий спосіб: знаходимо першу і другу похідні x з виразу (1.4.59)

$$X' = B; \quad X'' = 0,$$

підставляємо X, X' та X'' в (1.4.58) для інтервалу $0 \leq t \leq \tau$

$$0 + bB + b_0A + b_0Bt = Pt,$$

прирівнюємо коефіцієнти при рівних степенях t та одержуємо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} bB + b_0A = 0, \\ b_0B = P. \end{cases}$$

Звідси

$$B = \frac{P}{b_0} = \frac{4P}{b^2}; \quad A = -\frac{bB}{b_0} = -\frac{16P}{b^3}.$$

Частинний розв'язок (1.3.88) набуває вигляду

$$x = -\frac{16P}{b^3} + \frac{4P}{b^2}t.$$

Загальний розв'язок диференціального рівняння (1.4.58) на інтервалі $0 \leq t \leq \tau$ визначаємо за формулою

$$X = e^{-0,5bt}(C_1 + C_2 t) - \frac{16P}{b^3} + \frac{4P}{b^2}t. \quad (1.4.60)$$

Сталі інтегрування C_1 і C_2 шукаємо з початкових умов — $x(0) = 0$; $x'(0) = 0$. Для цього з виразу (1.4.60) знаходимо

$$x' = e^{-0,5bt}[C_2(1 - 0,5bt) - 0,5bC_1] + \frac{4P}{b^2}.$$

Система рівнянь для знаходження C_1 і C_2 :

$$\begin{cases} 0 = C_1 - \frac{16P}{b^3}, \\ 0 = -0,5bC_1 + C_2 + \frac{4P}{b^2}. \end{cases}$$

Звідси

$$C_1 = \frac{16P}{b^3}; \quad C_2 = \frac{4P}{b^2}.$$

Розв'язок (1.4.60) набуває вигляду

$$x = e^{-0,5bt} \left(\frac{16P}{b^3} + \frac{4P}{b^2} t \right) - \frac{16P}{b^3} + \frac{4P}{b^2} t, \quad 0 \leq t \leq \tau.$$

Перша похідна:

$$x' = \frac{4P}{b^2} - e^{-0,5bt} \left(\frac{4P}{b^2} + \frac{2P}{b} t \right), \quad 0 \leq t \leq \tau.$$

На інтервалі $t \geq \tau$ маємо однорідне диференціальне рівняння з початковими умовами, що відповідають значенням розв'язку неоднорідного диференціального рівняння та його похідної на момент $t = \tau$:

$$\left. \begin{aligned} x(\tau) &= e^{-0,5b\tau} \left(\frac{16P}{b^3} + \frac{4P}{b^2} \tau \right) - \frac{16P}{b^3} + \frac{4P}{b^2} \tau, \\ x'(\tau) &= \frac{4P}{b^2} - e^{-0,5b\tau} \left(\frac{4P}{b^2} + \frac{2P}{b} \tau \right). \end{aligned} \right\} \quad (1.4.61)$$

Розв'язок однорідного диференціального рівняння та його похідної:

$$\left. \begin{aligned} x &= e^{-0,5bt} (C_3 + C_4 t), \quad t \geq \tau, \\ x' &= -0,5be^{-0,5bt} (C_3 + C_4 t) + e^{-0,5bt} \cdot C_4, \quad t \geq \tau. \end{aligned} \right\} \quad (1.4.62)$$

Сталі інтегрування C_3 і C_4 знаходять, використовуючи початкові умови (1.4.61).

На закінчення зазначимо, що зовнішня дія може мати і складніший характер. Проте вид зовнішньої дії, як розглянуто вище, впливає лише на частинний розв'язок неоднорідного диференціального рівняння.

Контрольні запитання

1. Що є об'єктом, предметом і методом біологічної та медичної кібернетики?
 2. Що вивчає біологічна інформатика?
 3. Дайте визначення інформаційних технологій в біології та медицині.
 4. Яка головна ідея інформаційних технологій?
 5. Що являє собою інформаційно-структурна модель?
 6. У чому сутність методу інфотомування?
 7. Що таке кореляційний портрет?
 8. Які існують методи уніфікації різноякісної інформації?
 9. У чому полягає метод ієрархічної згортки?
 10. Які існують методи визначення вагових коефіцієнтів у лінійновиважених сумах?
 11. Як розподіляються математичні моделі за глибиною відображення біологічних властивостей?
 12. У чому сутність класифікаційної діаграми?
 13. Назвіть необхідні етапи синтезу математичних моделей біосистем.
 14. Який математичний апарат використовується для синтезу динамічних моделей біосистем?
 15. Які три випадки можуть виникнути під час розв'язання однорідних лінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку зі сталими коефіцієнтами?
-

ЧАСТИНА 2 _____

Моделювання як основа синтезу інформаційних технологій та систем

ЕВОЛЮЦІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ НЕРВОВОЇ КЛІТИНИ

Проблеми вибору виду диференціального рівняння чи системи рівнянь є досить складною і залежить від постановки завдання та мети дослідження. У цьому розділі розглядається вплив на вид диференціальних рівнянь, що описують один і той самий біологічний процес, різних гіпотез, результатів експериментів, фізико-хімічних закономірностей та законів, а також можливостей диференціальних рівнянь відображати один і той же процес з різною біологічною глибиною. Зазначимо, що доволі часто підвищення біологічної змістовності дає змогу зменшити математичну складність моделі.

Нагадаємо, що математичні моделі біопроцесів за глибиною відображення в них властивостей біосистеми, що досліджується, поділяються на:

- функціональні, які апроксимують вихідну функцію залежно від вхідного сигналу, не розкриваючи суті біопроцесу;
- структурно-функціональні, що враховують взаємодію змінних всередині біосистеми;
- моделі, що враховують фізико-хімічні закономірності та структурні особливості біосистем.

У цьому розділі на прикладі моделювання динаміки потенціалу нейрона розглянуто моделі різних видів.

2.1.1. Фізіологічні передумови моделювання

Нервова клітина є структурною та функціональною одиницею нервової системи. Вона складається з клітинного тіла (соми) та відростків. Серед останніх розрізняють дендрити та аксон. По дендриту збудження надходить до клітини, а по аксону поширюється до ін-

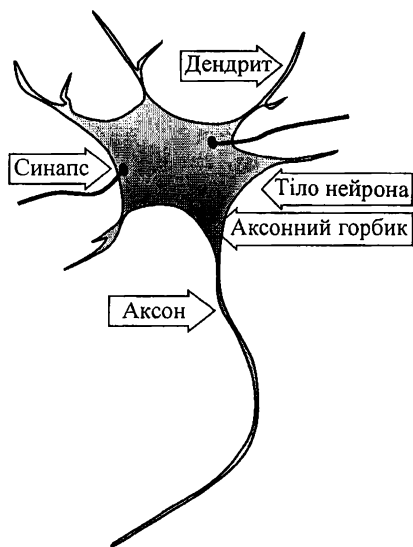


Рис. 2.1. Нервова клітина

ших структур. Тіло клітини та її відростки вкриті синаптичними закінченнями інших клітин — синапсами. Синапс визначають як сукупність синаптичної бляшки, субсинаптичної мембрани і синаптичної щілини. Структурним елементом нервової клітини є аксонний горбик — початкова ділянка аксона. На рис. 2.1 схематично показано нервову клітину з її структурними елементами.

У вивченні структури та функції нервової клітини уже багато зроблено. У великій кількості експериментів досліджено збудження аксона, нервового волокна, цілісної клітини. Вивчено вплив на процес збудження клітини різних речовин

і адекватних подразників — електричних стимулів. На підставі даних нейрофізіології побудовано достатньо ефективну теорію зміни потенціалу мембрани під час дії різних зовнішніх сигналів, а саме іонну теорію збудження нервової клітини. Нейрофізіологи та нейроморфологи стверджують, що існує тісний зв'язок між структурними частинами клітини та їх функціональним призначенням. Щодо структурних характеристик нервової клітини, то зараз маємо відомості про форму та розмір соми клітини, довжину аксона, вид дендритів, структуру, форму та розміри синапсів, товщину нервової мембрани та її внутрішню структуру. Функціональні характеристики нервової клітини — це насамперед її системна функція — потенціал дії, наявність двох типів синапсів — збуджувальних і гальмівних, потенціал спокою, поріг збудження, наявність концентраційних градієнтів основних потенціалоутворювальних іонів.

Кінцевий результат діяльності клітини — генерація потенціалу дії — забезпечується різними механізмами. Це перш за все первинне перетворення потенціалів дії, що надходять на пресинаптичну мембрану, на виділення хімічного медіатора (для синапсів із хімічною передачею), який активує постсинаптичну мембрану. Потім виникає постсинаптичний потенціал (ПСП) (збуджувальний або гальмівний залежно від типу синапсу), що

поширюється по тілу клітини та сумується з іншими ПСП в аксонному горбку. Якщо сумарний ПСП перевищує поріг нервової клітини, виникає потенціал дії. При проходженні постсинаптичних потенціалів по мембрані клітини вони можуть взаємодіяти між собою за достатньо складними законами. Так, відомо, що взаємодія збуджувальних ПСП і гальмівних ПСП залежить від фази (зростання чи зменшення ПСП). У сумарному ПСП аксонного горбка відображаються всі випадкові процеси, яким піддаються первинні потенціали дії, що надійшли на пресинаптичну мембрану.

Таким чином, системна функція нервової клітини відповідає складності та організації середовища і будується на проміжних перетвореннях у процесі поширення ПСП по тілу клітини; а різні механізми електричного збудження у різних ділянках нервової клітини відображають певні особливості та функціонування цих ділянок. Слід зазначити, що для правильного розуміння явищ сумарної суми усіх синаптичних процесів і оцінки ролі синаптичної мембрани, треба насамперед проаналізувати природу постсинаптичних ефектів на рівні окремих синапсів: збуджувальних і гальмівних; закономірності перетворення ПСП у процесі їх поширення та сумарної з використанням методів інформаційних технологій, а саме математичного моделювання.

2.1.2. Функціональні моделі динаміки електричного потенціалу нейрона

Модель Х. Блейра. У 30-х роках ХХ ст. дослідники дістали можливість реєструвати зміну потенціалу нервової тканини. Було виявлено та досліджено підпорогову електротонічну реакцію нервової тканини. Це привернуло увагу фізіологів до динаміки розвитку збудження. У 1932 р. Х. Блейр дав математичну інтерпретацію розвитку збудження на основі зміни концентрації збуджувальних іонів. Він вважав, що швидкість зміни концентрації пропорційна потенціалу зовнішнього подразнення (V) і тим менша, чим більша концентрація (C) цих іонів. Формально це записується у вигляді неоднорідного диференціального рівняння першого порядку

$$\frac{dC}{dt} = kV - aC, \quad (2.1.1)$$

де k , a — сталі величини.

Розв'язок рівняння (2.1.1) за початкових умов $C(t=0) = C_0$ має вигляд:

$$C = \left(C_0 - \frac{kV}{a} \right) e^{-at} + \frac{kV}{a}. \quad (2.1.2)$$

Розв'язок (2.1.2) являє собою експоненту, що виходить з точки C_0 при $t = 0$ і прямує до величини $\frac{kV}{a}$ (причому $\frac{kV}{a} > C_0$).

Модель М. Рашевського. Слідом за Х. Блейром у 1933 р. М. Рашевський запропонував власну інтерпретацію двокомпонентної теорії збудження. Він вважав, що збуджувальним фактором для нервової тканини є різниця між поточним значенням концентрації збуджувальних і гальмівних іонів. Також він вважав, що амплітуда зовнішнього подразнення діє одночасно на швидкість зміни концентрації збуджувальних і гальмівних іонів і розглядав систему з двох рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = k_1V - a_1C_1, \\ \frac{dC_2}{dt} = k_2V - a_2C_2, \end{cases} \quad (2.1.3)$$

де C_1 і C_2 — концентрації відповідно збуджувальних і гальмівних іонів; k_1 , a_1 , k_2 , a_2 , — сталі величини.

Рівняння системи (2.1.3) розв'язуються незалежно. Їх розв'язки за початкових умов:

$$C_1(t=0) = C_{01}; \quad C_2(t=0) = C_{02}$$

мають вигляд:

$$\begin{cases} C_1 = \left(C_{01} - \frac{k_1V}{a_1} \right) e^{-a_1t} + \frac{k_1V}{a_1}, \\ C_2 = \left(C_{02} - \frac{k_2V}{a_2} \right) e^{-a_2t} + \frac{k_2V}{a_2}. \end{cases} \quad (2.1.4)$$

Потенціал мембрани (u) визначається різницею

$$u = C_1(t) - C_2(t) \quad (2.1.5)$$

М. Рашевський вважав, що збудження настає, коли значення потенціалу мембрани дорівнює пороговому.

Модель Хіла. У 1935 р. А. Хіл ускладнив міркування, пов'язані із взаємодією збуджувальних і гальмівних іонів. Він припустив, що зовнішнє подразнення діє на зміну концентрації збуджувальних іонів, а вже зміна їх концентрації впливає на зміну концентрації гальмівних іонів. Таким чином, за А. Хілом зовнішнє подразнення впливає на гальмівні іони не безпосередньо, а через систему збуджувальних іонів. Саме припущенням про послідовність впливу $V \rightarrow C_1 \rightarrow C_2$ міркування А. Хіла відрізняються від міркувань М. Рашевського ($V \rightarrow C_1$, $V \rightarrow C_2$). Ці міркування привели А. Хіла до такої системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} &= k_1 V - a_1 C_1, \\ \frac{dC_2}{dt} &= k_2 C_1 - a_2 C_2, \\ u &= C_1(t) - C_2(t). \end{aligned} \right\} \quad (2.1.6)$$

Розв'язок першого рівняння системи (2.1.6) не відрізняється від розв'язку C_1 (2.1.4). Щодо розв'язку другого рівняння системи (2.1.6), то воно має складніший характер, оскільки у його правій частині є член з $C_1(t)$, що має експоненціальний вигляд.

Рівняння потенціалу дії. Х. Блейр, М. Рашевський, А. Хіл майже одночасно застосували диференціальне рівняння першого порядку (чи систему із двох таких рівнянь) для опису зміни електричного потенціалу нервової тканини у відповідь на електричне подразнення. Це дало змогу описати процес пасивної (електротонічної) зміни потенціалу від моменту початку подразнення до моменту виникнення активної реакції — потенціалу дії. Зазначимо, що відображення процесу збудження, включаючи й потенціал дії, диференціальним рівнянням першого порядку зі сталими коефіцієнтами неможливо. Наблизитись до опису форми потенціалу дії можна за допомогою диференціального рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами та імпульсною правою частиною.

Розглянемо опис потенціалу дії за допомогою диференціального рівняння другого порядку. На рис. 2.2 наведено типову форму потенціалу дії нерва у відповідь на подразнення коротким імпульсом електричного струму. У даному випадку імпульс зовнішнього подразнення можна прийняти за праву частину моделі динаміки потенціалу дії (u) нерва. Час є незалежна змінна. Якщо шукати математичну модель, що апроксимує криву зміни потенціалу нерва, то

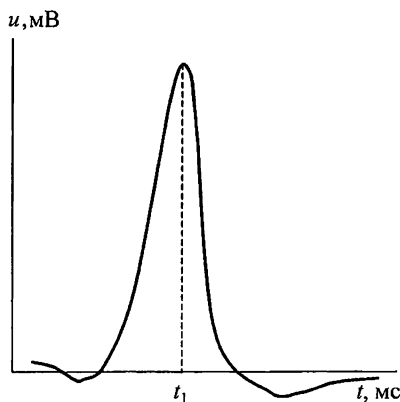


Рис. 2.2. Типова форма потенціалу дії нерва

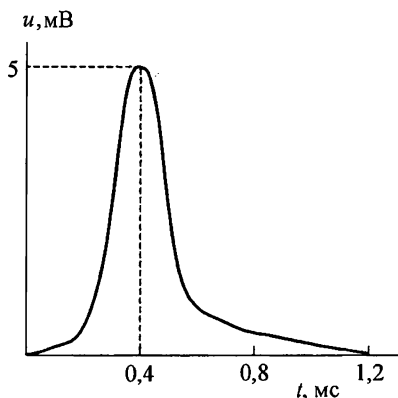


Рис. 2.3. Потенціал дії сідничного нерва жаби

математичною моделлю мінімальної складності є диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + a_1 \frac{du}{dt} + a_0 u = \begin{cases} V, & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & t \geq \tau; \end{cases}$$

$$u(t=0) = 0; \quad u'(t=0) = 0, \quad (2.1.7)$$

де u — потенціал нерва; V — перетворена амплітуда електричного імпульсу; τ — тривалість імпульсу; a_1, a_0 — коефіцієнти розмірності, які необхідно визначити.

Потенціал дії визначається розв'язком неоднорідного рівняння під час дії імпульсу ($0 \leq t \leq \tau$) і розв'язком однорідного рівняння на інтервалі $t \geq \tau$.

Щоб зменшити число невідомих, будемо вважати, що характеристичне рівняння має рівні корені, тобто $a_0 = 0,25 a_1^2$, а корені

$$r = r_1 = r_2 = -0,5a_1.$$

Тоді розв'язки і похідні запишуться таким чином:

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= C_1 e^{rt} + t C_2 e^{rt} + A, \\ u'(t) &= r C_1 e^{rt} + C_2 e^{rt} + r t C_2 e^{rt}, \end{aligned} \right\} \quad (2.1.8)$$

$$0 \leq t \leq \tau$$

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= C'_1 e^{rt} + t C'_2 e^{rt}, \\ u'(t) &= r C'_1 e^{rt} + C'_2 e^{rt} + r t C'_2 e^{rt}, \end{aligned} \right\} \quad (2.1.9)$$

$$t \geq \tau$$

де $A = \frac{V}{a_0}$ — частинний розв'язок; C_1, C_2, C'_1, C'_2 — сталі інтегрування.

Для визначення C_1 і C_2 використовуємо нульові початкові умови, для визначення C'_1 і C'_2 — рівність розв'язків і похідних (2.1.8) та (2.1.9) на момент $t = \tau$. Одержимо такі системи:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= C_1 + A, \\ 0 &= rC_1 + C_2; \end{aligned} \right\} \quad (2.1.10)$$

$$\left. \begin{aligned} (C_1 - C'_1)e^{r\tau} + \tau(C_2 - C'_2)e^{r\tau} + A &= 0, \\ r(C_1 - C'_1)e^{r\tau} + (C_2 - C'_2)e^{r\tau} + r\tau(C_2 - C'_2)e^{r\tau} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.1.11)$$

В результаті розв'язку цих систем одержимо:

$$\begin{aligned} C_1 &= -A; \quad C_2 = rA; \\ C'_1 &= A \left[(1 + r\tau)e^{-r\tau} - 1 \right]; \quad C'_2 = rA (1 - e^{-r\tau}). \end{aligned} \quad (2.1.12)$$

Знайдемо невідоме r . Для його визначення чинимо так. Нехай $t = t_1$ і $u(t_1) = u_{\max}$ (рис. 2.2). Тоді $u'(t_1) = 0$. Будемо вважати, що $\tau < t_1$. У цьому разі також можна визначити C'_1 і C'_2 , використовуючи систему (2.1.9) на момент $t = t_1$:

$$\left\{ \begin{aligned} C'_1 e^{rt_1} + t_1 C'_2 e^{rt_1} &= u_{\max}, \\ rC'_1 e^{rt_1} + C'_2 e^{rt_1} + rt_1 C'_2 e^{rt_1} &= 0. \end{aligned} \right.$$

З цієї системи знаходимо

$$\left\{ \begin{aligned} C'_1 &= u_{\max} e^{-rt_1} (1 + rt_1), \\ C'_2 &= -ru_{\max} e^{-rt_1}. \end{aligned} \right\} \quad (2.1.13)$$

Прирівняємо (2.1.12) і (2.1.13):

$$\left\{ \begin{aligned} A[(1 + r\tau)e^{-r\tau} - 1] &= u_{\max} e^{-rt_1} (1 + rt_1), \\ A(1 - e^{-r\tau}) &= -u_{\max} e^{-rt_1}. \end{aligned} \right\} \quad (2.1.14)$$

З другого рівняння (2.1.14) знаходимо

$$A = \frac{u_{\max} e^{-rt_1}}{e^{-r\tau} - 1}.$$

Підставимо значення A у перше рівняння (2.1.14). Після перетворення одержимо

$$e^{-r} = \frac{t_1}{t_1 - \tau},$$

звідки

$$r = -\frac{\ln \frac{t_1}{t_1 - \tau}}{\tau}.$$

Значення τ і t_1 можна одержати з експериментальних даних. Наприклад, якщо взяти для сідничого нерва жаби

$$u_{\max} = 5 \text{ мВ}; t_1 = 0,4 \text{ мс}; \tau = 0,01 \text{ мс}, \text{ то } r = -2,53.$$

За значенням r знаходимо невідомі коефіцієнти моделі (2.1.7) a_1, a_0 та V . Значення V показує, наскільки амплітуда електричного імпульсу перетворюється на величину зовнішнього подразнення. Теоретична крива потенціалу дії сідничого нерва жаби наведена на рис. 2.3. Маємо достатньо добрий збіг теоретичної кривої з типовою формою потенціалу дії нерва, наведеному на рис. 2.2.

Таким чином, диференціальне рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами та імпульсною правою частиною може використовуватись для апроксимації форми потенціалу дії.

Розглянуті у цьому підрозділі математичні моделі зміни потенціалу нервової мембрани синтезовані на основі формальної відповідності розв'язків диференціальних рівнянь залежностям, одержаним експериментально.

2.1.3. Модель Ходжкіна—Хакслі

Підвищення можливостей експериментального дослідження процесу збудження нервової мембрани дало змогу розробити іонну теорію. Згідно з нею зміна потенціалу нервової мембрани визначається сумарним іонним струмом крізь мембрану основних потенціалотворювальних іонів. За А. Ходжкіним та А. Хакслі потенціал мембрани (u) визначається таким диференціальним рівнянням:

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{C} (I_{\text{Na}} + I_{\text{K}} + I_{\text{L}}), \quad (2.1.15)$$

де C — питома ємність мембрани; I_{Na} , I_{K} , I_{L} — струм за рахунок переміщення іонів натрію, калію та інших речовин, наприклад хлору.

Різні іонні струми можуть бути виражені через значення провідностей (g):

$$I_{Na} = g_{Na}(E - E_{Na});$$

$$I_K = g_K(E - E_K);$$

$$I_L = g_L(E - E_L)$$

де E_{Na} , E_K , E_L — рівновагові потенціали мембрани для однакової концентрації відповідних іонів у внутрішньоклітинній та зовнішньоклітинній рідині.

Для практичного використання ці рівняння можна переписати таким чином:

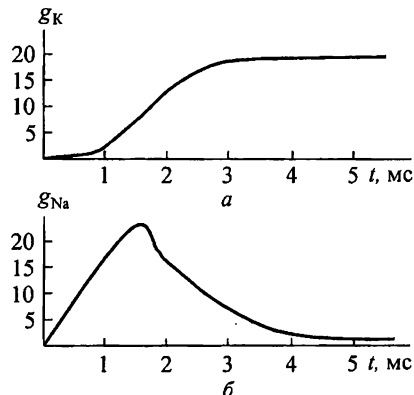
$$\left. \begin{aligned} I_{Na} &= g_{Na}(u - u_{Na}), \\ I_K &= g_K(u - u_K), \\ I_L &= g_L(u - u_L) \end{aligned} \right\} \quad (2.1.16)$$

де $u = E - u_0$; $u_{Na} = E_{Na} - u_0$; $u_K = E_K - u_0$; $u_L = E_L - u_0$; u_0 — абсолютне значення потенціалу спокою.

Іонні провідності g_{Na} і g_K у процесі збудження суттєво змінюються, тобто є складними функціями часу. Використовуючи власні експериментальні дані зміни провідностей (рис. 2.4), А. Ходжкін і А. Хакслі вирішили знайти рівняння, що дали б змогу найточніше описати динаміку зміни провідностей, а отже, й іонних струмів та потенціалу дії. При цьому, як вони вважали, в першу чергу треба було звертати увагу на достатньо точний збіг розрахункових та експериментальних даних, а вже потім — на фізичний зміст математичних формул і рівнянь.

Апроксимація кривих провідностей. За А. Ходжкіним та А. Хакслі зміна провідностей щодо іонів калію на кінцевій ділянці може бути достатньо добре описана розв'язком диференціального рівняння першого порядку.

Рис. 2.4. Експериментальна зміна провідностей g_K (а) та g_{Na} (б) гігантського аксона кальмара за Ходжкіним і Хакслі



Водночас розв'язання такого рівняння не може точно відобразити процес зміни провідності у початковий момент часу. Ця ділянка потребує апроксимації розв'язком диференціального рівняння вищого порядку. Проте А. Ходжкін і А. Хакслі вважають такий підхід недоцільним. На їхню думку, корисним спрощенням може бути нелінійне перетворення розв'язку диференціального рівняння першого порядку. Для цього вони запровадили деяку допоміжну змінну n , що не має розмірності, яка описується розв'язком такого диференціального рівняння:

$$\frac{dn}{dt} + (\alpha_n + \beta_n)n = \alpha_n, \quad (2.1.17)$$

де α_n, β_n — деякі фіксовані значення для рівняння (2.1.17), але взагалі вони є функціями деполяризуючої напруги.

Тоді зміна провідностей g_K у часі визначається так:

$$g_K = \bar{g}_K \cdot n^4, \quad (2.1.18)$$

де $\bar{g}_K$ — стала величина, що має розмірність провідності.

Для параметрів α_n і β_n визначені емпіричні залежності від деполяризуючої напруги V у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_n &= 0,01(V + 10) \frac{1}{\exp\left(\frac{V + 10}{10}\right) - 1}, \\ \beta_n &= 0,125 \exp\left(\frac{V}{80}\right). \end{aligned} \right\} \quad (2.1.19)$$

Для опису динаміки зміни провідності мембрани щодо іонів натрію застосовувались аналогічні міркування. Крива зміни g_{Na} (рис. 2.4), як вважають А. Ходжкін і А. Хакслі, може бути описана розв'язком диференціального рівняння другого порядку або комбінацією розв'язків двох рівнянь першого порядку. Відповідно до цього було введено дві нові змінні m і h , що не мають розмірності, які описуються відповідними розв'язками таких рівнянь:

$$\frac{dm}{dt} + (\alpha_m + \beta_m)m = \alpha_m; \quad (2.1.20)$$

$$\frac{dh}{dt} + (\alpha_h + \beta_h)h = \alpha_h, \quad (2.1.21)$$

де $\alpha_m, \beta_m, \alpha_h, \beta_h$ — сталі величини, що залежать від деполяризуючої напруги.

Провідність g_{Na} визначається функцією змінних m і h :

$$g_{Na} = \bar{g}_{Na} m^3 h, \quad (2.1.22)$$

де $\bar{g}_{Na}$ — стала величина, що має розмірність провідності.

Сталі величини рівнянь (2.1.20) і (2.1.21) для конкретного значення напруги V розраховуються за формулами

$$\left. \begin{aligned} \alpha_m &= 0,1 (V + 25) \frac{1}{\exp\left(\frac{V + 25}{10}\right) - 10}, \\ \beta_m &= 4 \exp\left(\frac{V}{18}\right), \\ \alpha_h &= 0,07 \exp\left(\frac{V}{20}\right), \\ \beta_h &= \frac{1}{\exp\left(\frac{V + 30}{10}\right) + 1}. \end{aligned} \right\} \quad (2.1.23)$$

Рівняння потенціалу дії. Зведемо до однієї системи усі рівняння, що були розглянуті вище. Одержимо таку систему:

$$\left. \begin{aligned} I &= C \frac{du}{dt} + \bar{g}_K n^4 (u - u_K) + \bar{g}_{Na} m^3 h (u - u_{Na}) + g_l (u - u_l), \\ \frac{dn}{dt} + (\alpha_n + \beta_n) n &= \alpha_n, \\ \frac{dm}{dt} + (\alpha_m + \beta_m) m &= \alpha_m, \\ \frac{dh}{dt} + (\alpha_h + \beta_h) h &= \alpha_h, \\ \alpha_n &= 0,01 (V + 10) \frac{1}{\exp\left(\frac{V + 10}{10}\right) - 1}, \\ \beta_n &= 0,125 \exp\left(\frac{V}{80}\right), \\ \alpha_m &= 0,1 (V + 25) \frac{1}{\exp\left(\frac{V + 25}{10}\right) - 1}, \end{aligned} \right\} \quad (2.1.24)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_m &= 4 \exp\left(\frac{V}{18}\right), \\ \alpha_h &= 0,07 \exp\left(\frac{V}{20}\right), \\ \beta_h &= \frac{1}{\exp\left(\frac{V+30}{10}\right) + 1} \end{aligned} \right\}$$

Розв'язавши систему (2.1.24) для деякого значення V , одержимо зміну струму крізь мембрану і потенціалу мембрани. У цій системі потенціал дано у мВ, струм — у мА/см², провідність — у мМо/см², ємність — у мкФ/см², час — у мс. Ці рівняння визначають іонні токи і потенціал на 1 см² мембрани. А. Ходжкіним і А. Хакслі для аксона кальмара були визначені константи системи (2.1.24).

Модель Ходжкіна—Хакслі з певною точністю описує різні експериментальні факти, тому вона набула великої популярності серед нейрофізіологів. Однак самі автори визнавали обмеженість її застосування, а також неможливість за допомогою цих рівнянь одержати інформацію про природу молекулярних механізмів зміни іонної провідності мембрани. Модель Ходжкіна—Хакслі та її аналоги для інших збуджувальних утворень — це складні нелінійні рівняння не нижче четвертого порядку, для яких немає аналітичних засобів розв'язку, тому значна частина досліджень зводиться до чисельного експерименту з моделлю за допомогою комп'ютера.

2.1.4. Модифікація моделі Ходжкіна—Хакслі

Запровадження А. Ходжкіним та А. Хакслі допоміжних динамічних змінних n , m , h для визначення провідностей g_K і g_{Na} , що виправдано з точки зору апроксимації експериментальних даних, не піддається достатньому фізіологічному обґрунтуванню. Крім того, навряд чи можна вважати виправданою гіпотезу про незалежність динаміки провідностей щодо іонів калію та натрію. Якщо взаємозв'язок між провідностями існує, то підтвердження цьому треба шукати саме в експериментальних даних. Для цього на одній координатній площині накреслимо графіки зміни калієвої та натрієвої провідностей для деяких значень подразнювальної напруги V (рис. 2.5).

Рис. 2.5. Експериментальні графіки зміни провідностей g_K та g_{Na} гігантського аксона кальмара за Ходжкіним і Хакслі

Як бачимо, розвиток збудження мембрани аксона кальмара пов'язаний з такими особливостями іонних провідностей у часі:

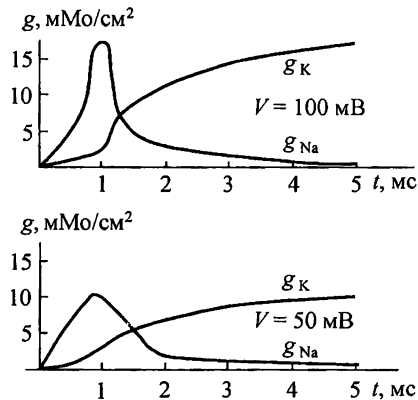
- крива $g_K(t)$ монотонно зростає для всіх подразнювальних напруг;
- крива $g_{Na}(t)$ має максимум, величина якого залежить від амплітуди подразнювальної напруги;
- зростання провідності $g_K(t)$ зменшується з часом наближення до нуля провідності $g_{Na}(t)$;
- для надпорогових подразнень криві провідностей перетинаються, причому провідність $g_{Na}(t)$ перевищує провідність $g_K(t)$ в інтервалі часу від 0,25 до 1,5 мс, тобто саме тоді, коли розвивається потенціал дії;
- провідність $g_{Na}(t)$ досягає максимуму саме у той час, коли крива $g_K(t)$ проходить через точку перегину.

Все це засвідчує тісний причинно-наслідковий взаємозв'язок двох провідностей, тобто можна вважати, що $g_K(t)$ — функція, а $g_{Na}(t)$ — її похідна. Таким чином, достатньо побудувати модель динаміки однієї з провідностей, а іншу одержати відповідним перетворенням. Криві провідності іонів калію є типовими S-подібними кривими, які з достатнім ступенем точності можуть бути описані розв'язком лінійного неоднорідного диференціального рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами:

$$\frac{d^2 g_K}{dt^2} + a_1 \frac{dg_K}{dt} + a_0 g_K = V. \quad (2.1.25)$$

Для простоти подальших міркувань будемо вважати, що корені характеристичного рівняння від'ємні та рівні. Тоді $a_0 = 0,25a_1^2$, а корінь $r = -0,5a_1$. В цьому випадку розв'язок рівняння (2.1.25) має вигляд:

$$g_K(t) = C_1 e^{\tau} + C_2 t e^{\tau} + \frac{V}{a_0}. \quad (2.1.26)$$



Зміна провідності щодо іонів натрію така:

$$g_{\text{Na}}(t) = \frac{dg_{\text{K}}(t)}{dt} = rC_1 e^{rt} + C_2 e^{rt} + rtC_2 e^{rt}. \quad (2.1.27)$$

Враховуючи вимірювання провідностей, проведені А. Ходжкіним та А. Хакслі, за початкові умови візьмемо

$$g_{\text{K}}(t=0) = g_{k_0} = 0,25; \quad g_{\text{Na}}(t=0) \approx 0.$$

Тоді

$$C_1 = g_{k_0} - \frac{V}{a_0}; \quad C_2 = -r \left(g_{k_0} - \frac{V}{a_0} \right).$$

Підставимо значення C_1 і C_2 у (2.1.26) і (2.1.27):

$$g_{\text{K}}(t) = \left(g_{k_0} - \frac{V}{a_0} \right) (1 - rt) e^{rt} + \frac{V}{a_0}; \quad (2.1.28)$$

$$g_{\text{Na}}(t) = -r^2 \left(g_{k_0} - \frac{V}{a_0} \right) t e^{rt}. \quad (2.1.29)$$

Для знаходження коефіцієнта a_0 скористаємося даними А. Ходжкіна та А. Хакслі визначення провідності щодо іонів калію для різних значень V . З часом $g_{\text{K}}(t)$ згідно з (2.1.28) прямує до величини $\frac{V}{a_0}$, тобто

$$a_0 = \frac{V}{g_{\text{K}\infty}},$$

де $g_{\text{K}\infty}$ — граничне значення g_{K} .

За даними А. Ходжкіна та А. Хакслі, для кожного значення V і $g_{\text{K}\infty}$ знаходимо a_0 і беремо середнє значення

$$a_{0 \text{ сеп}} = 4,3.$$

Тоді $a_1 = 4,16$ і $r = -2,08$.

Остаточно вирази (2.1.28) та (2.1.29) мають вигляд:

$$g_{\text{K}}(t) = \left(0,25 - \frac{V}{4,3} \right) (1 + 2,08t) e^{-2,08t} + \frac{V}{4,3}; \quad (2.1.30)$$

$$g_{\text{Na}}(t) = -4,3 \left(0,25 - \frac{V}{4,3} \right) t \cdot e^{-2,08t}. \quad (2.1.31)$$

Перевірка точності опису провідностей виразами (2.1.30) та (2.1.31) проводилася порівнянням значення $g_{Na \max}$ теоретичного з експериментальним. Середня похибка становила 7,8 %.

Отже, припущення про те, що між провідностями для іонів калію і натрію існує причинно-наслідковий зв'язок, а саме провідність для іонів натрію є похідною від провідності для іонів калію, може бути цілком достовірним. А якщо це так, то однадцять рівнянь у моделі Ходжкіна—Хакслі, що описують динаміку провідностей, можна звести до двох рівнянь.

Модель потенціалу дії. Математична модель, що відображає не тільки реакції деполяризації, а й потенціал дії, може бути синтезована з урахуванням динаміки іонних провідностей щодо іонів калію та натрію. Для цього можна скористатися диференціальним рівнянням першого порядку зі змінним коефіцієнтом:

$$\frac{du}{dt} + \frac{1}{C}(g_K - g_{Na}) \cdot u = kV, \quad (2.1.32)$$

де C — питома ємність мембрани, мкФ/см²; u — потенціал мембрани, мВ; V — зовнішнє подразнення, мВ; k — коефіцієнт розмірності та пропорційності.

Зазначимо, що вибір коефіцієнта рівняння (2.1.32) у вигляді функції

$$a = g_K(t) - g_{Na}(t)$$

має просту фізичну сутність: провідність мембрани пропорційна різниці провідностей для іонів калію та натрію. У цьому припущенні враховується той відомий факт, що іонний струм натрію всередину клітини збільшує потенціал мембрани, а струм іонів калію з клітини зменшує її потенціал.

Зміна провідностей $g_K(t)$ та $g_{Na}(t)$ для аксона описується виразами (2.1.30) та (2.1.31).

Проаналізуємо рівняння (2.1.32). Зовнішнє подразнення, прикладене до мембрани, спричиняє її деполяризацію, тобто зміну потенціалу спокою. Значення коефіцієнта $a = g_K - g_{Na}$ при $t = 0$ характеризує початкову різницю провідностей. У стані спокою $g_K \gg g_{Na}$. Деполяризація мембрани призводить до зниження її опору до іонів натрію, тобто до зростання g_{Na} і як наслідок — до зменшення коефіцієнта a .

Будемо вважати, що після досягнення порогового рівня деполяризації g_{Na} різко зростає, потік іонів натрію всередину клітини збільшується і потенціал мембрани різко змінюється.

Така різка зміна вихідної величини характерна для нестійких систем. Насправді на передньому фронті потенціалу дії $g_{Na} \gg g_K$. Це призводить до зміни знака коефіцієнта a у рівнянні (2.1.32). Таким чином, рівняння (2.1.32) відображає лавиноподібний процес зміни потенціалу мембрани — клітина генерує імпульс, точніше передній фронт спайку.

Потім після досягнення потенціалом дії свого максимального значення g_K стає більшою за g_{Na} . Це призводить до відновлення того потенціалу, що був на мембрані до збудження, тобто потенціалу спокою. Таким чином, коефіцієнт a є узагальненою характеристикою, що відображає зміну провідності мембрани щодо збуджувальних та гальмівних іонних складових.

2.1.5. Структурно-функціональна модель динаміки синаптичних процесів

Розглянемо вихідні фізіологічні передумови, на яких базуються синаптичні процеси. Вважається, що синаптичний процес починається з виділення медіатора у синаптичну щілину. Поверхня субсинаптичної мембрани, на яку діє медіатор, визначається розмірами і конфігурацією пресинаптичної мембрани. Дія медіатора полягає в активації пор субсинаптичної мембрани. Вважається, що пори мембрани специфічні для іонів натрію, калію та хлору. Кожний цей одновалентний іон несе один елементарний заряд, що дорівнює заряду електрона. Іони всередині та зовні клітини підпадають під дію двох сил, що визначаються концентраційним градієнтом для даного іона і польовим градієнтом, який залежить від різниці потенціалів на мембрані. Активація пор на мембрані означає, що іони дістають можливість проходити крізь пори з певною швидкістю. Поточне значення швидкості залежить від зміни градієнта концентрації для даного іона в районі синапсу та сумарної зміни потенціалу мембрани за рахунок руху усіх трьох іонів. Зрозуміло, що іони по-різному діють на зміну потенціалу мембрани. Потік іонів натрію всередину клітини змінює мембранний потенціал у бік деполяризації. Протилежно діють потоки іонів калію з клітини, і хлору — в клітину. Загальна зміна потенціалу під синапсом визначається алгебраїчною сумою вкладу кожного іонного потоку.

Зміна постсинаптичного потенціалу у часі визначається кількома процесами, серед яких можна виділити число пор субсинаптичної мембрани, залучених в активну діяльність, і процес місцевої зміни градієнту і поля, що визначає рух іонів крізь пори.

Для складання рівнянь динаміки руху іонів крізь мембрану треба розглянути декілька процесів. Насамперед маємо скласти рівняння зміни швидкості руху іонів у часі залежно від градієнта концентрацій і поля. Далі слід розглянути конкретну роботу кожної пори, що специфічна до свого іона. Потім на площі, що відповідає активованій поверхні субсинаптичної мембрани, треба визначити іонні потоки відповідних іонів крізь усі пори. Продуктивність усіх пор водночас визначає загальне число іонів, що рухаються крізь мембрану і змінюють концентрацію у локальній ділянці, яка прилягає до субсинаптичної мембрани. І нарешті зміна мембранного потенціалу є алгебраїчна сума трьох іонних потоків. Залежно від величини кожного іонного потоку і визначається сумарний ефект зміни мембранного потенціалу під впливом за знаком і величиною.

Швидкість руху іона у розчині визначається сумою двох складових: дифузійним дрейфом і дрейфом у полі. Звичайно, переміщення іонів у розчині, а у випадку клітини крізь мембрану змінюють концентрації по обидва боки мембрани і поле. За рахунок цього початкова швидкість руху іонів крізь мембрану буде неперервно змінюватись у часі. Другий бік цього процесу — неперервна зміна швидкості іона по товщині мембрани. Для спрощення будемо вважати швидкість та напруженість сталими по товщині мембрани. Не зовсім точне значення швидкості скомпенсуємо у першому наближенні допоміжним коефіцієнтом a_1 однаковим для трьох іонів. Цей коефіцієнт дасть змогу перейти від великої початкової швидкості руху іонів крізь мембрану, що змінюється потім по товщині мембрани, до деякого її середнього значення. Отже, одержимо рівняння

$$\left. \begin{aligned} u_{Na} &= a_1 \frac{b_{Na}}{a} \left(\frac{kT}{e} \ln \frac{[Na]_0}{[Na]_i} - V \right), \\ u_K &= a_1 \frac{b_K}{a} \left(\frac{kT}{e} \ln \frac{[K]_i}{[K]_0} + V \right), \\ u_{Cl} &= a_1 \frac{b_{Cl}}{a} \left(\frac{kT}{e} \ln \frac{[Cl]_0}{[Cl]_i} + V \right), \end{aligned} \right\} \quad (2.1.33)$$

де u_{Na} , u_K , u_{Cl} — швидкості руху крізь мембрану відповідно іонів натрію, калію та хлору; k — стала Больцмана; e — заряд електрона; T — абсолютна температура; V — мембранний потенціал; a — товщина мембрани; b_{Na} , b_K , b_{Cl} — рухомість відповідно іонів

натрію, калію та хлору; $[Na]_0, [K]_0, [Cl]_0$ — концентрації відповідно іонів натрію, калію та хлору поза клітиною; $[Na]_i, [K]_i, [Cl]_i$ — концентрації тих же іонів усередині клітини.

Використовуючи фізіологічні дані для нервової клітини у стані спокою, можна розрахувати початкові значення швидкостей, наприклад, для товщини мембрани $a = 10$ нм. Тоді формули (2.1.33) переписуються таким чином:

$$\left. \begin{aligned} u_{Na} &= 51,6a_1 \text{ см/с} \\ u_K &= 14,85a_1 \text{ см/с} \\ u_{Cl} &= 3,93a_1 \text{ см/с} \end{aligned} \right\} \quad (2.1.34)$$

Як бачимо, початкова можлива швидкість для іонів натрію набагато перевищує швидкості для іонів калію та хлору. Це в свою чергу, мабуть, і є причиною порушення рівноваги мембрани перш за все для іонів натрію.

Розвиток синаптичної активації супроводжується перерозподілом концентрацій основних потенціалоутворювальних іонів. Однак для невеликих відхилень від потенціалу спокою, яким є зміна потенціалу мембрани під синапсом, непотрібен значний перерозподіл концентрацій. Якщо це так, то діапазон зміни початкової швидкості, який визначає рух іонів крізь мембрану, на початку та в кінці синаптичного процесу не повинен істотно відрізнятись. Це дає підставу вважати достатньо обґрунтованим припущення, що початкова швидкість руху іонів крізь пори мембрани не змінюється впродовж дії медіатора.

Іони, що рухаються крізь пору, несуть електричні заряди. Відомо, що зміна заряду у часі визначає струм. У свою чергу, зміна заряду пов'язана зі швидкістю іонів, що рухаються крізь мембрану. Якщо припустити, що пора по всій товщині мембрани заповнена відповідним іонами, и то за одиницю часу крізь одну пору вийде таке число іонів:

$$N = \frac{u}{d},$$

де d — діаметр іона.

У цьому разі іонний струм крізь одну пору (i) запишеться таким чином:

$$i = e \frac{u}{d}.$$

Іонний струм крізь усі пори (I) поверхні, яка активується, становить

$$I = \frac{em}{d} u, \quad (2.1.35)$$

де m — число пор для відповідного іона.

Згідно з (2.1.34) і (2.1.35) вирази для іонних струмів іонів натрію, калію і хлору запишуться таким чином:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{Na}} &= \frac{51,6 a_1 e m_{\text{Na}}}{d_{\text{Na}}}, \\ I_{\text{K}} &= \frac{14,85 a_1 e m_{\text{K}}}{d_{\text{K}}}, \\ I_{\text{Cl}} &= \frac{3,93 a_1 e m_{\text{Cl}}}{d_{\text{Cl}}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.1.36)$$

Зміну мембранного потенціалу можна записати у звичайній формі через струми:

$$C \frac{dV}{dt} = I_{\text{Na}} - I_{\text{K}} - I_{\text{Cl}}$$

або

$$\left. \begin{aligned} C \frac{dV}{dt} &= a_1 e \left(\frac{51,6 m_{\text{Na}}}{d_{\text{Na}}} - \frac{14,85 m_{\text{K}}}{d_{\text{K}}} - \frac{3,93 m_{\text{Cl}}}{d_{\text{Cl}}} \right), \\ V(t=0) &= V_{\text{nc}}, \end{aligned} \right\} \quad (2.1.37)$$

де V_{nc} — потенціал спокою.

Зазвичай вважають, що максимальне значення постсинаптичного потенціалу ($V_{\text{псп}}$) досягається за час, що приблизно дорівнює 1 мс. Щоб зіставити кінцевий ефект зміни постсинаптичного потенціалу з величинами, що реально спостерігаються, проінтегруємо вираз (2.1.37), підставивши зліва і справа відповідні границі. Одержимо

$$V_{\text{псп}} - V_{\text{nc}} = 10^{-3} \frac{a_1 \cdot e}{C} \left(\frac{51,6 m_{\text{Na}}}{d_{\text{Na}}} - \frac{14,85 m_{\text{K}}}{d_{\text{K}}} - \frac{3,93 m_{\text{Cl}}}{d_{\text{Cl}}} \right). \quad (2.1.38)$$

Скориставшись експериментальними даними вимірювання моносинаптичних потенціалів під синапсами певних діаметрів, можна провести непряме визначення структурних параметрів (числа пор) активованої ділянки субсинаптичної мембрани. Для

цього для рівняння (2.1.38) слід дописати таке геометричне співвідношення:

$$m_{\text{Na}}S_{\text{Na}} + m_{\text{K}}S_{\text{K}} + m_{\text{Cl}}S_{\text{Cl}} = \gamma S_c, \quad (2.1.39)$$

де $S_{\text{Na}}, S_{\text{K}}, S_{\text{Cl}}$ — площі пор для відповідних іонів; S_c — площа активованої ділянки субсинаптичної мембрани; γ — коефіцієнт, який враховує, що не вся площа мембрани зайнята порами.

Непрямі нейрофізіологічні розрахунки дають змогу для деяких випадків визначити границі зміни відстані між порами мембрани, а отже, й границі зміни коефіцієнта γ . Величину S визначаємо за діаметром синапсу. Коефіцієнт a_1 , що дає можливість перейти до певної середньої швидкості руху іонів крізь мембрану, є довільним, і розрахунки структурних параметрів можна проводити для різних його значень. Крім того, щоб за експериментальними даними можна було розрахувати структурні параметри, розв'язуючи сумісно (2.1.38) і (2.1.39), будемо вважати, що $m_{\text{K}} = m_{\text{Cl}}$, $d_{\text{K}} = d_{\text{Cl}}$ і отже, $S_{\text{K}} = S_{\text{Cl}}$. За таких умов можна оцінити структурні параметри деполяризувальної (іони натрію) і реполяризувальної (іони калію і хлору) систем.

Таким чином, розгляд динаміки синаптичних процесів на основі структурно-функціональних рівнянь руху основних потенціалоутворювальних іонів дає змогу усвідомити загальнобіологічний принцип єдності структури та функції.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКЦІЇ ОРГАНІЗМУ НА ПОВТОРНУ ДІЮ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН

У цьому розділі розглянуто теоретико-експериментальний метод одержання нового знання про адаптивну складову реакції організму на повторну дію хімічних речовин. Метод базується на експериментальних даних про динаміку біохімічних показників організму тварин за умов одноразової та повторної дій деяких хімічних речовин; на синтезі математичних моделей однократної реакції, теоретичного кумулятивного ефекту (ТКЕ) на повторну дію та динаміки адаптивної складової.

2.2.1. Синтез інформаційного масиву

Якщо на біологічні системи діють будь-які чинники середовища, спостерігаються реакції, що відображають зміну у часі біохімічних та інших параметрів життєдіяльності організму. Якщо дія триває довго, то в динамічних змінах показників відображаються численні різноспрямовані процеси, що відбуваються в організмі. Це, наприклад, накопичення (кумуляція) дії, виділення і трансформації чинника, пристосування та ін. Цю складну динамічну відповідь біосистеми на зовнішню дію в біології прийнято називати адаптованою реакцією. Таким чином, за цією реакцією можна лише опосередковано робити висновок про істинний процес адаптації організму до дії зовнішніх чинників.

Для вивчення пристосування організму до дії шкідливих чинників зовнішнього середовища на тваринах проводять спеціальні дослідження впливу різних хімічних речовин на зміну показників життєдіяльності організму. У цьому підрозділі як первинний

інформаційний масив використовуються результати експериментів з однократного та повторного введення тетрахлориду вуглецю (CCl_4) перорально. Експериментальними тваринами були безпородні білі пацюки. Тетрахлорид вуглецю є класичною гепатотропною отрутою, що порушує структуру та функцію клітин печінки (гепатоцитів). Дія цієї отрути на печінку оцінювалась за показником, що виявляє структурні порушення, а саме за коефіцієнтом ретенції бромтимолблау (БТБ). Було застосовано чотири дози CCl_4 як за одноразової, так і за повторної експозиції: 1,6; 8; 40 і 200 мг/кг. У разі повторної експозиції CCl_4 вводили перорально щодоби в один і той самий час.

Функціональний стан печінки у разі одноразової дії CCl_4 оцінювався за величиною БТБ на 1-шу, 2-гу, 4-ту та 8-му добу; у разі повторної дії — на 1-шу, 2-гу, 4-ту, 8-му, 15-ту, 26-ту та 60-ту добу. Зазначимо, що вимірювання проводились через 4 год після введення перорально CCl_4 — це час всмоктування у шлунку. Подальші вимірювання проводились через 1 добу, 3 та 7 діб після

Таблиця 2.1. Динаміка БТБ для одноразового перорального введення CCl_4 , %

Доза, мг/кг	Тривалість дослідження, доба			
	0,125	1,125	3,125	7,125
200	61,7 ± 2,1	51,3 ± 1,5	28,8 ± 2,9	35,4 ± 1,3
40	54,4 ± 1,9	45,4 ± 1,8	33,9 ± 3,8	34,8 ± 0,9
8	50,6 ± 4,5	41,6 ± 2,9	38,8 ± 0,9	36,4 ± 3,8
1,6	40,5 ± 1,6	34,4 ± 3,8	36,2 ± 2,3	37,4 ± 1,6
Контроль	33,7 ± 1,8	36,9 ± 3,0	34,2 ± 5,1	33,8 ± 2,9

Таблиця 2.2. Динаміка БТБ для повторного перорального введення CCl_4 , %

Доза, мг/кг	Тривалість дослід		
	0,125	1,125	3,125
200	62,4 ± 2,5	54,5 ± 2,6	54,2 ± 1,7
40	59,2 ± 3,3	48,9 ± 3,3	43,3 ± 1,5
8	53,8 ± 3,0	44,2 ± 3,2	36,5 ± 3,2
1,6	38,3 ± 1,0	34,6 ± 1,4	33,5 ± 2,4
Контроль	32,9 ± 1,6	32,9 ± 1,04	33,8 ± 1,5

першого вимірювання для однократної дії CCl_4 . Аналогічно вимірювали значення БТБ і для повторної експозиції.

Числові значення БТБ крім динаміки, що залежить від дії CCl_4 , можуть відображати також різні побічні явища, наприклад, добові коливання значення БТБ, вплив умов утримання тварин, раціону харчування тощо. Для виключення побічних динамічних ефектів разом із підслідними тваринами досліджувалась контрольна група тварин. В останніх у ті самі строки вимірювали значення БТБ. Статистичні групи складались із 10–20 тварин.

Первинна математична обробка експериментальних даних для обох експозицій (одноразової та повторної) полягала у такому:

- визначення для кожного моменту часу середніх значень БТБ для груп експериментальних і контрольних тварин;
- розрахунок середнього квадратичного відхилення та довірчих інтервалів;
- виявлення відмінності за критерієм Стьюдента—Фішера.

Для визначення «чистої» дії CCl_4 на організм тварини за показником БТБ розраховуємо різницю між середніми значеннями БТБ експериментальних та контрольних тварин в однакові моменти часу для обох експозицій. Одержані дані становлять первинний інформаційний масив для подальшого дослідження.

У табл. 2.1 наведено значення БТБ для одноразового перорального введення CCl_4 , а в табл. 2.2 — для повторної експозиції.

2.2.2. Алгоритмічна стратегія виявлення адаптації

Для виявлення реакції пристосування біосистеми до дії факторів зовнішнього середовища треба знати, що б відбувалося з реакцією системи, якби вона не адаптувалась до дії фактора. Відповідь на це питання можна одержати лише теоретично, розглядаючи одноразову

ження, доба			
7,125	14,125	25,125	59,125
59,2 ± 2,7	—	—	—
52,1 ± 1,6	46,9 ± 3,7	50,3 ± 3,5	52,0 ± 2,9
44,7 ± 2,8	34,7 ± 1,1	39,1 ± 1,7	45,2 ± 1,7
34,1 ± 2,3	—	—	—
32,8 ± 1,7	32,9 ± 1,2	32,8 ± 0,8	31,6 ± 2,0

(короткочасну) дію фактора і реакцію системи. Екстраполювати таку реакцію на повторну дію фактора можна шляхом розрахунків і моделювання.

Основою алгоритмічної стратегії є **теоретико-експериментальний метод виокремлення адаптивної складової реакції організму на повторну (щодобову) дію CCl_4** . Метод базується на таких припущеннях:

- реакція організму на повторну дію хімічних речовин (в даному випадку CCl_4) інтегрує процеси кумуляції та пристосування;
- реакція організму на одноразову дію CCl_4 не містить у собі повною мірою елементів пристосування, що виявляються у разі повторної дії;
- реакція організму на повторну дію CCl_4 за відсутності пристосування визначалась би підсумовуванням реакції організму на однократну дію.

Спираючись на ці положення, можна визначити адаптаційну складову як різницю між «чистою» кумуляцією і реакцією організму на повторні дії CCl_4 . Зрозуміло, що одержати «чисту» кумуляцію експериментально неможливо. Кумулятивний ефект можна одержати теоретично. Для розрахунку теоретичного кумулятивного ефекту таких використовується така математична модель: доза — динамічний ефект реакції організму на однократну дію CCl_4 , синтез якої, а також алгоритм розрахунку ТКЕ буде розглянуто нижче.

У зв'язку з тим що різні показники, за якими досліджується дія шкідливих речовин на організм, мають різні розмірність і абсолютні величини, адаптаційну складову (АС) доцільно характеризувати у відносних одиницях. Для цього від теоретичного кумулятивного ефекту слід відняти експериментальні значення (ЕЗ) реакції організму на повторну дію CCl_4 і різницю поділити на ТКЕ. Таким чином,

$$AC = \frac{TKE - E3}{TKE}, \text{ відн. од.} \quad (2.2.1)$$

Звичайно після одноразової дії CCl_4 на організм структурні та функціональні зміни з часом відновлюються. На відміну від пристосування до повторної дії CCl_4 відновлювальні реакції після одноразової дії через різні інтервали часу повертають організм у стан сталої рівноваги. Величина порушень і час відновлення залежать від дози CCl_4 . Якщо організм зазнає повторної дії CCl_4 після закінчення процесів відновлення, то його реакція на кожну дію має підпорядковуватися математичній моделі: доза — динамічний ефект

реакції на одноразову дію. Якщо повторна дія CCl_4 відбувається на фоні процесів відновлення, то вони неминуче призведуть до накопичення структурно-функціональних змін.

Математична модель реакції організму на одноразову дію CCl_4 . Основною для розрахунку ТКЕ, як зазначено вище, є математична модель: доза — динамічний ефект реакції організму на одноразову дію CCl_4 . Певна річ, вибір структури цієї моделі залежить від шляху введення речовини в організм і від показника, за яким оцінюється дія речовини. У даному випадку CCl_4 вводиться перорально, а показником є БТБ, що виявляє структурні порушення клітин печінки.

Адекватною математичною моделлю динаміки БТБ у разі одноразової дії CCl_4 є диференціальне рівняння першого порядку з імпульсною правою частиною, що діє на інтервалі всмоктування CCl_4 зі шлунка. Експериментальним підтвердженням імпульсної дії CCl_4 є збіг максимального значення БТБ на одноразову дію з часом всмоктування (див. табл. 2.1).

Загальний вигляд математичної моделі: доза — динамічний ефект для показника БТБ визначається рівнянням

$$\frac{dx}{dt} + ax = \begin{cases} P(D), & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases}, \quad (2.2.2)$$

де x — показник, що досліджується, БТБ; $P(D)$ — величина, пропорційна повній дозі; D — доза CCl_4 ; τ — час всмоктування зі шлунка, що дорівнює 4 год, або 0,125 доби; a — величина, обернена сталій часу реакції.

Зазначимо, що час всмоктування в шлунково-кишковому тракті τ не піддається прямому експериментальному вимірюванню, але опосередковано його можна визначити за часом наростання реакції.

Розв'язок рівняння (2.2.2) на інтервалі $0 \leq t \leq \tau$ для нульових початкових умов має вигляд

$$x = \frac{P(D)}{a} (1 - e^{-at}), \quad 0 \leq t \leq \tau. \quad (2.2.3)$$

Для інтервалу $t \geq \tau$ з урахуванням неперервності зміни показника маємо такий розв'язок:

$$x = \frac{P(D)}{a} (1 - e^{-a\tau}) e^{-a(t-\tau)}, \quad t > \tau. \quad (2.2.4)$$

Зазначимо, що розв'язки диференціального рівняння типу (2.2.2) розглянуто у п. 1.4.4.

У розв'язках (2.2.3) і (2.2.4) невідомими є a і $P(D)$. Для визначення параметра a можна використати розв'язок (2.2.4). При цьому природно використовується гіпотеза про те, що за час наростання показника БТБ і його зменшення значення a не змінюється. Розв'язок (2.2.4) перепишемо у такий спосіб:

$$x = x(\tau)e^{-a(t-\tau)}. \quad (2.2.5)$$

Звідси

$$a = \frac{\ln x(\tau) - \ln x(t)}{t - \tau}. \quad (2.2.6)$$

Зазначимо, що у даному виразі $\tau = 0,125$; $t > 0,125$; тобто a розраховуємо для $t = 1,125$; $3,125$ та $7,125$. Значення $x(\tau)$ і $x(t)$ знаходимо за експериментальними даними (табл. 2.1) як різницю між значеннями БТБ експериментальних (x_e) та контрольної x_k груп тварин у відповідні моменти часу. Параметр a був розрахований методом найменших квадратів для усіх доз CCl_4 і за його значення було обрано величину, яка дорівнює 0,65.

Залежність $P(D)$ визначаємо таким чином. Спочатку для кожної дози розраховуємо значення $P_e = f(D)$, використовуючи рівняння (2.2.3) на момент часу $t = \tau$. Значення P_e визначається за формулою

$$P_e(D) = \frac{x(\tau)a}{1 - e^{-a\tau}}.$$

У цій формулі, як і у попередній,

$$x(\tau) = x_e(\tau) - x_k(\tau); \quad \tau = 0,125; \quad a = 0,65.$$

З урахуванням числових значень маємо

$$P_e(D) \approx 8,33x(\tau). \quad (2.2.7)$$

Використовуючи дані табл. 2.1, для кожної дози розраховуємо значення P_e :

$$P_e(1,6) = 56,64; \quad P_e(8) = 140,78; \quad P_e(40) = 172,43; \quad P_e(240) = 233,24.$$

За цими даними було розраховано математичну модель залежності $P = f(D)$ у класі алгебраїчних функцій:

$$P(D) = 51,4 \ln(D + 1). \quad (2.2.8)$$

Коефіцієнт, який стоїть перед логарифмом, знайдено методом найменших квадратів. Одиниця, що додається до дози, враховує той факт, що $P(0)$ має дорівнювати нулю.

Таким чином, математична модель доза — динамічний ефект для показника БТБ за одноразової дії різних доз CCl_4 виглядає так:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{P(D)}{0,65} (1 - e^{-0,65t}), \quad 0 \leq t \leq 0,125, \\ x &= x(0,125)e^{-0,65(t-0,125)}, \quad t > 0,125, \\ P(D) &= 51 \ln(D+1), \\ x_T &= x + x_{\text{к.сер}}, \\ x_{\text{к.сер}} &= 34,65, \end{aligned} \right\} \quad (2.2.9)$$

де $x_{\text{к.сер}}$ — середнє значення БТБ контрольної групи тварин.

Одержана математична модель (2.2.9) є основою для розрахунку теоретичного кумулятивного ефекту.

Розрахунок теоретичного кумулятивного ефекту. У разі повторної дії хімічної речовини (у даному випадку CCl_4) в організмі виникають: процес кумуляції шкідливої дії речовини і процес, що протидіє кумуляції, — адаптація. Математична модель реакції організму за одноразової дії CCl_4 не враховує механізмів адаптації, що виявляються при тривалому експерименті. Саме тому цю модель можна використовувати для розрахунку реакції організму на одноразову дію речовини, що спостерігалася б, якби в організмі був повністю відсутній процес адаптації. Саме такою реакцією і є ТКЕ або неадаптована реакція організму, яка може бути розрахована за умови, що організм на кожну повторну дію речовини реагує так само, як і на першу дію. Очевидно також, що якщо повторні дії речовини доволі часті, реакція організму на кожну наступну дію виникає на фоні попередньої реакції, що в результаті дає ТКЕ.

Розглянемо математичну модель структурних порушень клітин печінки, що визначаються за показником БТБ у разі багаторазової дії CCl_4 . Позначимо через i кратність надходження в організм CCl_4 . Ефект дії CCl_4 на значення БТБ при одноразовій дії визначається за формулами (2.2.9). Якщо ввести індекс кратності введення, то дві перші формули системи (2.2.9) можна переписати таким чином:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \frac{P(D)}{0,65} (1 - e^{-0,65[t-(i-1)]}), \quad 0 \leq t \leq 0,125, \\ x_i &= \frac{P(D)}{0,65} (1 - e^{-0,65 \cdot 0,125}) e^{-0,65[t-(i-1)-0,125]}, \quad t > 0,125. \end{aligned} \right\} \quad (2.2.10)$$

Кожна наступна дія CCl_4 відстоїть від попередньої на добу. За цей час процес поновлення не закінчується. Тому дія кожної нової дози починається на фоні певної кількості порушених структур, що визначається за показником БТБ. Величина цих структур залежить від кратності дії ($i = 1, 2, 3, \dots$). Враховуючи специфіку біологічного експерименту (CCl_4 вводили щодоби в один і той самий час), границі зміни часу у формулах (2.2.10) можуть бути виражені через кратність:

$$\begin{aligned} 0 \leq t \leq 0,125 &\rightarrow (i-1) \leq t \leq (i-1) + 0,125; \\ t \geq 0,125 &\rightarrow t > (i-1) + 0,125. \end{aligned}$$

Формула (2.2.10) справедлива для нульових початкових умов, що відповідає $i = 1$. Для кожної наступної дії ($i = 2, 3, \dots$) динаміка порушень і відновлень структур починається, як було зазначено вище, з рівня структурних змін, що визначаються попередньою дією CCl_4 . Це можна врахувати введенням ненульових початкових умов. Динаміка БТБ при повторній дії CCl_4 описується тим же диференціальним рівнянням (2.2.2), яке характерне для одноразової дії CCl_4 , але з ненульовими початковими умовами. Розв'язок такого рівняння має вигляд (п. 1.4.3):

$$\begin{aligned} x &= \frac{P(D)}{a} (1 - e^{-at}) + x_0 e^{-at}, \quad 0 \leq t \leq 0,125; \\ x &= \left[\frac{P(D)}{a} (1 - e^{-0,125a}) + x_0 e^{-0,125a} \right] \cdot e^{-a(t-0,125)} \quad t > 0,125, \end{aligned} \quad (2.2.11)$$

де x_0 — початкові умови.

Через кратність i розв'язок (2.2.11) можна записати у вигляді

$$\begin{cases} x_i = \frac{P(D)}{a} (1 - e^{-a[t-(i-1)]}) + x_i (i-1) e^{-a[t-(i-1)]}, & (i-1) \leq t \leq (i-1) + 0,125; \\ x_i = \left[\frac{P(D)}{a} (1 - e^{-0,125a}) + x_{i-1} (i-1) e^{-0,125a} \right] e^{-a[t-(i-1)-0,125]}, & t > (i-1) + 0,125. \end{cases} \quad (2.2.12)$$

Величина структурних змін (за показником БТБ) на кінець 1-ї доби визначається за другою формулою (2.2.10) за умов $i = 1$ і $t = 1$:

$$x_1(1) = \frac{P(D)}{0,65} (1 - e^{-0,125 \cdot 0,65}) e^{-0,65(1-0,125)}. \quad (2.2.13)$$

Значення $x_1(1)$ є початковими умовами для повторної дії CCl_4 . Таким чином, для $i = 2$ маємо формули розрахунку ТКЕ:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{P(D)}{0,65} (1 - e^{-0,65(t-1)}) + x_1(1) e^{-0,65(t-1)}, & 1 \leq t \leq 1,125; \\ x_2 = \left[\frac{P(D)}{0,65} (1 - e^{-0,65 \cdot 0,125}) + x_1(1) e^{-0,65 \cdot 0,125} \right] e^{-0,65(t-1,125)}, & t > 1,125. \end{cases} \quad (2.2.14)$$

Аналогічно послідовно розраховуємо початкові умови і ТКЕ для $i = 3, 4, \dots$. Згідно з розрахунками, крива динаміки ТКЕ має монотонно зростаючий характер.

Для одержання експериментально-теоретичних значень адаптаційної складової (АС) у реакції організму на повторні дії CCl_4 використовуємо формулу (2.2.1). Як було зазначено вище, за показник ЕЗ (експериментальні значення) у формулі (2.2.1) береться різниця між значеннями БТБ експериментальних (x_e) та контрольних (x_k) груп тварин при багаторазовому пероральному введенні CCl_4 (табл. 2.2).

Отже, алгоритмічна стратегія виявлення експериментально-теоретичних значень кривої «чистої» адаптації у відносних одиницях полягає у такому:

- за даними табл. 2.2 для кожної дози розраховуємо значення $x_e - x_k$;
- за розглянутим вище алгоритмом розраховуємо значення ТКЕ;
- за формулою (2.2.1) обчислюємо значення АС у відносних одиницях.

Результати розрахунку наведено у табл. 2.3. Експериментально-теоретичні значення АС є вихідним інформаційним масивом для синтезу математичної моделі динаміки адаптивної складової.

2.2.3. Математична модель динаміки «чистої» кривої адаптації

Одержані експериментально-теоретичні значення адаптаційної складової (табл. 2.3) дають підставу стверджувати, що пристосування організму до повторних дій CCl_4 незалежно від дози підпорядковується певній закономірності. Остання характеризується наявністю коливань із затуханням, певним періодом коливань та прямуванням процесу з часом до деякого усталеного значення адаптації. Перехідні процеси такого типу можна описати розв'язком неоднорідного диференціального рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами і комплексно-спряженими коренями характеристичного рівняння. Розв'язок такого рівняння для нульових початкових умов та зсуву

часу на один інтервал (добу) введення CCl_4 має вигляд (п. 1.4.4)

$$S = y_{\text{уст}}(D) \left\{ 1 - e^{\alpha(t-1)} \left[\frac{\alpha}{\beta} \sin \beta(t-1) + \cos \beta(t-1) \right] \right\}, \quad (2.2.15)$$

де S — основна коливальна компонента пристосування;
 $y_{\text{уст}}(D)$ — усталене значення адаптації, що залежить від дози; α — декремент затухання коливань; β — кругова частота коливань.

У даному разі час вимірювання — доба, зсув часу — одна доба. Період коливань (T) адаптаційного процесу визначається формулою

$$T = \frac{2\pi}{\beta}. \quad (2.2.16)$$

Розглянемо деякі фізіологічні міркування щодо обґрунтування структури математичної моделі адаптаційної складової. У динаміці пристосування виявляються різні, часто протилежні, внутрішньо притаманні біосистемам властивості: пошкодження структур, а також систем керування; мобілізація структурних і функціональних резервів; новоутворення структур; їх репаративна регенерація; пристосувальна перебудова шляхів біотрансформації речовини та ін. Залежно від структури хімічної сполуки, складності дія речовини, питома вага усіх наведених властивостей змінюється, що вносить певні особливості в динаміку адаптаційної складової.

Таблиця 2.3. Експериментальні значення БТБ у відхиленнях від контролю, значення ТКЕ та експериментально-теоретичні значення адаптивної складової

Доза, мг/кг	Показ- ник	Тривалість дослідження, доба					
		1,125	3,125	7,125	14,125	25,125	59,125
200	$x_e - x_k$	21,6	20,4	23,7	—	—	—
	ТКЕ	48,694	61,911	66,515	—	—	—
	АС, відн.од.	0,556	0,67	0,664	—	—	—
40	$x_e - x_k$	16,0	9,5	19,3	14,0	17,5	20,4
	ТКЕ	34,056	43,353	46,578	46,838	46,833	46,833
	АС, відн.од.	0,53	0,781	0,586	0,7	0,626	0,654
8	$x_e - x_k$	11,3	2,7	11,9	1,8	6,3	—
	ТКЕ	20,15	25,652	27,56	27,711	27,711	27,711
	АС, відн.од.	0,439	0,895	0,568	0,935	0,773	0,509

Значна роль у пристосуванні організму до повторних дій хімічних сполук належить печінці. У ній відбувається біотрансформація сторонніх для організму сполук. Характерною особливістю цього органа є наявність значного структурно-функціонального резерву (гепатоцити, що знаходяться у стані функціонального спокою). Останні можна розглядати як первинний короткочасний та найдоступніший механізм адаптації. Тому для гепатотропних речовин і речовин, біотрансформація яких здійснюється у печінці, слід враховувати цей механізм. Отже, разом із багатьма розтягнутими у часі механізмами пристосування, що відображаються в основній коливальній компоненті, треба в першу чергу враховувати механізм підключення структурно-функціональних резервів печінки, що швидко зменшуються. Цілком природно допустити, що величина підключення резерву залежить від дози речовини, яка діє на організм.

Адаптаційний процес підключення структурно-функціональних резервів Z можна описати розв'язком лінійного однорідного диференціального рівняння першого порядку з ненульовими початковими умовами та зсувом часу на одну добу (п. 1.4.4):

$$Z = Z_0(D)e^{-b(t-1)}, \quad (2.2.17)$$

де Z_0 — початкові умови.

З урахуванням вище розглянутого математична модель адаптаційної складової, що виявляється за динамікою показника БТБ, має вигляд:

$$y = S + Z, \quad (2.2.18)$$

де y — адаптаційна складова реакції організму за повторної дії CCl_4 .

Невідомими у математичній моделі (2.2.18) є $y_{\text{ycm}}(D)$, α , β , $Z_0(D)$, b (згідно з формулами (2.2.15) і (2.2.17)).

Експериментально-теоретичні значення АС (табл. 2.3) дали змогу визначити кількісні значення параметрів α і β основної коливальної компоненти S динаміки адаптації, значення параметра b компоненти підключення структурно-функціональних резервів Z за умови, що вони не залежать від дози, а також знайти залежності $y_{\text{ycm}} = f(D)$ та $Z_0 = f(D)$.

Отже, математична модель (2.2.18) може бути записана так:

$$y = (0,38e^{-0,55D} + 0,45)\{1 - e^{-0,1(t-1)}[0,0796 \sin 1,256(t-1) + \cos 1,256(t-1)]\} + (e^{-0,5D} + 1)e^{-4,8(t-1)}. \quad (2.2.19)$$

Таблиця 2.4. Зіставлення експериментальних і теоретичних значень БТБ у разі повторної дії CCl_4

Доза, мг/кг	Показник	Тривалість дослідження, доба						
		0,125	1,125	3,125	7,125	14,125	25,125	59,125
200	x_e	62,4	54,5	54,2	59,2	—	—	—
	x^T	66,05	55,77	48,9	74,51	—	—	—
	$\Delta\%$	5,85	2,2	9,78	25,86	—	—	—
40	x_e	59,2	48,9	43,3	52,1	46,9	50,3	52,0
	x^T	56,476	49,255	41,38	60,696	53,16	56,84	57,84
	$\Delta\%$	4,6	0,72	4,43	16,5	13,35	13,0	4,24
8	x_e	53,8	44,2	36,5	44,7	34,7	39,1	45,2
	x^T	47,34	42,825	29,611	44,96	38,59	41,665	42,496
	$\Delta\%$	12,0	3,1	18,87	0,58	11,21	6,56	5,98

Таким чином, математична модель (2.2.19) дає можливість одержати динаміку адаптаційної складової у реакції організму на повторну дію тетрахлориду вуглецю за показником БТБ. Виявити цю динаміку безпосередньо в експерименті неможливо.

Для підтвердження справедливості синтезованої моделі (2.2.19) були розраховані теоретичні значення БТБ у разі повторної дії CCl_4 і зіставлені з експериментальними значеннями (табл. 2.2). Розрахунок проводився за значеннями теоретичного кумулятивного ефекту і теоретичним значенням адаптаційної складової за формулою

$$x^T = \text{TKE}(1 - y) + x_{\text{к.сеп.}}, \quad (2.2.20)$$

де x^T — теоретичні значення БТБ у разі повторної дії CCl_4 ; $x_{\text{к.сеп.}}$ — середнє значення БТБ контрольної групи тварин у разі повторної дії CCl_4 .

Зазначимо, що формула (2.2.20) одержана з формули (2.2.1) шляхом заміни АС на y і ЕЗ на $(x^T - x_{\text{к.сеп.}})$.

Результати розрахунку і похибка представлені у табл. 2.4. Похибка понад 20 % трапляється один раз. Це дає змогу стверджувати, що виявлена закономірність адаптаційної складової у реакції організму на повторні дії CCl_4 цілком відображає притаманну біосистемам властивість пристосування до шкідливих впливів середовища. А сама динаміка адаптаційної складової характеризується наявністю коливань із затуханням, певним періодом коливань, що не збігається з регламентом дій шкідливої речовини (CCl_4) та прямуванням з часом до деякого усталеного рівня адаптації.

СИСТЕМА ВУГЛЕВОДНОГО ОБМІНУ: МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ

У цьому розділі досліджуються особливості використання теорії керування і розглядаються методичні аспекти застосування математичного моделювання як способу розробки та удосконалення алгоритмів фізіологічно адекватної корекції патологічних змін в одній із найважливіших систем, що забезпечує енергетичні потреби організму, — системі вуглеводного обміну.

2.3.1. Фізіологічні передумови моделювання

Аналіз тенденцій поширення галузей безпосереднього використання кількісних методів для вирішення проблем, що супроводжують теоретичні дослідження та виникають у медичній практиці, дає можливість відслідкувати, як поступово, теоретично осмислюючи та накопичуючи практичний досвід, було пройдено довгий шлях пошуку, втрат і безперечних досягнень до сучасного рівня розуміння реальних можливостей цього підходу та притаманних йому існуючих обмежень. Всебічна розробка методологічних аспектів математичного моделювання біологічних процесів, сучасні досягнення в розвитку теорії керування складними системами та досвід застосування її методів до досліджень фізіологічних систем, а також для вирішення завдань практичної медицини, сприяли пом'якшенню деякого скепсису щодо використання методології кількісного супроводження досліджень у біологів та медиків.

Актуальність об'єкта дослідження визначається тим, що порушення нормального функціонування системи вуглеводного обміну призводить до поширеного захворювання на діабет як тяжкої хронічної

патології, що потребує ретельних, копітких терапевтичних зусиль і значних фінансових витрат для забезпечення компенсації захворювання та адекватного рівня життєдіяльності. Крім того, діабет є однією з основних причин смертності. Він посідає третє місце після серцево-судинних та онкологічних хвороб. Незважаючи на удосконалення методики лікування та лікувальних препаратів, досягнення стійкої нормалізації захворювання являє собою складне завдання, яке не завжди успішно вирішується на практиці.

Тому на сучасному етапі значна увага приділяється створенню регульованих засобів введення лікувальних препаратів з використанням математичних моделей. Але для побудови цих моделей спочатку треба ретельно проаналізувати фізіологічні механізми, що лежать в основі функціонування системи, яка розглядається, — системи вуглеводного обміну.

Гомеостаз системи вуглеводного обміну. Система вуглеводного обміну — одна з найважливіших систем організму, що забезпечує його енергетичні потреби. Вона має складну ієрархічну структуру, яка здійснює підтримання концентрації глюкози крові на *відносно постійному рівні* завдяки узгодженій взаємодії великої кількості різноманітних нейроендокринних та гуморальних механізмів.

Зауважимо при цьому, що поняття про відносну динамічну постійність параметрів внутрішньої сфери та стійкість основних фізіологічних функцій перетворилося на сучасну теорію гомеостазу. Засновником її вважають Клода Бернара, який вперше понад 100 років тому сформулював концепцію стійкості внутрішнього середовища організму і вважав при цьому, що вона поширюється на всі життєві механізми.

Перед тим, як перейти до розгляду функціонування фізіологічної системи регуляції глюкози в крові, визначимо деякі поняття, якими будемо при цьому користуватись і які є основним базисом теорії гомеостазу. Це *гомеостаз, гомеостатична система, параметричний, функціональний та системно-ієрархічний види гомеостазу*.

Гомеостаз — це відносна динамічна сталість складу та властивостей внутрішнього середовища, а також основних фізіологічних функцій організму, які підтримуються в певних межах постійними попри існуючі збурення різного характеру, що відбуваються в навколишньому оточенні. В подальшому у працях багатьох дослідників висвітлювались багатогранні аспекти реалізації гомеостазу в системах живої природи різного рівня ієрархії, згідно з якими гомеостаз розглядається з розширених системних позицій. Посилаючись на це, дамо таке визначення: *системний го-*

меостаз — це підтримання сталою структурно-функціональної організації фізіологічної системи як цілісної, а також незалежної сталості її параметрів та виконання системної функції.

Розглядаючи основні аксіоматичні положення теорії гомеостазу, зазначимо, що **параметричний гомеостаз** являє собою незалежну динамічну сталість параметрів внутрішньої сфери організму, а сталість виконання системної функції — **функціональний гомеостаз**. Постійне ускладнення системних функцій та функціонального гомеостазу при сходженні від нижнього рівня ієрархії до верхнього являє собою ще один вид гомеостазу — **системно-ієрархічний**. Порушення цього виду гомеостазу призводить до дезінтеграції цілісного організму. Саме параметричний, функціональний та системно-ієрархічний гомеостаз становлять фундамент і забезпечують **системний гомеостаз** організму як цілісного утворення. Відносна динамічна сталість параметрів — це знаходження їх в діапазоні мінливості, що забезпечує нормальне функціонування фізіологічних систем внутрішньої сфери організму. Нормальне функціонування фізіологічної системи — це і є функціональний гомеостаз, тобто динамічно стійке виконання системної функції *незалежно* від збурювальних впливів, що можуть відбуватися як у внутрішньому, так і в зовнішньому середовищах. Поняття «незалежність», яке використовується у визначенні системного гомеостазу, безпосередньо пов'язане з можливістю підтримання гомеостазу, тобто поки є гомеостаз, існує незалежність відносно динамічної постійності параметрів так само, як і незалежність динамічно стійкої структурно-функціональної організації фізіологічної системи як цілісної.

Щодо системи регуляції вуглеводного обміну, що розглядається в цьому розділі, то спираючись на достатньо ретельні дослідження фізіологів, можна стверджувати, що вона забезпечує достатньо стійкий гомеостаз, який протидіє збурювальним впливам періодичних прийомів їжі, що чергуються з періодами голодування різної тривалості, фізичними навантаженнями та різними стресовими ситуаціями. На фоні таких зовнішніх впливів внутрішній глюкозний гомеостаз (параметричний) — збереження концентрації глюкози крові в певних межах — забезпечує діяльність органів і тканин, для яких глюкоза є основним постачальником енергії. Головне призначення системи — своєчасне забезпечення всіх органів і тканин організму вуглеводами — одним із основних енергетичних метаболітів. При цьому виконується системна функція гомеостазу.

Здатність обміну із зовнішнім середовищем на різних рівнях взаємодії речовиною, енергією, інформацією, тобто включення у внутрішні метаболічні процеси компонентів, необхідних для життєспроможності та життєдіяльності, та виведення з організму відпрацьованих і вже не потрібних — це є механізм, створений природою, за допомогою якого живі системи у процесі розвитку змогли створити доволі досконалі системи регуляції. Вони здатні забезпечувати взаємозв'язок між відкритістю фізіологічних систем організму та його бар'єрними, захисними функціями.

Для кращого розуміння функціонування системи регуляції, що розглядається в цілому, доцільно розглянути особливості її роботи за різних умов зовнішнього впливу, аналізуючи при цьому зміни, що виникають при надходженні в організм вуглеводонасиченої їжі (стан гіперглікемії) та при дефіциті вуглеводів, коли їх запаси витрачені (стан гіпоглікемії), інакше кажучи, розглянути умови роботи фізіологічної системи при включенні різних контурів регуляції.

Контур регуляції параметричного гомеостазу при гіперглікемії. Розглянемо роботу системи при надлишку вуглеводів в організмі, за якого в крові виникає гіперглікемія. Складні вуглеводи, що надходять з їжею, в шлунково-кишковому тракті розщеплюються на моноцукри і всмоктуються в кров переважно в тонкому кишечнику. Кров, виконуючи свою транспортну функцію, постачає цей життєво важливий енергетичний продукт до тканин-споживачів. Навіть на цьому етапі діють принципи ієрархії, удосконалені природою. В процесі еволюції в живому організмі сформувалися інсулінозалежні та інсулінонезалежні тканини. В інсулінозалежних тканинах глюкоза використовується клітинами тільки за допомогою інсуліну, утилізація глюкози в інсулінонезалежних тканинах відбувається без інсуліну.

Природа захистила себе, відібравши для інсулінонезалежних переважно тканини головного мозку та центральної нервової системи — найважливіші координуючі органи, які можуть повноцінно виконувати свої регулювальні функції і без наявності інсуліну. Так, у разі захворювання на діабет енергопостачання в ці тканини не припиняється. Природою відпрацьовані найсприятливіші механізми доставки енергоносіїв до цих найважливіших для повноцінного функціонування тканин організму.

Інсулінозалежні тканини — це переважно м'язова, жирова та печінкова. Коли в крові створюється надлишок глюкози, яка надійшла ззовні, крім оперативного забезпечення інсулінонезалежних органів та підтримання базового функціонування фізіологіч-

них систем вона відкладається в запас, резервується в печінці та м'язах у вигляді енергетичного субстрату — глікогену.

Процеси транспорту, доставки і розподілу глюкози в організмі регулюються нейроендокринними механізмами. Головним стимулятором секреції основного регулювального гормону в умовах гіперглікемії — інсуліну — є глюкоза. Інформація про підвищення концентрації циркулюючої в крові глюкози сприймається специфічними рецепторами, які передають її інтегративним структурам мозку, зокрема гіпоталамусу, в якому формується керуючий (координуючий) сигнал: збудження через глюкорекцептори гіпоталамуса по блукаючому нерву передається β -клітинам підшлункової залози і викликає при цьому додаткову секрецію інсуліну. Додаткові порції інсуліну, які з'являються при цьому в крові, є ключовим сигналом, що спрямовує метаболізм на засвоєння надлишків глюкози тканинами організму і резервуванню її в вигляді глікогену в печінці та м'язах. В результаті рівень глікемії через деякий час повертається до початкових значень, у свої гомеостатичні границі, заповнивши перед цим свої депо запасною енергією.

Контур регуляції параметричного гомеостазу при гіпоглікемії. Робота системи регуляції глікемії за відсутності надходження в організм вуглеводів характеризується переходом метаболізму глюкози від стану ситості до стану голоду. При цьому включаються механізми регулювання, що сприяють вивільненню глюкози з резервних запасів (депо). В цих умовах єдиним джерелом глюкози в організмі є печінка, в якій процес синтезу глікогену переключається на процес його розщеплення — глікогенолізу, тобто на вивільнення глюкози із резервних запасів і постачання її в кров'яне русло. В цьому разі гормональним сигналом, що розпочинає глікогеноліз, є зниження рівня інсуліну, внаслідок чого утилізація глюкози переходить на інсулінонезалежний шлях і відбувається переважно в тканинах мозку та центральної нервової системи. При цьому допустиме невелике зниження рівня глюкози.

Інформація про зниження рівня глікемії сприймається специфічними рецепторами гіпоталамуса, в якому формується кілька контурів корекції гіпоглікемії, внаслідок чого стимулюється продукція ряду гормонів гіперглікемізуючої дії. Серед них важлива роль належить глюкагону. Це контрінсулярний гормон, що виділяється з α -клітин підшлункової залози, секреція якого ініціюється у відповідь на сигнал про низький рівень глікемії, що надходить із ЦНС по симпатичних волокнах. Водночас у надниркових залозах збільшується активність групи контрінсулярних гормонів — катехоламінів, серед яких найголовніша роль нале-

жить адреналіну. До контрінсулярних гормонів належить також група глюкокортикоїдів, які також виробляються в надниркових залозах. Усі ці нейроендокринні чинники активізують процеси глікогенолізу, вивільнення глюкози з резервних запасів, чим і сприяють підвищенню вмісту глюкози в крові.

Функціональний гомеостаз як виконання системних функцій. Органи та системи, що беруть участь у регулюванні вмісту глюкози, чітко виконують роль, яка їм відведена еволюцією в загальній системі функціонування.

Особливе місце в цій регуляції належить *печінці*. Це єдиний орган, який за допомогою секреції виділяє в кров глюкозу за відсутності її постачання з їжею. *Системна функція печінки* — своєчасне вивільнення глюкози з депонованої форми в судинне русло.

Підшлункова залоза — орган, який поряд із внутрішньою секреторною функцією виконує зовнішньосекреторну роль, секретує в кров єдиний гормон, що знижує рівень цукру, — інсулін та один із гормонів, що підвищують рівень цукру, — глюкагон. Основна її роль в регуляції глікемії полягає в їх синтезі та своєчасній секреції.

Нирки виконують порогову функцію. Це своєрідний клапан — орган, який працює в аварійних ситуаціях. У разі небезпечної гіперглікемії, коли рівень глюкози перевищує граничне допустиме значення — 9,99 ммоль/л, нирки виводять надлишки глюкози із сечею. *Системна функція нирок* — звільнення організму від надлишків глюкози.

Тканини головного мозку, ЦНС, м'язові тканини, тканини інших органів — головні споживачі глюкози, 70 % її утилізується мозком і ЦНС, 30 % — м'язовими тканинами та іншими органами. Всі регулювальні системи налаштовані на своєчасне забезпечення цих тканин енергією. Це і є їх системною функцією.

Системною функцією групи ендокринних впливів гіперглікемізуючого призначення є своєчасне включення в загальносистемну регуляцію чинників, які сприяють вивільненню енергії з резервних запасів організму.

Дуже важлива роль належить *гіпоталамусу*. Його *системна функція* — координація. З одного боку, він сприймає інформацію із зовнішнього середовища, з іншого — реагує на сигнали від внутрішніх органів, порівнюючи при цьому спроможності роботи системи з потребами організму.

Таким чином, процес забезпечення потреб організму щодо глюкози реалізується багатокомпонентною системою взаємопов'язаних процесів, які ретельно координуються нейроендокрин-

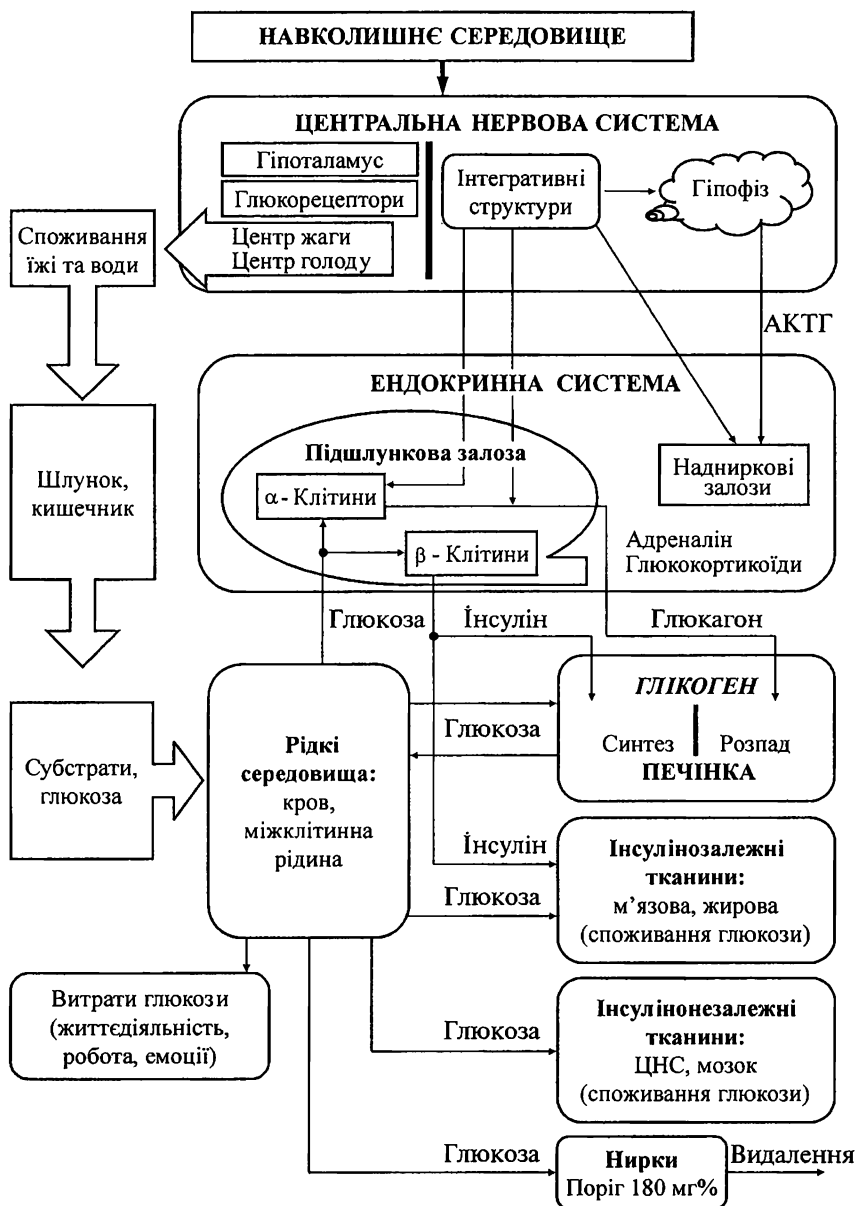


Рис. 2.6. Схема процесів регуляції в системі вуглеводного обміну

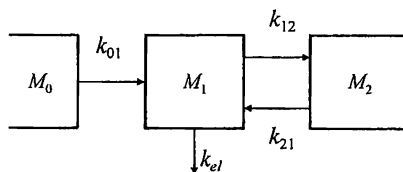
ними механізмами. Викладене вище дає лише загальне уявлення про процеси регуляції, що відбуваються в цій складній системі. Схематично воно представлене на рис. 2.6.

2.3.2. Математичне моделювання

Методологія компартментального моделювання системи вуглеводного обміну. В попередніх главах розглядалися інформаційні технології синтезу математичних моделей, різних за призначенням та структурно-функціональними особливостями. Зупинимось тепер на методології *компартментального моделювання*, яка була започаткована при моделюванні розподілу радіоактивних речовин у біологічних системах, а потім принципи такого синтезу математичних моделей були перенесені на фармако- і токсикокінетику. Проблеми застосування методів компартментального моделювання для опису біологічних систем обговорюються в працях Ю.Г. Антомонова, В.М. Новосельцева та ін.

В основі компартментального моделювання лежить уявлення про цілісний організм або про окрему систему, що вивчається, або про орган чи клітину як про сукупність об'ємів, компартментів, камер (іноді застосовують термін «уявний простір»), де розподіляється, транспортується, переноситься, перетворюється речовина, яка цікавить дослідника. Зрозуміло, що вивчати цілісний організм на клітинному рівні деталізації неможливо. Це може призвести до такого збільшення розмірності інформаційного простору підсистеми, яка вивчається, що значно ускладнить вирішення поставленого завдання, а може й взагалі унеможливити досягнення поставленої цілі. Цей підхід означає, що на будь-якому рівні ієрархії треба обирати адекватні структурні елементи системи, що моделюється. Якщо це фізіологічна система, наприклад система вуглеводного обміну, то адекватними елементами для деталізації будуть органи, які беруть участь у регуляції, та транспортна система кровообігу. Поняття компартмент, або камера, що використовуються при компартментальному моделюванні, є доволі умовним наближенням до реальної анатомо-фізіологічної організації системи. Причина такого спрощення анатомо-фізіологічної структури обґрунтовується тим, що, по-перше, точно відобразити реальну живу структуру принципово неможливо за будь-якого моделювання і компартментального також. По-друге, метою дослідження є не опис життєдіяльності організму, а формальне дослідження розподілу та руху по ньому речовини, що вивчається, згідно з розробленою компартментальною структурою.

Рис. 2.7. Структурна схема двокамерної моделі розподілу введеної ззовні речовини



У чистому вигляді використати цю методологію для математичного опису фізіологічних систем регуляції не вдається, оскільки, як правило, вони багатовимірні, їхнє функціонування підтримується не тільки потоками різних речовин, метаболітів, гормонів, а й системою складних зв'язків нервового та нейроендокринного характеру, які утворюють складні регулювальні системи, через що їх математичні прототипи в багатьох випадках мають високу розмірність. У цьому разі схеми для моделювання цілісної системи в термінах компартментального аналізу складаються з окремих підсистем, пов'язаних між собою додатковими інформаційними зв'язками.

Розглянемо, наприклад, схему двокамерної моделі розподілу введеної ззовні речовини в кількості M_0 , яка спочатку потрапляє в кров в кількості M_1 , а потім у тканини організму, де кількість її позначимо як — M_2 . На рис. 2.7 представлено схему розподілу речовини для цього випадку. На цьому простому прикладі спробуємо пояснити загальні принципи компартментального моделювання. Індекси при літері M означають номери камер, стрілки — напрямки переносу речовини між камерами, літери з індексами k_{ij} — напрямки швидкостей переносу з i -тої камери в j -ту. Константа k_{el} — це константа швидкості елімінації (від латинського *eliminatio* — виведення з організму). Для кожної з камер, користуючись законом збереження маси, складаються диференціальні рівняння балансу. Тоді система рівнянь матиме вигляд

$$\begin{aligned}\frac{dM_0}{dt} &= -k_{01}M_0; \\ \frac{dM_1}{dt} &= k_{01}M_0 - (k_{el} + k_{12})M_1 + k_{21}M_2; \\ \frac{dM_2}{dt} &= k_{12}M_1 - k_{21}M_2.\end{aligned}\tag{2.3.1}$$

Процедура ідентифікації параметрів моделі потребує наявності певної кількості експериментальних даних.

Спроби використати елементи аналогічної технології при моделюванні системи регуляції вуглеводного обміну були здійснені

В.М. Новосельцевим, Кобеллі та ін. При цьому зазначимо, що авторам через складність системи довелося використати в своїх дослідженнях складніший, різноманітніший математичний апарат і доповнити його значною кількістю нелінійних функціональних залежностей.

При цьому структурні особливості моделей, їх складність визначаються цілями досліджень. Складніші моделі, які детальніше враховують фізіологічні механізми, що забезпечують функціонування системи регуляції в різних ситуаціях, використовуються частіше для дослідницьких цілей. На таких математичних структурах можна перевіряти різні гіпотези про роботу системи в нормі та за деяких патологічних станів.

Максимальна модель. Розглянемо *математичну модель ускладненого типу* системи регуляції вуглеводного обміну, розроблену Кобеллі, Федерспілом і співавторами та реалізовану в наших умовах. Для математичних моделей, розроблених з урахуванням сучасних знань про функціонування системи, що вивчається, використовується термін *максимальні моделі (maxmod)*.

Блок-схема системи регуляції. В основі моделі лежить уявлення про систему, що зв'яже в єдине ціле три основні підсистеми, які забезпечують регуляцію глікемії: підсистему регуляції глюкози; підсистему регуляції інсуліну; підсистему регуляції глюкагону. Зазначимо при цьому, що підсистеми функціонування інсуліну та глюкагону — це основні ендокринні фактори, що регулюють рівень глюкози в широкому діапазоні їх змінення, віддаючи перевагу одному з них залежно від того, якого значення набуває рівень глюкози — низького або підвищеного.

Застосовуючи технологію компартментального моделювання для *підсистеми регуляції глюкози*, зауважимо, що цей метаболіт розподіляється по всьому рідинному простору організму, включаючи плазму і міжклітинну рідину. Динаміка глюкози всередині цього об'єму визначається співвідношенням вхідних і вихідних потоків, які поставляють глюкозу всередину його та виводять з нього. При цьому слід зауважити, що єдиним джерелом постачання глюкози в кров за умови відсутності її надходження з їжею є печінка. Введемо поняття *гепатичний глюкозний баланс* — це глікогенна функція печінки, яка являє собою різницю між її глікогеносинтезуючою та глікогенолізуючою здатністю. Величина гепатичного глюкозного балансу, позначимо її HGB, може бути і від'ємною у випадку, коли швидкість процесів синтезу глікогену перевищує швидкість процесів продукції глюкози печінкою.

Запишемо таке рівняння:

$$\text{HGB} = F_1(x_1, u_{12}, u_2) - F_2(x_1, u_{12}),$$

де F_1 — функція, що моделює продукцію (секрецію) глюкози (глікогеноліз); F_2 — функція, яка відповідає процесу глікогеносинтезу; x_1 — вміст глюкози в плазмі; u_{12} — вміст інсуліну в печінці; u_2 — вміст глюкагону в плазмі.

Вихідні потоки, що сприяють зниженню рівня глюкози в крові, формуються в результаті периферичного, залежного від інсуліну поглинання глюкози, який позначимо через $F_4(x_1, u_{13})$, інсулінонезалежної утилізації в ЦНС — $F_5(x_1)$, а також в результаті елімінації через нирки — $F_3(x_1)$. Вхідні та вихідні потоки, які створюють баланс глюкози в глюкозному компартменті схематично представлені на рис. 2.8. Використовуючи закон збереження мас, складемо рівняння балансу глюкози

$$\begin{aligned} dx_1(t)/dt = & F_1(x_1, u_{12}, u_2) - F_2(x_1, u_{12}) - F_3(x_1) - \\ & - F_4(x_1, u_{13}) - F_5(x_1) + I_x(t), \quad x(0) = x_{10}, \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

де $I_x(t)$ — функція часу, яка моделює зовнішні впливи, що можуть означати постачання глюкози з їжею або з терапевтичними ін'єкціями.

Підсистема інсуліну. Уявімо процеси синтезу, секреції, транспорту і розподілу інсуліну у вигляді системи, що складається з п'яти компартментів (рис. 2.9). На цьому рисунку введені такі позначення:

u_{1p} — кількість інсуліну, депонованого в підшлунковій залозі;

u_{2p} — кількість інсуліну, що знаходиться в підшлунковій залозі в лабільній формі, який легко виділяється в кров при підвищенні рівня глюкози;

u_{11} — вміст інсуліну в крові;

u_{12} — кількість інсуліну у ворітній вені;

u_{13} — кількість інсуліну в міжклітинній рідині;

$m_{ij}, (i = 0, 1, 2; j = 1, 2, 3); k_{ij} (i = 0, 1, 2; j = 1, 2)$ — константи швидкостей переносу інсуліну між компартментами;

$W(x_1)$ — функція, що характеризує синтез інсуліну в підшлунковій залозі, яка залежить від вмісту глюкози в крові;

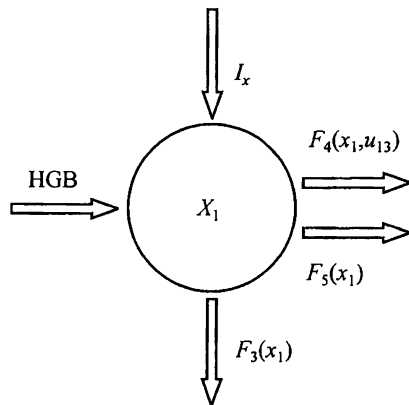


Рис. 2.8. Схема глюкозного компартменту. Вхідні та вихідні потоки

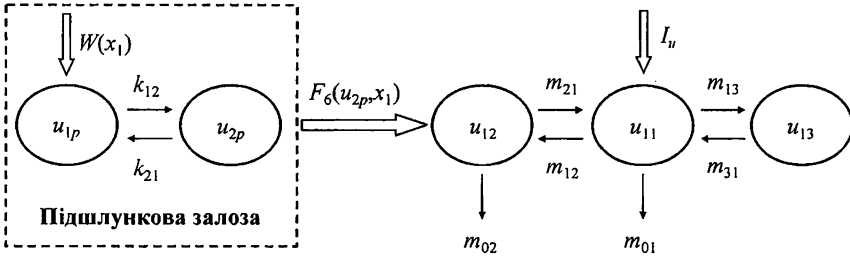


Рис. 2.9. Схема п'ятикомпарментальної моделі розподілу інсуліну в організмі

$F_6(u_{2p}, x_1)$ — функція, що характеризує секрецію інсуліну β -клітинами;

$I_u(t)$ — функція, що моделює надходження інсуліну ззовні: ін'єкція або інфузія.

Підсистема глюкагону представлена одним компарментом. Вхідним потоком є секреція глюкагону α -клітинами підшлункової залози, вихідним — його метаболічні перетворення (рис. 2.10). Тут $F_7(x_1, u_{13})$ — функція, що характеризує швидкість секреції глюкагону; h_{02} — стала величина, яка характеризує метаболічні перетворення глюкагону, тобто видалення його з крові.

Зважаючи на викладене вище та на закон збереження мас, запишемо рівняння балансу речовин, що моделюються, а саме рівняння балансу глюкози (воно наведене вище), рівняння балансу інсуліну в різних частинах організму та глюкагону в крові. Разом вони складають математичну модель системи регуляції глюкози в крові:

$$\begin{aligned}
 dx_1(t)/dt &= F_1(x_1, u_{12}, u_2) - F_2(x_1, u_{12}) - F_3(x_1) - \\
 &\quad - F_4(x_1, u_{13}) - F_5(x_1) + I_x(t), \quad x_1(0) = x_{10}; \\
 du_{1p}(t)/dt &= -k_{12} u_{1p} + k_{21} u_{2p} + W(x_1), \quad u_{1p}(0) = u_{1p0}; \\
 du_{2p}(t)/dt &= k_{12} u_{1p} - k_{21} u_{2p} - F_6(u_{2p}, x_1), \quad u_{2p}(0) = u_{2p0}; \\
 &\quad F_6(x_1, u_{2p}) = k_{02}(x_1) u_{2p}; \\
 du_{11}(t)/dt &= -(m_{01} + m_{12} + m_{13})u_{11} + m_{21}u_{12} + m_{31}u_{13} + \\
 &\quad + I_u(t), \quad u_{11}(0) = u_{110}; \\
 du_{12}(t)/dt &= -(m_{02} + m_{21})u_{12} + m_{12}u_{11} + k_{02}(x_1)u_{2p}, \quad u_{12}(0) = u_{120}; \\
 du_{13}(t)/dt &= -m_{31}u_{13} + m_{13}u_{11}, \quad u_{13}(0) = u_{130}; \\
 du_2(t)/dt &= -h_{02}u_2 + F_7(x_1, u_{13}), \quad u_2(0) = u_{20}.
 \end{aligned}
 \tag{2.3.3}$$

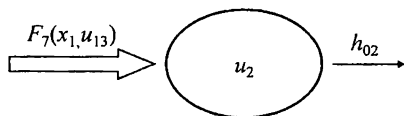
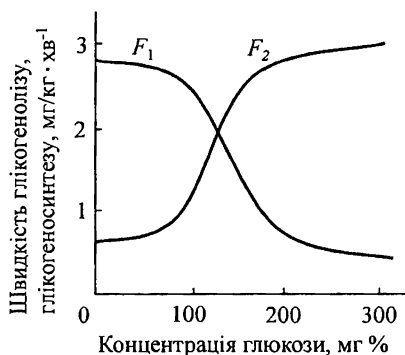


Рис. 2.10. Схема однокомпартментальної моделі глюкагону. Вхідний і вихідний потоки

Рис. 2.11. Функціональні залежності швидкості глікогенолізу (продукції глюкози) F_1 і глікогеносинтезу (поглинання глюкози) F_2 від концентрації глюкози в плазмі крові



Зауважимо, що $F_1 \div F_2$, W — нелінійні функції, що задаються різними комбінаціями сигмоїдальних залежностей, параметри яких верифіковані шляхом аналізу літературних даних та проведенням спеціальних досліджень. Для прикладу розглянемо процес формування функції F_1 .

F_1 — швидкість продукції глюкози печінкою. Цей складний процес залежить як від концентрації глюкози в плазмі крові, так і від впливу на нього ендокринних чинників, пов'язаних із вмістом у тканинах печінки інсуліну (u_{12}) і глюкагону (u_2). Для математичного опису взаємодії цих процесів пропонується функція, що являє собою добуток трьох функцій, які моделюють внесок кожної з трьох складових (глюкози, інсуліну, глюкагону) в підсумковий процес формування швидкості продукції глюкози тканинами печінки

$$\begin{aligned} F_1(x_1, u_{12}, u_2) &= a_{11} G_1(u_2) H_1(u_{12}) M_1(x_1); \\ G_1(u_2) &= 0,5 \{1 + th[b_{11}(e_{21} + c_{11})]\}; \\ H_1(u_{12}) &= 0,5 \{1 - th[b_{12}(e_{12} + c_{12})]\}; \\ M_1(x_1) &= 0,5 \{1 - th[b_{13}(e_x + c_{13})]\}. \end{aligned}$$

Тут a_{11} , b_{ij} , c_{ij} — постійні параметри; e_x , e_{12} , e_{21} — відхилення поточних значень концентрацій глюкози, інсуліну і глюкагону від своїх базальних рівнів, що можуть відповідати середнім значенням у нормі:

$$\begin{aligned} e_x &= \frac{x_1 - x_1^{baz}}{V_1}; \quad e_{12} = \frac{u_{12} - u_{12}^{baz}}{V_{12}}; \quad e_{21} = \frac{u_2 - u_2^{baz}}{V_2}; \\ V_1 &= 20 \% P; \quad V_{12} = 3 \% P; \quad V_2 = 20 \% P, \end{aligned}$$

де P — маса тіла.

Функція F_2 представляє швидкість вбирання глюкози печінкою залежно від концентрації її в крові (x_1) та від рівня інсуліну (u_{12}) в тканинах печінки. Структура її має вигляд:

$$F_2(x_1, u_{12}) = H_2(u_{12}) M_2(x_1);$$

$$H_2(u_{12}) = 0,5 \{1 + th [b_{21}(e_{12} + c_{12})]\};$$

$$M_2(x_1) = a_{12} + a_{22} 0,5 \{1 + th [b_{22}(e_x + c_{22})]\}.$$

Тут $H_2(u_{12})$ — функція, що визначає складову в загальному процесі глікогеносинтезу, пов'язану з впливом інсуліну на метаболічні перетворення глюкози в печінці; $M_2(x_1)$ — частина функції F_2 , яка в складному процесі депонування та утилізації глюкози в печінці характеризує залежність цього процесу від глюкози. Рис. 2.11 ілюструє функції F_1 , F_2 залежно від концентрації глюкози в плазмі крові. Як показує графік, у разі підвищення рівня глюкози в крові швидкість її поглинання печінкою (відкладання в запас) також збільшується і при цьому зменшується її надходження в кров і навпаки, ці процеси мають зворотний характер у разі зменшення концентрації глюкози. Функції $F_3 \div F_7$ конструюються аналогічно.

Після створення структури та рівнянь математичної моделі цілком природно постає питання про ідентифікацію і верифікацію її параметрів. Зауважимо, що ідентифікація — це більш-менш точно визначена своїм математичним алгоритмом процедура обчислення невідомих параметрів за наявності певної кількості цілеспрямованих експериментальних даних. За наявності складних математичних структур і великої кількості невідомих параметрів (а їх у цій моделі 40), як правило, точну ідентифікацію провести неможливо. В цьому разі використовують процедуру *біологічної ідентифікації*, або *верифікації* параметрів, враховуючи весь комплекс знань та кількісної інформації, одержаної та накопиченої про систему, що вивчається, за весь період її дослідження. Саме така методологія була застосована при параметризації наведеної моделі, що засвідчує багато посилань на експертний аналіз та ретельно проведені фізіологічні дослідження.

Одним із методів перевірки моделі на адекватність може бути також *аналіз чутливості*, яка полягає у вивченні розв'язків системи при варіаціях параметрів. При цьому осмислення теоретичних кривих, одержаних на моделі зі зміненими параметрами, дає можливість визначити міру адекватності моделі тим фізіологіч-

ним положенням, які покладені в її основу. Якщо варіації рішень відповідають відомим фізіологічним даним або фактам про поведінку системи зі зміненими властивостями, або не будуть суперечити фізіологічній логіці за відсутності таких відомостей, це може свідчити про справедливність гіпотез, покладених в основу функціонування моделі.

Проведений на цій моделі обчислювальний експеримент з варіаціями параметрів дав змогу одержати розв'язки, властиві поведінці системи в нормі та за різних типів діабету. При цьому досліджувалась поведінка всіх складових моделі в умовах внутрішньовенного тесту толерантності до глюкози, а також інфузії глюкози та інсуліну.

За такої цілеспрямованої зміни структури та параметрів моделі регуляції глікемії, а саме коефіцієнтів моделі, що відповідають за чутливість підшлункової залози та інсулінозалежних тканин до концентрації глюкози в крові, В.М. Новосельцев та О.В. Древаль перевірили на розроблений ними моделі патогенетичні гіпотези виникнення діабету різних типів. Адекватність моделей в цьому випадку засвідчують отримані глікемічні криві, характерні для інсулінозалежного та інсулінонезалежного типів цукрового діабету.

Мінімальні моделі. Важко погодитись із твердженням фахівців з фізіології, що бажання при формальному математичному описі спростити реальні фізіологічні механізми збиває з правильного шляху. На це можна сказати, що модель, проста чи складна, повинна мати ясно визначену мету і проблема адекватності — це практично встановлення її відповідності конкретній цілі моделювання, а не бажання відобразити всю різноманітність живої природи математичними засобами. В цьому сенсі, враховуючи діалектичну складність проблеми моделювання взагалі, думка багатьох дослідників про право на існування різних за складністю моделей, нам здається пліднішою, ніж критична позиція авторів щодо спрощених моделей глікемічного гомеостазу. Сам термін *мінімальні моделі (minmod)*, очевидно, був введений Бергманом, принаймні у більшості публікацій посилаються саме на нього.

Привабливість мінімальних моделей щодо використання їх для вирішення різних практичних завдань клінічної практики полягає в тому, що маючи обмежену кількість невідомих параметрів, вони порівняно легко ідентифікуються. Низька розмірність і проста структура системи рівнянь моделей такого типу дають змогу проводити аналіз та розв'язувати задачі раціонального підбору керуючих впливів із застосуванням методів

теорії оптимізації. Для прикладу наведемо модель такого типу, яка враховує глюкозо-інсулінові зв'язки в організмі:

$$\frac{dy}{dt} = -a_{11}(y - y_n) - a_{12}(i - i_n) + g(t, y, i); \quad (2.3.4)$$

$$\frac{di}{dt} = a_{21}(y - y_n) - a_{22}(i - i_n) + v(t, y, i),$$

де y — концентрація глюкози в крові; i — концентрація інсуліну в крові; y_n — середнє фізіологічне значення глюкози в крові натще; i_n — середнє фізіологічне значення інсуліну в крові натще; $g(t, y, i)$ — функція, що представляє зовнішні надходження глюкози в кров; $v(t, y, i)$ — функція, що представляє зовнішні надходження інсулінових препаратів в кров; a_{ij} — сталі величини, що відображають чутливість моделі до відповідних відхилень.

Зауважимо, що при моделюванні — складному чи спрощеному — треба зважати на те, що система вуглеводного обміну в будь-якому з цих випадків є структурним елементом цілісного організму, тобто інтегрованішої гомеостатичної системи. Ця система може функціонувати в сприятливому або не дуже зовнішньому оточенні. Тому моделювання окремої частки організму — це завжди розрив зв'язків. З теоретичної точки зору бажано при математичному описанні замінити відкинуті зв'язки на їх реакції для моделювання впливу тієї частини цілісної системи, яка при цьому не розглядається. Часто при моделюванні системи регуляції глікемії це робиться введенням у праві частини рівнянь зовнішніх функцій впливу, що імітують або глюкозний еквівалент їжі, або глюкозний дефіцит як енергетичний еквівалент фізичного навантаження. Навіть якщо це і зроблено, отримані детерміновані розв'язки слід розглядати як один із можливих варіантів розвитку подій в системі, що моделюється, який, можливо, ніколи точно і не реалізується, але тенденція перебігу процесу виконується при цьому з певною відповідністю.

Моделювальний комплекс для імітаційного дослідження зовнішніх керуючих впливів. Різні за складністю математичні моделі вже відіграли свою значну роль у наукових дослідженнях, але їх можливості виявилися далеко не вичерпаними. Окремі моделі як самостійний інструмент вже не завжди можуть задовольнити поставлені цілі. Їх функціональні можливості можна суттєво розширити, створюючи моделювальні комплекси, в яких використовуються різні за складністю моделі одночасно.

З метою доклінічної перевірки алгоритмів, отриманих на спрощених моделях (*minmod*), проводиться імітаційне дослідження з використанням складнішої моделі (*maxmod*), в якій структура і функціональні співвідношення елементів значно більшою мірою відображають реальне функціонування системи. Зауважимо, що моделі такого рівня складні, мають багато зв'язків, нелінійні та надто громіздкі для розв'язку задач керування математичними методами. Вони мають велику кількість параметрів, ідентифікація яких для індивідуалізації моделі неможлива як через «прокляття розмірності», так і неможливість отримання в реальних умовах експериментально-діагностичних даних про більшість внутрішніх процесів, які відбуваються у фізіологічній системі, що досліджується, в умовах звичайного лікувального закладу.

Використання в доклінічному дослідженні як об'єкта керування складнішої моделі, ніж ті, за допомогою яких синтезувалися керуючі алгоритми, відображає принципову неможливість абсолютно адекватного математичного опису реальних фізіологічних процесів.

Процедура доклінічного дослідження. Модель *maxmod* імітує реальний об'єкт, з якого реєструють вимірювання із заданою дискретністю, неточністю, наявністю непередбачених збурень. За результатами цих вимірювань індивідуалізуються параметри моделі *minmod*.

Потім на ці обидві моделі подаються стандартні навантаження, які передбачаються на найближчу добу (мається на увазі режим харчування і фізичного навантаження). Далі за величиною отриманої розбіжності розв'язків цих моделей оцінюється можливість використання мінімальної моделі для прогнозування динаміки рівня глікемії. Якщо розбіжність розв'язків залишається в допустимих межах, мінімальна модель може бути застосована для вибору необхідних керуючих впливів. У протилежному випадку треба вирішити питання про додаткові вимірювання для забезпечення корекції параметрів прогнозуючої моделі. За допомогою отриманої таким чином моделі *minmod* надається можливість послідовно відпрацювати різні варіанти інсулінотерапії, дієти, що містить вуглеводи, та фізичні навантаження і виявити при цьому небезпечні ситуації та зони ризику, пов'язані з виходом регульованої величини із зони допустимих значень і виключити їх з розгляду шляхом раціонального вибору керуючих впливів. Далі ефективність відпрацьованої процедури керування перевіряється на моделі *maxmod*.

Традиційний підхід до вирішення цієї проблеми з використанням досліджень на тваринах і наступними клінічними дослідженнями пов'язаний з відомими ускладненнями гуманітарного та етичного порядку. Обчислювальний експеримент на запропонованому дворівневому комплексі дає змогу вирішити ряд методичних і процедурних питань значно швидше і суттєво дешевше, не відмінюючи, безумовно, остаточного вдосконалення в клініці. Особливою перевагою такого підходу є можливість багаторазових випробувань на одному й тому ж об'єкті *in model*, що принципово неможливо в дослідженнях *in vivo*.

2.3.3. Алгоритми керування.

Синтез алгоритму зі зворотним зв'язком

Проблеми. У тих випадках, коли гомеостатичний ресурс вичерпується і сам організм не в змозі підтримувати фізіологічні параметри в гомеостатичних межах, виникають патологічні стани, спричинені порушенням життєво важливих функцій. В цьому разі треба використовувати зовнішні керуючі можливості впливу на порушені функції. Завдання зовнішнього керування полягає в раціональному застосуванні наявних можливостей вибору коригуючих екзогенних впливів. Метою такої корекції є компенсація порушень, що виникли під впливом патогенних чинників на структурні та (або) функціональні характеристики об'єкта. Якщо усунення причини патології неможливе чи потребує значних витрат часу, що перевищує ресурс виживання, важливим, а можливо, й єдиним завданням зовнішнього керування залишається саме компенсація патологічної дисфункції, яка має забезпечити життєдіяльність у допустимих гомеостатичних границях. Саме такого типу проблема виникає при зовнішньому керуванні рівнем глікемії у хворих на інсулінозалежний тип цукрового діабету. Патологічні зміни гомеостатичної регуляції при інсулінозалежному діабеті пов'язані з дефіцитом або повною відсутністю в організмі інсуліну — єдиного гормону, що сприяє зниженню вмісту цукру в крові. В цьому випадку проводиться замісна терапія, яка полягає в тому, що гормон, якого не вистачає, в даному разі інсулін, вводиться ззовні. Обов'язково слід дотримуватися, наскільки це можливо, суворої регламентації, яка полягає в чергуванні прийомів їжі та ін'єкцій інсуліну. Метою при цьому є забезпечення в крові такої концентрації глюкози, що не виходить за межі допустимого рівня.

Для удосконалення ін'єкційної терапії, яка не завжди може забезпечити адекватний добовий глікемічний профіль, застосовуються інженерно-фізіологічні методи керування вуглеводним гомеостазом. При цьому виникають проблеми, пов'язані з використанням математичних моделей різного рівня складності, їх ідентифікацією та алгоритмів керування.

Підкреслюючи всю складність створення гомеостатичних систем за допомогою зовнішніх керуючих впливів, зазначимо, що біологічні об'єкти мають при цьому цілий спектр властивостей, що ускладнюють аналіз і синтез відповідних керуючих систем. До них у першу чергу слід віднести недетермінованість об'єкта керування: непередбаченість перебігу тих чи інших фізіологічних процесів пов'язана з тим, що важко прогнозувати вплив зовнішніх чинників з огляду на недетермінований характер більшості таких впливів або зі складністю одержання вірогідної інформації про їх характеристики. Звернімо увагу також на складний характер зв'язків і нечітку визначеність внутрішніх параметрів фізіологічних систем, які значною мірою залежать від коливальних, що природно відбуваються в внутрішній сфері організму. Все вищезазначене ускладнюється ще й відсутністю традиційної для фахівців з теорії керування інформації щодо мети біологічних систем та критеріїв якості їх функціонування.

Ускладнюючою особливістю проблеми зовнішнього керування є також багатовимірність біологічних керованих об'єктів. Лавиноподібне зростання труднощів при збільшенні розмірів фазового простору посилюється надто невисокою мірою безпосередньої спостережуваності біологічних систем та їх параметрів.

Попри те, що зазначені труднощі, здається, не можуть бути подоланими, практика використання методів математичного моделювання як для створення штучних технічних систем, що підтримують життєздатність і життєдіяльність організму в екстремальних ситуаціях, так і в процесі вибору тактики та оцінки ефективності лікувальної терапії достатньою мірою вже підтвердила їх роботоздатність. Розв'язання задачі зовнішнього керування рівнем глікемії як проблеми вибору алгоритмів терапевтичного втручання переважно залежить від доступної в процесі керування інформації про стан об'єкта. Якщо є можливість вимірювати необхідні фізіологічні параметри і оцінювати стан об'єкту в реальному масштабі часу, вважається доцільним використання систем керування зі зворотним зв'язком. При цьому метод замикання контуру керування значною мірою обумовлений об'ємом, якістю та регламентом надходження інформації, що вимірюється.

Синтез алгоритмів оптимального керування системою регуляції глікемії за наявності неперервного зворотного зв'язку. Скористаємось для цього методом аналітичного конструювання регуляторів. *Аналітичне конструювання* — це математична процедура, за допомогою якої можна розв'язувати ті задачі, які доводиться розв'язувати в техніці на початковому етапі конструювання. Для того, щоб виявити та уточнити параметри регуляторів, як правило, ставиться серія спеціальних технічних експериментів, які потребують додаткових витрат. Завчасне математичне конструювання дешевше і скорочує при цьому витрати на технічне доопрацювання розробки.

З причин, які обговорювалися вище, застосуємо для синтезу алгоритму мінімальну математичну модель типу (2.3.4), яка враховує основні глюкозо-інсулінові зв'язки в фізіологічній системі регуляції глікемії. Рівняння, наведені нижче, записані у відхиленнях від стаціонарних значень. При цьому виконана така операція заміни:

$$\begin{aligned} y - y_n &= y, \quad i - i_n = i, \\ \frac{dy}{dt} &= -a_{11} y - a_{12} i + g(t, y), \\ \frac{di}{dt} &= a_{21} y - a_{22} i + v(t, y). \end{aligned} \quad (2.3.5)$$

Постановка задачі. Розглянемо керування об'єктом (2.3.5) за допомогою інсуліну за відсутності надходження в організм глюкози, тобто при $g = 0$. Мета полягає в тому, щоб серед допустимих можливих значень v знайти ті, що приводять величину, яка підлягає регуляції, y до положення стійкої рівноваги і при цьому доставляють мінімум функціоналу (критерію якості)

$$I = \int_0^{\infty} (y^2 + \gamma v^2) dt. \quad (2.3.6)$$

Вибір структури цільового функціоналу в такому вигляді відображає намагання мінімізувати відхилення величини, що регулюється (перший доданок функціоналу), і якомога зменшити витрати інсуліну при виконанні керування процесом (другий доданок). Вибір значення коефіцієнта γ — компроміс між цими двома чинниками.

Формальна процедура. Спочатку запишемо функціональне рівняння Беллмана, основне рівняння динамічного програмуван-

ня, що представляє достатню умову оптимальності

$$0 = \min \left[y^2 + \gamma v^2 + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial y} (-a_{11}y - a_{12}i) + \frac{\partial S}{\partial i} (a_{21}y - a_{22}i + v) \right]. \quad (2.3.7)$$

Суть методу динамічного програмування в тому, що мінімум цієї функції має бути нулем. У цьому разі забезпечується найкраще керування і задовільнення критерію якості (2.3.6). У виразі (2.3.7) S — функція Беллмана, яку треба знайти у вигляді квадратичної форми

$$S = ly^2 + 2myi + ni^2 \quad (2.3.8)$$

з постійними коефіцієнтами l , m , n . Тоді

$$\frac{\partial S}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial y} = 2ly + 2mi; \quad \frac{\partial S}{\partial i} = 2my + 2ni. \quad (2.3.9)$$

Підставивши (2.3.9) у (2.3.7), одержимо

$$0 = \min \left[y^2 + \gamma v^2 + 2(l y + m i)(-a_{11}y - a_{12}i) + 2(m y + n i)(a_{21}y - a_{22}i + v) \right]. \quad (2.3.10)$$

Позначимо

$$W = y^2 + \gamma v^2 + 2(l y + m i)(-a_{11}y - a_{12}i) + 2(m y + n i)(a_{21}y - a_{22}i + v).$$

Необхідна умова мінімуму функції W по v запишеться у вигляді

$$\frac{\partial W}{\partial v} = 2\gamma v + 2(m y + n i) = 0,$$

звідки

$$v = -\frac{1}{\gamma}(m y + n i). \quad (2.3.11)$$

$$\text{Далі } \frac{\partial^2 W}{\partial v^2} = 2\gamma > 0.$$

Те, що $\gamma > 0$, вказує, що функція W насправді при виборі керування за умови (2.3.11) приймає мінімальне значення. Таким чином, рівняння Беллмана (2.3.7) виконано і закон керування (2.3.11) є оптимальним щодо критерію (2.3.6). Зауважимо при цьому, що закон керування (2.3.11), поданий в такій формі, не є зручним для реалізації в системі регуляції рівня глікемії тому, що потребує оперативних вимірювань крім вмісту глюкози ще й концентрації інсуліну в крові.

Зауважимо, що оперативне вимірювання концентрації інсуліну потребує значного часу і не може бути використане в запропонованому алгоритмі керування рівнем глюкози зі зворотним зв'язком. Але наявність рівнянь моделі, зокрема першого рівняння системи (2.3.5), дає змогу вирішити цю проблему заміною інсуліну i , який не підлягає оперативному вимірюванню, поточним значенням рівня глюкози y та швидкістю її зміни dy/dt .

$$i = \frac{1}{a_{12}} \left(-a_{11}y - \frac{dy}{dt} \right).$$

За допомогою цього виразу перетворимо рівняння (2.3.11) таким чином:

$$v = \alpha y + \beta \dot{y}, \quad (2.3.12)$$

де

$$\alpha = \frac{1}{\gamma} \left(n \frac{a_{11}}{a_{12}} - m \right); \quad \beta = \frac{n}{\gamma a_{12}}. \quad (2.3.13)$$

Взагалі метою при розв'язанні задачі аналітичного конструювання є побудова таких регуляторів, які прискорюють приведення фазової координати до положення рівноваги. Параметри регулятора (2.3.12), обчислені за формулами (2.3.13), задовольняють цій умові стійкості, якщо вона не була такою до виконання процесу керування. В задачі, що досліджується, рівень глюкози, до якого її треба знизити, взагалі не є положенням рівноваги, тому що в діабетичному організмі стійкий рівень — це саме той, підвищений, який ми хочемо знизити за допомогою інсуліну. Для того, щоб концентрація глюкози y після її зведення до потрібного значення y_z залишалась на рівні $y = y_z$ ще впродовж тривалого часу, треба продовжувати вводити інсулін з постійною підтримуючою швидкістю, тобто додаючи її до швидкості, яка обчислюється за формулою (2.3.12). Величина цієї швидкості може бути обчислена з рівнянь (2.3.5) за умови $y = y_z$, $dy/dt = 0$. При цьому одержимо

$$v_z = -\lambda y_z, \quad (2.3.14)$$

$$\text{де } \lambda = \frac{a_{12}a_{21} + a_{11}a_{22}}{a_{12}}.$$

Зважаючи на це, закон керування можна записати у вигляді

$$v = \alpha y + \beta \dot{y} + v_z,$$

що й забезпечить стійкість досягнутого стану. З урахуванням (2.3.14) та заміни змінних, що наведена в (2.3.5), перепишемо попередню формулу у вигляді

$$\dot{v} = \alpha(y - y_n) + \beta \dot{y} + \lambda(y_n - y_z). \quad (2.3.15)$$

Аналіз роботи цього алгоритму в імітаційному експерименті показав, що значні відхилення рівня глюкози від бажаного значення призводять до великих швидкостей інфузії інсуліну, які недоцільно використовувати в технічних пристроях розглянутого типу. В зв'язку з цим прийнято рішення перейти до квазіоптимального нелінійного закону управління з урахуванням формул (2.3.14), (2.3.15), на які накладені такі обмеження:

$$v = \begin{cases} v_{\max}, & \text{якщо } v \geq v_{\max}, \\ v, & \text{якщо } 0 < v < v_{\max}, \\ 0, & \text{якщо } v \leq 0, \end{cases} \quad (2.3.16)$$

який, проте, зберігає лінійність, властиву оптимальному закону в доволі широкому діапазоні зміни умов роботи регульовального пристрою. В цьому рівнянні $v_{\max}$ — максимально можливе значення швидкості інфузії, яке може забезпечити технічний пристрій.

2.3.4. Оптимальне програмне керування

Синтез автоматичної системи регуляції рівня глікемії пов'язаний з труднощами створення сенсорів для забезпечення майже неперервного вимірювання вмісту цукру в крові. В зв'язку з тим, що це являє собою доволі складну задачу, доцільною є розробка алгоритмів керування, які не пов'язані з необхідністю використання поточної інформації про вміст цукру в крові. До таких алгоритмів належать алгоритми програмного керування.

Ми не будемо розглядати теоретичні основи цього питання. Зупинимось на конкретному прикладі, який може наочно продемонструвати алгоритм синтезу керування в цьому випадку.

Для синтезу оптимального програмного керування необхідно, крім рівнянь функціонування об'єкта і критерію якості перехідного процесу, задати інформацію про початкове і кінцеве значення регульованої координати, тобто те, якого бажано досягти в процесі виконання керуючих заходів. Задача оптимального керування з позицій математичної теорії оптимальних процесів може бути сформульована як варіаційна. Для розв'язання задач подібного типу використовується класичне варіаційне числення

або, за наявності обмежень на керуючі впливи, принцип максимуму. Оскільки в цій задачі основний керуючий фактор — швидкість інфузії інсуліну — обмежений своїм максимальним значенням, яке може бути відтворене технічним пристроєм, аналіз її проведемо за використанням принципу максимуму, широко відомим в теорії керування.

Розглянемо спочатку побудову оптимального керування за швидкодією, тобто такого, що переводить рівень регульованої координати — цукру в крові — із заданого початкового стану $y(0) = 0$ у деякий кінцевий $y(T) = y_z$ за мінімальний час T . Запишемо систему рівнянь (2.3.5) з урахуванням початкових і заданих для досягнення значень:

$$y - y_n = y, \quad i - i_n = i;$$

$$\frac{dy}{dt} = -a_{11}y - a_{12}i + g(t, y); \quad y(0) = 0, \quad y(T) = y_z; \quad (2.3.17)$$

$$\frac{di}{dt} = a_{21}y - a_{22}i + v(t, y); \quad i(0) = 0, \quad i(T) = -\frac{a_{11}}{a_{12}} y_z.$$

Кінцеве значення $i(T)$ вибране з умови рівності нулю в кінцевий момент похідної $\dot{y}(T) = 0$, тобто перехідний процес вважається закінченим, якщо не тільки рівень глікемії приводиться до заданого значення $y = y_z$, а й швидкість його зміни дорівнює нулю, оскільки метою керування є не тільки приведення рівня цукру крові до нового бажаного рівня y_z за час $t = T$, а й тривала підтримка його для всіх $t \geq T$: $y(T) = y_z$, $\dot{y}(T) = 0$. Необхідна для підтримки швидкість подачі інсуліну $v(t)$ може бути визначена з використанням другого рівняння системи (2.3.17) за умови $di/dt = 0$ для $t \geq T$ так, як вона обчислювалась в попередньому параграфі і надається формулою (2.3.14).

Керування $v(t)$ упродовж самого перехідного процесу $0 \leq t \leq T$ визначається за допомогою принципу максимуму. Відповідно до процедури принципу введемо в розгляд функцію Гамільтона H для системи (2.3.17), яка являє собою скалярний добуток вектора F фазової швидкості системи (2.3.17): $F = \{-a_{11}y - a_{12}i, a_{21}y - a_{22}i + v\}$ на вектор узагальненого імпульсу $\Psi = \{\Psi_y, \Psi_i\}$. В результаті отримаємо

$$H = \Psi_y(-a_{11}y - a_{12}i) + \Psi_i(a_{21}y - a_{22}i + v), \quad (2.3.18)$$

де Ψ_y і Ψ_i — узагальнені імпульси мають задовольняти спряжений

системі диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_y}{dt} &= a_{11}\Psi_y - a_{21}\Psi_i, \\ \frac{d\Psi_i}{dt} &= a_{12}\Psi_y + a_{22}\Psi_i.\end{aligned}\tag{2.3.19}$$

Оптимальне керування швидкістю подачі інсуліну $v(t)$ визначається з умови максимуму функції Гамільтона за v :

$$H(v(t)) = \max_{v \in [0, v_0]} H(v),\tag{2.3.20}$$

де v_0 — максимально можливе значення швидкості інфузії інсуліну. Оскільки функція Гамільтона (2.3.17) залежить від керуючої змінної v лінійно, одержимо

$$v(t) = \begin{cases} v_0, & \text{якщо } \Psi_i(t) > 0, \\ 0, & \text{якщо } \Psi_i(t) < 0. \end{cases}\tag{2.3.21}$$

Таким чином, оптимальне керування швидкістю інфузії інсуліну є граничним. Невизначеність керування, якщо $\Psi_i(t) = 0$, не може вплинути на оптимальний перехідний процес, тому що функція $\Psi_i(t)$ не стає нулем на кінцевому проміжку часу. Насправді, якщо $\Psi_i(t) = 0$ в інтервалі кінцевої довжини, то $d\Psi_i/dt$ також дорівнює нулю на цьому проміжку. З другого рівняння системи (2.3.19) дістаємо $\Psi_y(t) = 0$ для тих же значень t . Це суперечить принципу максимуму, згідно з яким існує нетривіальний розв'язок системи (2.3.19) при виконанні оптимального перехідного процесу. Отже, співвідношення (2.3.21) однозначно визначає оптимальне керування в перехідному процесі зниження рівня глікемії. Нулі функції $\Psi_i(t)$ є моментами переключення керування.

Дослідимо поведінку функції переключення $\Psi_i(t)$. Для цього запишемо розв'язок системи (2.3.19) у вигляді

$$\begin{aligned}\Psi_y &= C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t}, \\ \Psi_i &= C_1 \frac{a_{11} - \alpha_1}{a_{21}} e^{\alpha_1 t} + C_2 \frac{a_{11} - \alpha_2}{a_{21}} e^{\alpha_2 t},\end{aligned}\tag{2.3.22}$$

де C_1 і C_2 — довільні сталі інтегрування.

Зважаючи на те, що функція $\Psi_i(t)$ монотонна, вона може поміняти знак лише один раз. Таким чином, на оптимальній тра-

екторії може бути не більше двох проміжків, на яких керування має вказані вище оптимальні значення v_0 та 0. Оскільки йдеться про зниження підвищеного рівня глікемії, керування треба починати інфузією інсуліну з інтенсивністю, яка має граничне значення, наступним є пасивний проміжок, на якому припиняється подача інсуліну.

Розглянемо детальніше цей процес, аналізуючи який, спробуємо обчислити невідомий момент τ припинення введення інсуліну і переходу на пасивний режим керування. Для цього проінтегруємо систему (2.3.17) з урахуванням початкових умов. Розв'язок на першому інтервалі часу $0 \leq t \leq \tau$, якщо $v = v_0$ має вигляд

$$y(t) = -\frac{a_{12}b_2v_0}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2)}(\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t}) - \frac{a_{12}b_2v_0}{\lambda_1\lambda_2}, \quad (2.3.23)$$

$$i(t) = -\frac{b_2 v_0}{\lambda_1 - \lambda_2} \left[e^{\lambda_1 t} \left(1 + \frac{a_{11}}{\lambda_1} \right) - e^{\lambda_2 t} \left(1 + \frac{a_{11}}{\lambda_2} \right) \right] - \frac{a_{11}b_2v_0}{\lambda_1\lambda_2}.$$

У другому пасивному інтервалі $\tau < t \leq T$ (через T позначається момент часу закінчення перехідного процесу і досягнення керованою змінною заданого рівня, який теж невідомий, його треба знайти), коли інсулін не подається $v = 0$, з урахуванням умов неперервності: $y(\tau + 0) = y(\tau)$, $i(\tau + 0) = i(\tau)$, одержуємо розв'язок у такому вигляді:

$$y(t) = -\frac{a_{12}b_2v_0}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2)}(\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t} - \lambda_2 e^{\lambda_1(t-\tau)} - \lambda_1 e^{\lambda_2(t-\tau)}),$$

$$i(t) = -\frac{b_2 v_0}{\lambda_1 - \lambda_2} \left[e^{\lambda_1 t} \left(1 + \frac{a_{11}}{\lambda_1} \right) - e^{\lambda_2 t} \left(1 + \frac{a_{11}}{\lambda_2} \right) - e^{\lambda_1(t-\tau)} \left(1 + \frac{a_{11}}{\lambda_1} \right) - e^{\lambda_2(t-\tau)} \left(1 + \frac{a_{11}}{\lambda_2} \right) \right]. \quad (2.3.24)$$

Для обчислення невідомих моментів часу τ і T скористаємося умовами

$$y(T) = y_z, \quad i(T) = -\frac{a_{11}}{a_{12}} y_z.$$

У результаті алгебраїчних перетворень система (2.3.24) набуває вигляду

$$\begin{aligned} T - \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{e^{-\lambda_1 \tau} - 1}{e^{-\lambda_2 \tau} - 1} &= 0, \\ y_z + \frac{a_{12} b_2 v_0}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{(e^{-\lambda_1 \tau} - 1)^{\lambda_2 / \lambda_2 - \lambda_1}}{(e^{-\lambda_2 \tau} - 1)^{\lambda_1 / \lambda_2 - \lambda_1}} &= 0. \end{aligned} \quad (2.3.25)$$

З другого рівняння системи (2.3.25) при заданих y_z і v_0 визначається оптимальна величина τ , після підстановки якої в перше рівняння однозначно обчислюється значення функціоналу задачі — повний термін перехідного процесу T .

2.3.5. Програмне керування за узагальненим критерієм якості

Найсприятливішим для практичного використання є **критерій оптимальності за критерієм якості**, що водночас враховує і час, за який досягається ціль керування, і витрати лікувального засобу, тобто інсуліну. Запишемо його у вигляді

$$J = \alpha T + \beta I, \quad (2.3.26)$$

де α і β — сталі величини, які означають міру важливості величин T , I .

Якщо $\alpha = 1$ і $\beta = 0$, керування, що мінімізує функціонал (2.3.26), оптимальне за швидкодією, а якщо $\alpha = 0$ і $\beta = 1$ мінімум J відповідає мінімальним витратам інсуліну на виконання перехідного процесу у разі не заданого значення часу його виконання. Початкові та кінцеві умови для $y(t)$ і $i(t)$ передбачимо такими, як і в задачі про синтез оптимального за швидкодією керування (2.3.17).

Доповнимо систему (2.3.17) рівнянням зміни дози інсуліну з відповідною початковою умовою

$$\frac{dI}{dt} = v, \quad I(0) = 0. \quad (2.3.27)$$

Витрати інсуліну $I(t)$ і час виконання перехідного процесу T при цьому не задаються. Оптимальним вважається керування, що мінімізує функціонал (2.3.26).

Тепер функція Гамільтона до системи рівнянь (2.3.17), (2.3.27) матиме вигляд

$$H = \Psi_y(-a_{11}y - a_{12}i) + \Psi_i(a_{21} - a_{22}i + v) + \Psi_v v. \quad (2.3.28)$$

Оптимальне керування $v(t)$, що забезпечує максимум функції Гамільтона, визначається з умови

$$v(t) = \begin{cases} v_0, & \text{якщо } \Psi_i(t) + \Psi_j(t) > 0, \\ 0, & \text{якщо } \Psi_i(t) + \Psi_j(t) < 0. \end{cases} \quad (2.3.29)$$

Система рівнянь для спряжених функцій має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_y}{dt} &= a_{11}\Psi_y - a_{21}\Psi_i, \\ \frac{d\Psi_i}{dt} &= a_{12}\Psi_y + a_{22}\Psi_i, \\ \frac{d\Psi_j}{dt} &= 0. \end{aligned} \quad (2.3.30)$$

Для визначення довільних сталих величин інтегрування, які увійдуть в загальний розв'язок системи, що складається з (2.3.17), (2.3.27) і (2.3.30), маємо лише п'ять граничних умов (див. (2.3.17), (2.3.27)). Оскільки значення функції I в кінцевий момент часу T і сама величина T не фіксовані при формулюванні задачі, треба скористатися умовами трансверсальності

$$\delta J + [\Psi_y \delta y + \Psi_i \delta i + \Psi_j \delta I - H \delta t]_0^T = 0. \quad (2.3.31)$$

У цій формулі δJ — варіація функціоналу (2.3.26)

$$\delta J = \alpha \delta T + \beta \delta I, \quad (2.3.32)$$

δt — варіація часу; δy , δi , δI — варіації функцій $y(t)$, $i(t)$, $I(t)$ — розв'язків системи (2.3.17), (2.3.27).

Підставивши (2.3.32) у (2.3.31) і розкривши в (2.3.31) знак подвійної підстановки дістаємо:

$$\begin{aligned} &\alpha \delta T + \beta \delta I(T) + \Psi_y(T) \delta y(T) + \Psi_i(T) \delta i(T) + \Psi_j(T) \delta I(T) - \\ &- H(T) \delta T - \Psi_y(0) \delta y(0) - \Psi_i(0) \delta i(0) - \Psi_j(0) \delta I(0) + H(0) \delta t = 0. \end{aligned} \quad (2.3.33)$$

Значення функцій $y(t)$, $i(t)$ на початку перехідного процесу, початковий момент часу $t = 0$, і значення $y(T)$, $i(T)$, фіксовані, тому відповідні варіації $\delta y(0)$, $\delta y(T)$, $\delta i(0)$, $\delta i(T)$, δt дорівнюють нулю. Враховуючи це, умова трансверсальності (2.3.33) запишеться у вигляді

$$(\alpha - H(T)) \delta T + (\Psi_j(T) + \beta) \delta I = 0. \quad (2.3.34)$$

Ця умова має виконуватись при довільних незалежних варіаціях δT , δI , що можливо лише, якщо

$$H(T) = \alpha, \quad \Psi_j(T) = -\beta. \quad (2.3.35)$$

Врахувавши третє рівняння системи (2.3.30), одержимо $\Psi_j(t) = -\beta$, а формулу (2.3.29) запишемо таким чином:

$$v(t) = \begin{cases} v_0, & \text{якщо } \Psi_i(t) - \beta > 0, \\ 0, & \text{якщо } \Psi_i(t) - \beta < 0. \end{cases} \quad (2.3.36)$$

Рівняння (2.3.30) для визначення складових спряженої системи $\Psi_i(t)$ і $\Psi_y(t)$ мають такий самий вигляд, як (2.3.19). Вибір функціоналу задачі, значень α і β у випадку, що розглядається, впливає на визначення постійних інтегрування C_1 і C_2 при запису розв'язку (2.3.19) спряженої системи (2.3.22). Як і в попередньому випадку, висновок про те, що функція $\Psi_i(t)$ є монотонною, залишається і в цьому разі справедливим і при мінімізації будь-якої функції кінцевого стану $\Phi(y(T), i(T), T)$, а отже, й функціоналу (2.3.26). Тому функція переключення задачі, що розглядається, $\Psi_i(t) - \beta$ також монотонна, і висновок, зроблений для попереднього випадку, пов'язаний з вибором можливого варіанту оптимального керування, залишається в силі. Таким чином, у задачі на мінімум за узагальненим критерієм, якщо глікемія із заданого стаціонарного стійкого високого рівня знижується до другого стаціонарного — нормального, який утворюється при підтримуючій інфузії v_z (2.3.14), оптимальний процес складається з двох інтервалів — активного $0 < t \leq \tau$, в якому швидкість керування максимальна $v = v_{\max}$, і пасивного $\tau < t \leq T$, в якому $v = 0$. Невідомі моменти τ і T для бажаного рівня y_z , який задається, обчислюються однозначно за формулами, аналогічними (2.3.25), тому інших оптимальних програм для системи (2.3.17) не існує. Таким чином, цей описаний процес є оптимальним як для функціоналу часу, так і для узагальненого критерію (2.3.26).

Алгоритми комбінованого керування рівнем глікемії. Аналіз глікемічних кривих, отриманих при імітаційному моделюванні, показав, що поки значення контрольованого параметра ще далеко від бажаного y_z , можна не проводити частих контрольних вимірювань $y(t)$. У цьому разі доцільно користуватись алгоритмами обчислення керування, що не потребують інформації про поточне значення рівня глікемії. Тому пропонується такий гібридний алгоритм керування. На початковому етапі викори-

стовується програмне керування, розглянуте вище, а починаючи з деякого моменту часу, наприклад з $t_1 \in [\tau, T]$, підключається вимірювальний пристрій. Якщо вимірені значення $y(t)$ не дуже відрізняються від передбачених за формулою (2.3.24), алгоритм керування не змінюється до $t = T$. Якщо ця різниця істотна або $t > T$, включається алгоритм зі зворотним зв'язком.

Регулювання, описане в такий спосіб, може бути реалізоване як керування з оберненим зв'язком упродовж усього перехідного процесу, якщо на початковому етапі релейне керування, типове для розв'язку задачі синтезу програмного керування зі швидкодією, виконується за алгоритмом, запропонованим Ю.Г. Антомоновим:

$$v(t) = \begin{cases} v_0, & \text{якщо } w(y, \dot{y}) > 0, \\ 0, & \text{якщо } w(y, \dot{y}) < 0, \end{cases} \quad (2.3.37)$$

де функція переключення має вигляд

$$w = (y - y_z) + k \dot{y}. \quad (2.3.38)$$

Для визначення невідомого коефіцієнта k у функції переключення, скористаємось наведеними вище результатами синтезу оптимального програмного керування. Підставимо в праву частину (2.3.38) замість y та $\dot{y}$ функцію $y(t)$, одержану при розв'язанні системи (2.3.17), і похідну від цього виразу $\dot{y}(t)$. Скориставшись умовою $w(\tau) = 0$ (τ — момент переключення керування) і зв'язком величини τ з y_z , яка надається другою формулою із системи (2.3.25), після низки алгебраїчних перетворень одержимо

$$k = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)(e^{\lambda_1 \tau} - e^{\lambda_2 \tau})}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{(1 - e^{-\lambda_1 \tau})^{\lambda_2 / \lambda_2 - \lambda_1}}{(1 - e^{-\lambda_2 \tau})^{\lambda_1 / \lambda_2 - \lambda_1}} + \\ + \frac{1 - e^{-\lambda_1 \tau}}{\lambda_1 (e^{\lambda_1 \tau} - e^{\lambda_2 \tau})} - \frac{1 - e^{-\lambda_2 \tau}}{\lambda_2 (e^{\lambda_1 \tau} - e^{\lambda_2 \tau})}. \quad (2.3.39)$$

Керування за алгоритмом (2.3.37) — (2.3.39) може бути використане на всьому заданому інтервалі зниження рівня глікемії до прийнятних значень і підтримки їх поблизу бажаного рівня.

Порівнявши цей алгоритм з алгоритмом, синтезованим за методом аналітичного конструювання (зі зворотним зв'язком), підкреслимо його перевагу, яка проявляється в простоті реалізації, що пов'язана з релейним режимом подачі керуючого сигналу.

Аналізуючи викладене, зазначимо, що структура організації керування зі зворотним зв'язком дає можливість сподіватися на задовільні результати з більшою мірою впевненості, ніж у разі програмного керування. Разом з тим зауважимо, що при наближенні рівня глікемії до заданого значення може виникнути режим керування з частими переключеннями, який неможливий, якщо використовується алгоритм аналітичного конструювання. Остаточний вибір одного з двох вказаних алгоритмів залежить від властивостей технічних пристроїв, що виконують інфузію інсуліну.

2.3.6. Адаптивне керування

Ефективність роботи керуючих пристроїв замкнутого типу значною мірою визначається регулярним надходженням вимірювань регульованого параметру. Зазначимо, що всі вимірювальні пристрої, якими б досконалими вони не були, дають інформацію з похибками, а можливо, і з запізненням, усунути які принципово неможливо. Тому виникає задача формування контуру зі зворотним зв'язком, за якого неможливо точно визначити стан об'єкта регулювання. Для досягнення цієї мети використовують алгоритми керування з прогнозуючою моделлю в контурі зворотного зв'язку. В нашому випадку такий алгоритм отримано на основі введення в рівняння прогнозуючої моделі алгоритмічного збурення, за рахунок якого узгоджуються вимірювані та теоретичні значення рівня глікемії. Алгоритми з оберненим зв'язком доцільно використовувати при виведенні хворого на діабет з гострого коматозного стану. Причому треба регулярно контролювати зміни рівня цукру в крові.

Алгоритми керування рівнем глікемії в існуючих автоматичних системах обираються емпірично, параметри регулювання в них не змінюються, що призводить до суттєвих коливань регульованої величини — рівня цукру в крові. Відсутність надійних сенсорів також обумовлює необхідність створення алгоритмів, спрямованих на використання дискретно і з запізненням інформації, що надходить. Накопичений арсенал різних алгоритмів керування з параметрами, що змінюються в процесі функціонування при надходженні інформації, що вимірюється, адаптивних алгоритмів, дає змогу сподіватися на усунення зазначених вад і досягнення кращої якості регульованого процесу. Адаптивність — фундаментальна властивість живої матерії, тому намагання та спроба використати цей принцип при формуванні зовнішнього

керування для підтримки глюкозного гомеостазу є цілком адекватними для вирішення проблеми, що розглядається.

У задачі створення системи адаптивного керування рівнем глікемії вважається, що інформація про рівень глюкози в крові надходить від вимірювального пристрою, по-перше, із запізненням, по-друге, в дискретній формі з фіксованим інтервалом дискретності та із постійною тривалістю запізнення. Крім того, вимірювання неминуче мають похибки, і все це відбивається на роботі системи автоматичного керування гомеостазом глікемії.

За базовий алгоритм, що змінюється в реальному масштабі часу, приймемо такий:

$$v = \begin{cases} v_{\max}, & \text{якщо } v \geq v_{\max}; \\ v, & \text{якщо } 0 < v < v_{\max}; \\ 0, & \text{якщо } v \leq 0. \end{cases} \quad (2.3.40)$$

$$v = \alpha(y - y_n) + \beta \dot{y} + \lambda(y_n - y_z).$$

Формули (2.3.40) виведено за допомогою теорії аналітичного конструювання. Згідно з викладеним, структура алгоритму (2.3.40), отримана при аналізі задачі в детермінованій постановці, зберігає свій вигляд і за адаптивного виконання керування, тільки при цьому коректуються або параметри алгоритму, або розв'язок прогнозуючої моделі, що використовується в додатковому контурі зворотного зв'язку, залежно від того, який обрано алгоритм адаптації. Проте яким би не був алгоритм адаптації закону (2.3.40) або іншого закону керування з тих, що відомі в літературі, він має враховувати вплив дискретності, неточності та запізнення, які притаманні вимірюванням. Тому отримання будь-яких відомостей про властивості цього впливу і оцінка способів їх урахування при формуванні штучного гомеостазу в системі керування рівнем глікемії являє інтерес, навіть незалежно від вибору алгоритму адаптації самого закону керування. Саме така задача розглядається нижче.

У даному разі прийнято схему зовнішнього керування рівнем глікемії з використанням прогнозуючої моделі (2.3.17) в контурі зворотного зв'язку в інтервалі дискретності. Вимірювання, що надходять із запізненням в дискретні моменти часу, використовуються для побудови модельних глікемічних кривих, які проходять через отримані експериментальні точки. Потім ці розв'язки продовжуються до поточного моменту часу, і за обчисленими теоретичними значеннями рівня глікемії та похідної від цього роз-

в'язку, що підставляються в закон керування (2.3.40), визначається величина керуючого впливу (швидкість введення інсуліну). Щодо реалізації керування (2.3.40) приймемо такі припущення: керування, що обчислюються за моделлю, параметри якої обчислені на момент часу t , подається на об'єкт упродовж часу, необхідного для отримання поточного вимірювання і проведення процедури ідентифікації, прогнозування та обчислення керування до наступного кроку (одержання вимірювання). Крім того, якщо є відомості про величину збурень, які діють на систему, тобто задана їх функціональна залежність, то вважається, що вона з достатньою точністю може бути апроксимована кусково-сталогою функцією, що зберігає постійні значення в інтервалі дискретності, тобто між послідовними моментами, в які проводяться вимірювання. Такі припущення допустимі для порівняно невеликих інтервалів дискретності, впродовж яких регульована величина не може істотно змінюватись, але це дає можливість відмовитись від процедури інтегрування рівнянь моделі і скористатися для обчислення прогнозу її точним розв'язком. Це значно спрощує розв'язок задачі поточної ідентифікації та прогнозування, які мають виконуватись у реальному масштабі часу.

Розглянемо можливості збільшення точності прогнозу без істотного ускладнення обчислювальних процедур. Якщо не враховувати похибок вимірювань, це випадок, коли збігаються істинні та вимірювані значення рівня глікемії, тоді ступінь неточності прогнозу значною мірою залежить від неадекватності прогнозуючої моделі. Остання визначається також неврахованістю цілої низки впливових чинників і неспроможністю одержання точної інформації про всі зовнішні та внутрішні збурення, що діють на систему. Для поліпшення прогнозних можливостей в правій частині диференціальних рівнянь моделі вноситься додаткова функція $W(t)$, величина якої невідома і має визначатися в процесі адаптивного керування за поступового надходження даних вимірювань.

Випробування запропонованого адаптивного алгоритму керування було проведене в імітаційному експерименті. При цьому в комп'ютерних дослідженнях вивчався вплив на якість керування частоти взяття проб крові на аналіз, тривалості інтервалу прогнозування, а також похибок при вимірюванні рівня глікемії. Перші ж дослідження, проведені з урахуванням похибок вимірювань, продемонстрували їх істотний вплив на якість керування. Так, у разі похибки вимірювань 0,55 ммоль/л і дискретності вимірювань $\Delta t = 1$ хв, закон керування нагадує швидше деякий ха-

отичний процес, ніж залежність від часу керуючого впливу в задачі керування зниженням рівня глікемії та його утриманням в межах гомеостазу. Це вказує на повну неспроможність прогнозування за пропонованою схемою, оскільки виникають дуже великі похибки прогнозування, а обчислені значення керування швидко і стрибкоподібно змінюються.

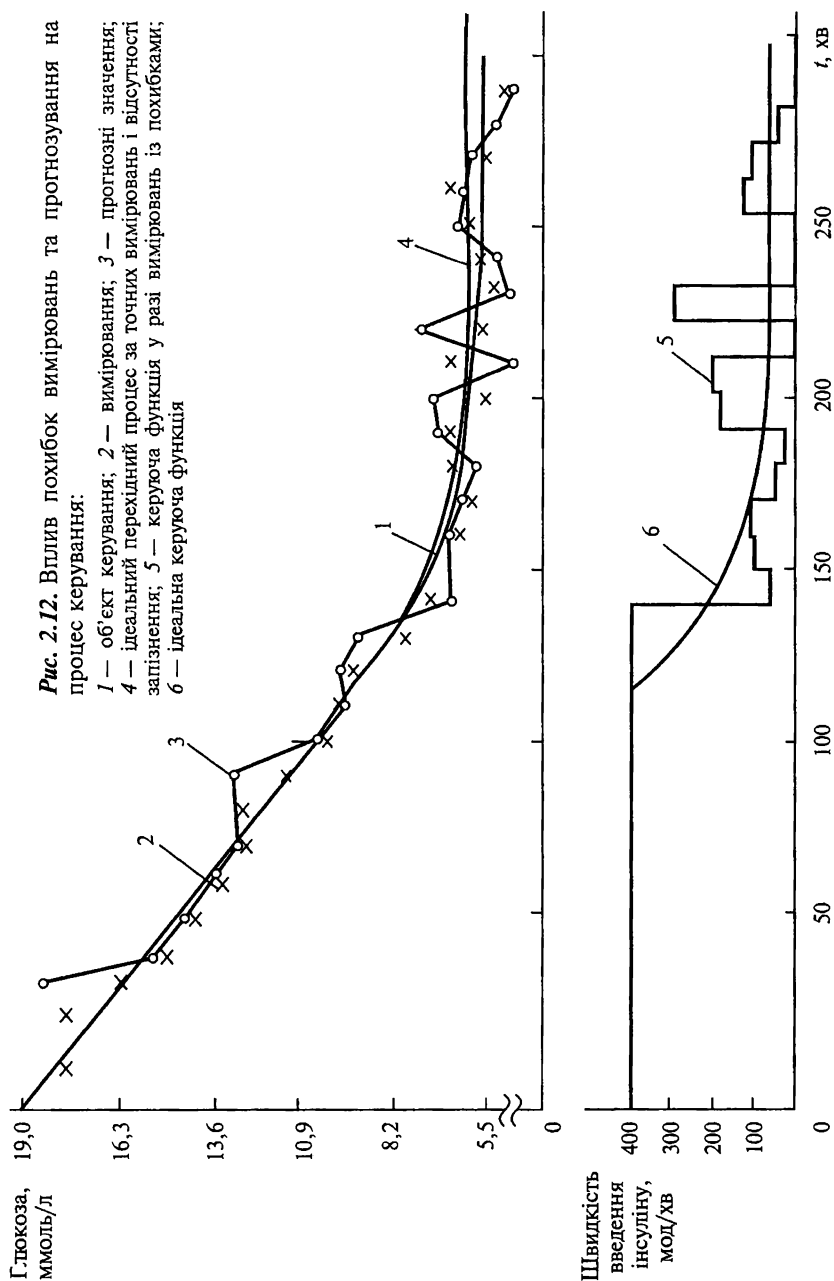
Сучасна теорія керування має достатній арсенал методів, які дають змогу упорядкувати керування за наявності похибок вимірювань у керованому об'єкті. Проте бажання не ускладнювати алгоритм прогнозування призвело до необхідності експериментальної перевірки деяких наочних варіацій схеми вимірювань з метою з'ясувати можливість реалізації системи керування в мікропроцесорах без використання методів згладжування результатів вимірювань.

Найпростішим прийомом зменшення впливу порівняно великих похибок вимірювань на процес керування є збільшення інтервалу часу між вимірюваннями. Насправді за дискретності $\Delta t = 10$ хв та інтервалі прогнозування $\Delta T = 10$ хв при тій же похибці вимірювань 0,55 ммоль/л якість прогнозу істотно поліпшується і якість керування підвищується до прийнятного рівня (рис. 2.12).

За результатами імітаційних досліджень при різних значеннях описаних вище параметрів можна зробити висновок, що спрощеним способом поліпшення якості керування з дискретно-замкненим зворотним зв'язком є виконання вимірювань з інтервалом не менш як 10–15 хв. Одночасно з підвищенням надійності прогнозування це дає змогу зменшити необхідну кількість проб крові, потрібну для реалізації зворотного зв'язку в процесі керування.

2.3.7. Підтримка глікемічного гомеостазу при рідких вимірюваннях

Описані вище алгоритми призначені для стаціонарних пристроїв, які працюють в автоматичному режимі, причому мова йде про пристрої, оснащені датчиками, що дають змогу проводити регулярні вимірювання. Проте ідея найпростішої адаптації прогнозуючої моделі може бути використана в комплексі з пристроями зовнішньої корекції глікемії, які працюють і без швидкодіючих датчиків. У цьому випадку контролювати рівень цукру в крові можна традиційними методами, при використанні яких проби крові беруться значно рідше. Адаптація прогнозуючої моделі здійснюється шляхом обчислення нового значення алгоритмічного збурення за результатом надход-



ження чергового вимірювання рівня глікемії, як описано вище. Використаний при цьому алгоритм трохи ускладнюється через те, що інтервали між вимірюваннями можуть бути неоднаковими. Крім того, описана вище дворівнева система моделювання з використанням одночасно різних за складністю моделей дає можливість оцінити ризик керованого процесу, пов'язаний не тільки з впливом похибок вимірювань, а й з неадекватністю прогнозуючої моделі.

На рис. 2.13 і 2.14 наведені результати імітаційного дослідження впливу похибок вимірювань і неадекватності прогнозуючої моделі на процес підтримки глікемічного гомеостазу за таких умов: усталене значення патологічно зміненої системи $y_n = 11,1$ ммоль/л, початкове значення $y_0 = 13,87$ ммоль/л, задане значення, до якого бажано привести рівень глікемії в процесі керування $y_z = 5,55$ ммоль/л.

Через 6 год після початку керування на систему регуляції діє навантаження — прийом їжі, що містить 50 г вуглеводів. Контрольні вимірювання проводяться через 30, 60, 90, 130, 180, 360, 540 і 690 хв після початку керування. Результати вимірювань надходять із запізненням 10 хв. Час, який витрачається на обчислення прогнозованого значення, настільки малий, що ним можна знехтувати. Зауважимо, що прийом їжі в умовах дослідження — «планове» навантаження, час початку якого і дозу глюкози можна врахувати, розв'язуючи рівняння прогнозуючої моделі.

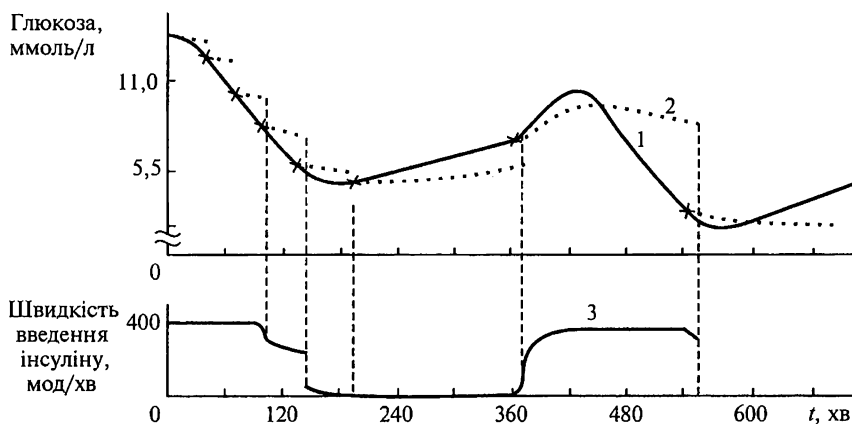


Рис. 2.13. Коливання рівня глікемії у разі рідких нерівномірних вимірювань: 1 — відгук моделі об'єкта; 2 — відгук прогнозуючої моделі; 3 — керуюча функція; ххх — вимірювання (імітується неадекватність моделі об'єкта та прогнозуючої моделі в контурі керування)

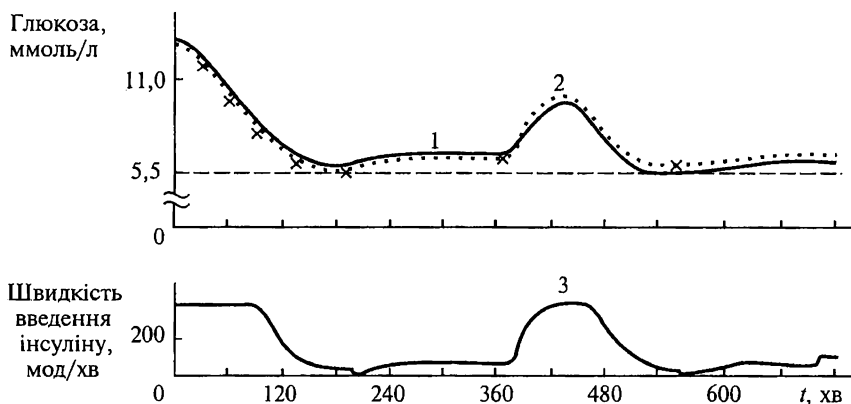


Рис. 2.14. Вплив похибок вимірювань на якість перехідного процесу за адекватної прогнозуючої моделі:

1 — відгук моделі об'єкта; 2 — відгук прогнозуючої моделі; 3 — керуюча функція; xxx — вимірювання

Рис. 2.13 ілюструє вплив на якість керування ступеня неадекватності прогнозуючої моделі об'єкта керування за можливості проведення точних вимірювань. Імітується ситуація, коли прогнозуюча модель наділена істотнішими інерційними властивостями, ніж керована система. Прийнятна якість керування на початковому етапі зниження рівня глікемії, попри очевидну неадекватність прогнозуючої моделі, пояснюється порівняно частими вимірюваннями, що дають змогу своєчасно коректувати процес підтримки гомеостазу. При цьому відмінність глікемічної кривої від тієї, що прогнозується, є істотною у разі рідких вимірювань. Це призводить до значного збільшення тривалості інфузії екзогенного інсуліну, швидкість якої обчислюється за завищеним прогнозом. В результаті такого помилкового керування спостерігається гіпоглікемічна фаза з мінімальною гіпоглікемією 2,5 ммоль/л.

На рис. 2.14 наведено результати досліджень за високого ступеня адекватності прогнозуючої моделі та наявності помилок вимірювань 0,55 ммоль/л. Розв'язки, представлені на рис. 2.14, демонструють достатньо високу точність прогнозу, а отже, й якісніше керування на всьому досліджуваному проміжку часу. Таким чином, адекватність моделі відіграє істотно важливу роль для забезпечення глікемічного гомеостазу задовільної якості при вимірюваннях, які проводяться доволі рідко, в той час як у разі частіших вимірювань ця обставина не є такою впливовою.

Розроблена система імітаційного дослідження дає змогу оцінювати ефективність алгоритмів керування, які сприяють поверненню рівня глікемії в межі гомеостазу за широкого діапазону змін різних умов взаємодії системи, що вивчається, із зовнішнім середовищем, оцінювати ризик, пов'язаний з неточністю та дискретністю вимірювань і також з неадекватністю прогнозуючих моделей. Таким чином, для оцінки ефективності вибору керуючих впливів при організації підтримки глікемічного гомеостазу на доклінічному етапі досліджень у різних життєвих ситуаціях доцільно використовувати дворівневу систему моделювання, яка становить принципову основу комп'ютерної підтримки прийняття рішень при лікуванні діабету. За правильного розуміння обмеженості можливостей моделювання, вираженої оцінки достовірності одержаних результатів і обов'язкової експериментальної перевірки зроблених на підставі аналізу модельних рішень висновків та практичних рекомендацій математичне моделювання може бути підґрунтям методології комп'ютерно-інформаційної підтримки прийняття рішень для вирішення різних завдань медичного та біологічного спрямування.

МОДЕЛЮВАННЯ ОСОБИСТОСТІ ТА СОЦІАЛЬНОЇ ПОВЕДІНКИ

У цьому розділі розглядаються достатньо складні питання, пов'язані з моделюванням особистості та її соціальної поведінки. Визначені призначення та етапи евристичного моделювання як основного методу моделювання та дослідження особистості як складної системи. Розглянуто гіпотетичну схему структури узагальненої особистості як триєдність біогенного, психогенного та соціогенного рівнів. Наведено ряд моделей (блок-схем) особистості та соціальної поведінки, а також математичне моделювання динаміки «ключових» якостей особистості.

2.4.1. Специфіка моделювання складних систем

До складних систем, імовірно, можна віднести системи, кількість різноманітностей в яких дуже велика, тому що число елементів у них відомо лише приблизно, а зв'язки між останніми тільки передбачаються. Це стосується насамперед систем «типу живих», за висловом академіка М.М. Амосова, що починаються з клітини і закінчуючи суспільством, для яких характерна одна загальна якість — у них відбуваються не тільки енергетичні та матеріальні перетворення, а й *процеси виділення, перероблення та використання інформації*.

Системний підхід як принцип, що керує загальною стратегією дослідження, може бути і загально-теоретичною концепцією дослідження складних систем. *Системний підхід* передбачає пошук ізоморфних елементів для різних систем, встановлення зв'язків і відношень між ними, синтез окремих структур та підструктур, що дасть можливість зрозуміти, як функціонують складні системи.

Науковий шлях пізнання не може задовольнятися тим, що наші знання про складні системи усе ще дуже обмежені. Це привело до появи нових методів дослідження складних систем, зокрема *методу моделювання*. Метод моделювання і поняття моделі в сучасній літературі остаточно і з достатнім ступенем спільності визначились у своїх фундаментальних рисах. Ці поняття містять чітку ідею системності й виступають як повноважні представники теоретичної системної концепції.

Модель — система, що відображає іншу систему — об'єкт. Це означає, що модель на певному етапі пізнання може заміщувати об'єкт, який досліджується, і водночас надавати інформацію про сам об'єкт моделювання, який безпосередньо не присутній у пізнавальному процесі. Найчастіше поняттям моделі оперують тоді, коли теорії реального об'єкта ще немає, і модель у таких випадках виступає як можливий зародок його нової теорії. Як це не парадоксально, але моделі складних об'єктів створюються тому, що ми не знаємо, але намагаємося краще пізнати структуру і функцію складних реальних об'єктів. Таким чином, модель — це реалізовані в матеріальній формі (наприклад, безпосередньо у вигляді фізичних моделей чи програм для електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) теоретичні уявлення про структуру і функцію складної системи.

Метод евристичного моделювання. Доти, доки ми не будемо мати у своєму розпорядженні достовірні та достатні відомості про ту чи іншу складну систему, ми можемо покладатися лише на відому так звану евристичну здатність людини до вирішення поставленого завдання в умовах неповної інформації.

Евристичними називають методи дослідження, засновані на використанні такого виду розумової діяльності людини, коли замість відсутніх вихідних даних про складну систему пропонується певні гіпотетичні дані. Як показав аналіз, евристичні методи мають, як правило, такі особливості:

1. Гіпотези про природу складних систем самі по собі складні, що виключає традиційний шлях «гіпотеза — передбачення — експериментальна перевірка» і потребує істотно нових прийомів їх верифікації. Ці прийоми пов'язані з побудовою діючих моделей-гіпотез на ЕОМ з подальшим експериментальним їх вивченням. Таким чином, евристичні методи дослідження складних систем за своєю суттю є модельними.

2. Будь-яке евристичне припущення може виявитися неправильним. Тому характерною рисою евристичних методів є багаторазове здійснення переходу від вивчення моделі складної сис-

теми до безпосереднього вивчення реального об'єкта-аналога. Порівняння результатів цих досліджень дає можливість коректувати вихідні припущення моделі-гіпотези.

На відміну від евристичного програмування, за якого формулюється гіпотеза лише про функцію об'єкта, що досліджується, М.М. Амосовим та співробітниками був запропонований метод побудови на ЕОМ діючих моделей-гіпотез про структуру та функцію системи, що досліджується, з наступним порівнянням «поведінки» моделі та реального об'єкта-аналога. Такий метод був названий *методом евристичного моделювання*.

Суть *методу евристичного моделювання* полягає в створенні математичної моделі об'єкта на основі гіпотези про його структуру та функції. При цьому використовуються наявні в літературі якісні та кількісні дані, а відсутні дані отримують шляхом припущень на базі якісної гіпотези.

Евристичне моделювання має таке *призначення*:

- 1) формулювання несуперечливої якісної гіпотези про реальний об'єкт-аналог;
- 2) вироблення мови, придатної для якісної моделі-аналога;
- 3) визначення напряму експериментальних досліджень з метою верифікації основних параметрів моделі та уточнення найсуперечливіших питань;
- 4) проведення дослідження моделі об'єкта замість дослідження самого реального об'єкта, що дає змогу передбачити нові властивості останнього;
- 5) використання моделі для керування реальним об'єктом ще до того, як буде створено його теорію.

У цьому полягає призначення проміжного етапу евристичного моделювання на шляху до створення реальних моделей та теорій складних систем.

Створення евристичної моделі реального об'єкта-аналога здійснюється за типовим планом, що включає окремі *етапи* евристичного моделювання.

1. *Формулювання мети чи призначення моделі*. Наприклад, використання евристичної моделі як етапу у вивченні об'єкта, проектування експериментів або як інструмента управління. Цей етап визначає всі подальші.

2. *Вибір рівня моделі*. Оскільки всі складні системи побудовані за ієрархічним принципом, ступінь узагальненості моделі визначається тим нижнім структурним рівнем, починаючи з якого модель має відтворювати об'єкт. Так, для завдань керування достатніми є високі рівні ієрархії моделі, а для створення нової системи та її вивчення бажано, по можливості, враховувати її нижчі рівні.

3. *Формулювання якісної гіпотези про структуру та функції об'єкта* в рамках, обмежених цілями, призначенням моделі. Необхідно визначити число «рівнів» моделі, її складових елементів, функції її підсистем, виходячи з можливостей технічної реалізації. Уже на цьому етапі треба припустити специфіку і характер сил, що діють у кожній структурній одиниці, на кожному «рівні».

4. *Вибір вагомих змінних і побудова структурної схеми об'єкта.*

5. *Побудова блок-схеми об'єкта.* Елементи, підсистеми і зв'язки між ними визначаються гіпотезою та обраним рівнем структур.

6. *Проектування статичних і динамічних характеристик усіх найважливіших залежностей*, що зв'язують елементи структури моделі між собою, а також вхідні та вихідні параметри, які впливають на «внутрішні» елементи. Для цього використовуються літературні дані, припущення авторів з відомим ступенем суб'єктивності.

7. *Синтез моделі та її налагодження:* вибір математичного апарату, розробка алгоритму і програм для комп'ютера.

8. *Дослідження моделі та розрахунок її «поведінки».* Задаються початкові дані, підбираються коефіцієнти характеристик так, щоб одержати стійкий початковий режим. Потім досліджуються зміни моделі в часі як послідовність її статичних станів. «Поведінка» моделі порівнюється з результатами дослідження реального об'єкта-аналога (там, де це можливо), після чого вносяться корективи у вихідну гіпотезу чи характеристики. Вже саме дослідження моделі дає можливість одержати нову інформацію про об'єкт, припустити невідомі його якості.

9. *Верифікація моделі:* порівняння характеристик моделі та реального об'єкта за однакових умов з метою визначення вірогідності моделі й, особливо, меж її застосування.

Такий загальний порядок побудови евристичних моделей складних систем виправдав себе при моделюванні об'єктів різної природи та великої складності.

Основні ідеї цього методу послужили відправним пунктом для циклу досліджень з моделювання особистості людини, її соціальної поведінки, які мають особливу специфіку, що й буде предметом обговорення у даному розділі.

Проблеми моделювання особистості. У сучасних умовах як ніколи раніше зростає роль людини в системах управління, виробництва та масового обслуговування, виховання й освіти. Проблема людини, «людського фактора» залишається центральною і найвужчою в системі наукового пізнання, в якій тісно зв'язані технічні й еко-

номічні науки, природознавство і суспільствознавство, психологія і медицина. Відомий письменник Ілля Еренбург якось сказав: «Ми точно знаємо, по яких орбітах летять наші супутники та космічні кораблі, але до цих пір не знаємо — по яких орбітах кружляють наші серця». І це насправді так. Як не дивно, але про себе сучасна людина знає набагато менше, ніж про різноманітну техніку, яку вона створює своїми руками.

Наукове вивчення суспільства, суспільних відносин, природи людини і механізмів її поведінки привело до накопичення великого обсягу фактичного матеріалу, який є занадто розрізненим, а часом і недостовірним. Тому, як визнають самі психологи, найрозробленішим і найпоширенішим у психології є не цілісний, а аналітичний підхід, тобто вивчення окремих психічних процесів і видів діяльності. Саме цю обставину назвав «каменем спотикання» у дослідженнях суспільства взагалі та особистості зокрема відомий психолог А.М. Леонтьєв.

Насправді найдоцільнішою і більш плідною є спроба цілісного підходу до вивчення проблеми поведінки людини в системі «суспільство—особистість» порівняно з виділенням та ізолюванням дослідження окремих складових. Кібернетика та інформатика як системні науки за своєю суттю, на думку академіка В.М. Глушкова, дають змогу здійснити синтез різноманітних відомостей про системи великої складності, охопити велику кількість змінних за рахунок залучення засобів обчислювальної техніки і побудувати інформаційні моделі гіпотез цих систем. Проте ні швидкодія ЕОМ, ні збільшення обсягу розрахунків ще не є гарантом розуміння об'єктів соціально-психологічної природи, які досліджуються, та явищ, що в них відбуваються. Для цього потрібно більше суто психологічних знань, їх належної систематизації, більше перевіреної та надійної кількісної інформації.

На сьогоднішній день ні в психології, ні в соціології не створено єдиної, закінченої теорії особистості, прийнятої для всіх, хто працює в цій галузі. Спроби деяких дослідників (Халла, Ліндсея та ін.) створити «квазітеорію» особистості на підставі аналізу вже існуючих розробок не досягли успіху. Існує багато концепцій, теорій, підходів, що насамперед демонструють, в якому ракурсі можна розглядати людину, її природу, можливі механізми її соціальної діяльності. Велика кількість теорій з цієї проблеми свідчить про надзвичайну складність такого об'єкта досліджень. Жодна з розробок не дала достатньо обґрунтованого комплексу положень про структуру і психологічну природу особистості. Саме через труднощі теми, складність об'єкта, нерозробленість методів дослідження пси-

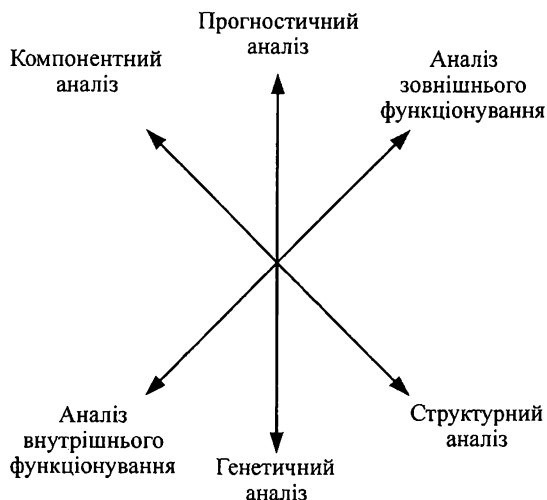


Рис. 2.15. Схема векторів системного підходу до дослідження будь-якої складної системи, у тому числі особистості (за Каганом, 1974)

хологи неохоче займаються проблемою психології цілісної особистості, віддаючи перевагу дослідженню окремих її властивостей і сторін, наприклад темпераменту, здібностей та ін. Зазначимо, що кількість концептуальних описів особистості набагато перевершує спроби її експериментального вивчення. Тому до вивчення людини, її психіки та особистості, крім психологів, філософів, соціологів, у останні десятиліття приєдналися представники інших наук, зокрема, кібернетики та інформатики, зі своїми прийомами дослідження складних систем.

Особистість людини як складна система. Положення про те, що особистість дорослої людини є складною динамічною системою, апіорно приймається усіма. Отже, як вимагають фахівці в галузі системного підходу, така складна система потребує двоякого її розгляду: по-перше, в статичі, тому що тільки при цьому пізнання здатне охопити, змодельовати склад і структуру даної системи; по-друге, в динаміці її дійсного існування.

Системне дослідження статичи системи припускає вирішення двох взаємозалежних завдань: встановлення тих елементів (компонентів), з яких складається система, що досліджується, і визначення того, як ці елементи між собою зв'язані. При цьому, виходячи з ідеї цілісності системи, мають бути виділені ті елементи, які необхідні й достатні для її існування. Це відкриває шлях до вивчення її «внутрішньої структури», яка вибірково сприймає і переробляє зовнішні стосовно себе впливи «середовища» і сама при цьому активно впливає на нього. Динаміка системи, в свою чергу, також вияв-

ляється подвійною: по-перше, вона є рух системи, її функціонування, а по-друге, — її розвиток, тобто виникнення, становлення і т. д. Відповідно до цих вимог, уявлення про складну динамічну систему потребує сполучення трьох площин її дослідження — предметної, функціональної та історичної, які й мають бути визнані необхідними і достатніми методологічними компонентами системного підходу як цілісного.

Вивчення внутрішнього і зовнішнього функціонування системи не дасть інформацію про її походження, розвиток і перспективи подальшого існування. Отже, треба дослідити походження даної системи, можливий процес її становлення і формування (генетичний аспект), а також очікувану в майбутньому її поведінку (прогностичний аспект).

На рис. 2.15 зображена схема методології системного підходу до дослідження будь-якої складної системи, яку запропонував М.С. Каган. Особистість людини потрапляє точно в зазначені площини дослідження, кожна з яких має свої вектори:

- вектор структурно-компонентного аналізу;
- вектор аналізу внутрішньо-зовнішнього функціонування;
- вектор генетично-прогностичного аналізу.

Виходячи з цих уявлень, на гіпотетичному рівні були сформуовані вимоги до моделювання та дослідження особистості як складної системи.

2.4.2. Гіпотеза про внутрішню структуру моделі «узагальненої» особистості

Розуміння того, що особистість за всієї індивідуальної різноманітності її компонентів не є їх випадковим поєднанням, дало підставу говорити про *структуру особистості*. В саме поняття структури вкладена ідея схематичності, встановлення визначених відносин між елементами, що складають єдину систему, тобто ідея модельного представлення. Мабуть, тому до поняття структури й звертаються психологи, соціологи, кібернетики, дослідники теорії систем. Звідси й спроби описати, узагальнити та експериментально дослідити структуру особистості як певної, але визначеної сукупності її елементів і зв'язків між ними, що утворюють її єдність і цілісність. Іншими словами, мова йде про встановлення якихось основних елементів, що становлять незмінну «природу людини», постійним чином визначають поведінку людей. Пізнання структури особистості могло б стати основою передбачення людської поведінки в різних ситуаціях.

Структура особистості як психологічна категорія має відповідати таким вимогам:

1. Відображати взаємовідношення понять загальнолюдських властивостей і властивостей особистості, що не є тотожними.
2. Розкривати походження і розвиток цих властивостей.
3. Вказувати, сукупність яких основних елементів (різних за походженням) становить її головну сутність.
4. Сприяти розумінню взаємин сукупності елементів структури особистості та зовнішнього середовища.

Для одержання реальних передумов побудови «внутрішньої» структури моделі особистості слід зробити певні узагальнення. Ми припустили наявність «психологічного кістяка» особистості як деякого узагальнення головних, «опорних» елементів, психологічних якостей, обов'язково властивих усім людям. «...І Лев Толстой, і канібал — однаково люди», — вважав французький письменник Веркор. Різниця у генетичній та індивідуально-типологічній силі цих «опорних» елементів і безмежній комбінації.

Як відомо, процес становлення особистості людини в історичному плані неодмінно містить такі «програми»:

- історію еволюції живих істот (програма «для себе»);
- історію людства (програма «для роду»);
- історію конкретної особистості (програма «для виду»).

Тому ми вважаємо, що найдоцільнішим є розгляд структури особистості з точки зору її генезису, тобто в міру появи, становлення, розвитку і функціонування основних якостей, які визначають особистість людини та її поведінку. У такому ієрархічному порядку ці основні «програми» розвиваються в будь-якої людини, що підтверджується даними еволюційної та молекулярної біології, генетики, дитячої та соціальної психології й інших наук.

Саме визначене сполучення програм «для себе», «для роду», «для виду» в усіх психічно здорових людей без винятку, незважаючи на всю неповторність окремих конкретних особистостей, дає можливість звести в деяку «узагальнену» структуру елементи, спільні для всіх людей. Такий підхід дав змогу визначити в структурі особистості відомі «рівні» цих програм, що у кінцевому підсумку допомогло встановити внесок кожної з них у цілісне функціонування особистості. Подібний розподіл на «рівні», «етапи», «шари» і т. д. — чисто умовний і штучний прийом. Однак ми вважаємо, що поділ цілого на частини науково виправданий там, де об'єктом вивчення, а тим більше моделювання, є над-

складна система. У цьому разі таким об'єктом, поза сумнівом, виступає особистість людини. Навряд чи можна розкрити структуру і динаміку особистості як цілого, не скориставшись таким дедуктивним прийомом із пізнавальною метою.

Кожен «рівень», розвиваючись у людини в процесі індивідуального життя, суспільного виховання та самосвідомості, привносить свої властивості, особливості, видозмінює та урізноманітнює соціальну поведінку, сприяє становленню особистості. Для пізнавальних цілей, а також для створення модельних передумов представлення структури особистості треба було надати останній наочність у вигляді схеми (рис. 2.16). Для цього особистість була представлена трьома основними «рівнями»:

1. *Біогенний рівень* (програма «для себе»).
2. *Психогенний рівень* (програма «для роду»).
3. *Соціогенний рівень* (програма «для виду»).

Наведена гіпотетична схема структури «узагальненої» особистості відображає «програми-рівні» у тому ієрархічному порядку, в якому вони розвиваються в людини. У ході цього розвитку формується структурно-ідентичний у всіх людей «психологічний кістяк» як деяке узагальнення основних елементів, що визначають особистість і обов'язково властиві усім людям без винятку. Перейдемо до рис. 2.16.

Початок усьому розвитку — *зигота*. Запліднена яйцеклітина — осередок потенційної можливості розвитку людини — цілком визначає спадково-вроджені особливості. Згодом із зиготи і розвивається дуже складний людський організм.

«*Біогенний рівень*» (на рис. 2.16 позначається як *I*) є ієрархічно найнижчим, цілком спадково-вродженим за своїм походженням і найпостійнішим за своєю споконвічною організацією. Біогенний рівень завдяки своєму еволюційно-генетичному походженню утворений такими загальнолюдськими «елементами», які індивідуально варіюють тільки за силою та виразністю:

1. *Фізичний вигляд*, антропометричні особливості (расові ознаки, ріст, статура та ін.). Дотепер вони не включалися в структуру особистості. На нашу думку, ці елементи відчутно впливають на майбутнє формування особистості, майбутню самооцінку, відносини інших людей.

2. *Здібності*, задатки, обдарованість, таланти, генії. На цьому рівні вони існують як можливості психіки до засвоєння, її пластичність для навчання, як потенціал для майбутнього творення, творчості.

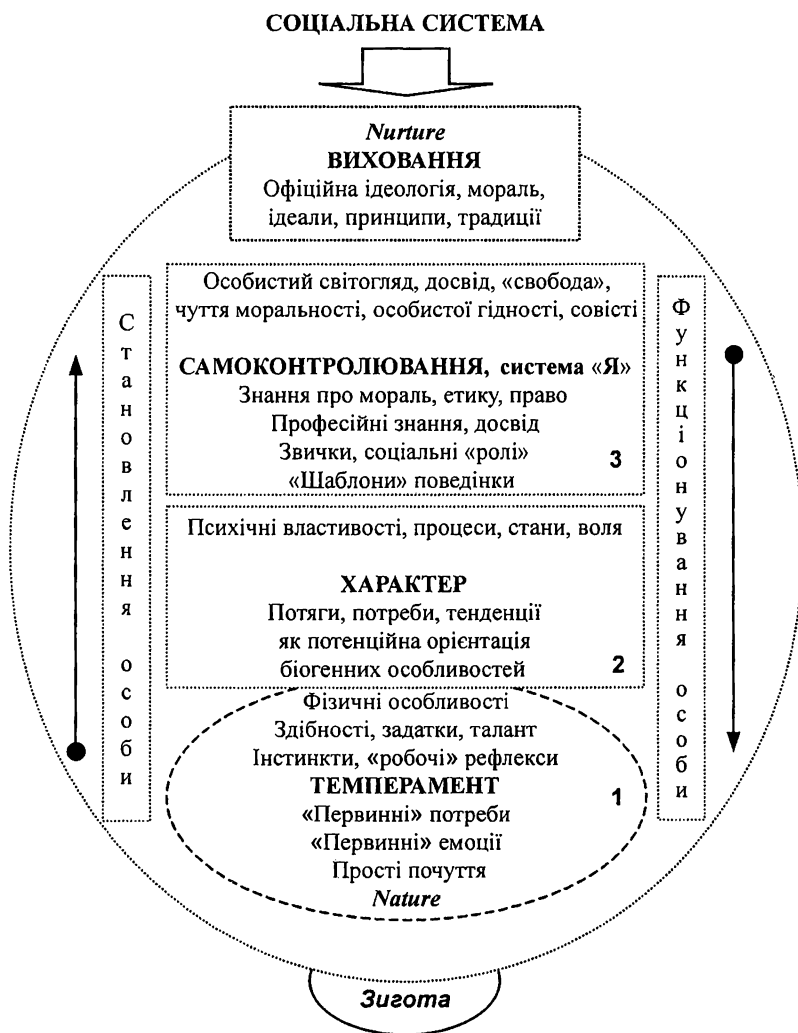


Рис. 2.16. Структура моделі «узагальненої особистості» (за Беловим, 1971)

3. Успадковані від предків і генетично закріплені потяги, вроджені тенденції певним чином почувати і діяти — так звані прагнення. Основними з них є:

- *прагнення до збереження життя* (харчовий і захисний інстинкти) з емоціями і почуттями (голоду, спраги, болю, втоми, задоволен-

ня від відпочинку, ліні, страху, гніву, агресивності, жадібності тощо), які їх супроводжують;

- *прагнення до продовження роду* (статевий і батьківський інстинкти) з почуттями ніжності, любові до дітей, ласки, ревності та ін.;

- *прагнення до спілкування* із собі подібними (стадний інстинкт, інстинкт зграї) з почуттями товарищескості, лідерства, вожака, підпорядкованості, співпереживання, егоїзму та ін.;

- *прагнення до наслідування і самовираження*;

- *прагнення до активності*, реалізації закладених в організмі потенційних можливостей у кінетичну енергію діяльності;

- так звані «робочі» рефлекс (за І.П. Павловим): *рефлекс дослідження* (з почуттями допитливості, захопленості, інтересу, аж до творчості); *рефлекс свободи* (з почуттями протесту проти обмежень); *рефлекс мети* (з почуттями досягнення мети, задоволення від психічної та фізичної діяльності з кінцевою метою).

Саме ці інстинкти і «робочі» рефлекс (по суті, ті самі інстинкти), що, безумовно, дісталися людині від тварин, є основою стабілізації і виживання біологічних видів. Такого роду найзагальніші вроджені нахили, тенденції, прагнення, особливості емоційних проявів, передані нащадкам у спадщину, розглядають як потенційне орієнтування біогенних особливостей людини, її *генотип*, як спадкову конституцію індивідуума. Існує думка, що сукупність цих вроджених тенденцій індивіда до всякого індивідуального досвіду утворює його «*темперамент*».

«Елементи» біогенного рівня мало мінливі, але, очевидно, не в однаковому ступені як під впливом зусиль самого індивіда, так і під впливом зовнішнього середовища. Вроджені особливості задають, так би мовити, нижню і верхню межу цих змін, а впливи соціального середовища хоч і суттєві, але не безмежні. Вроджені елементи душі не можуть бути знищені чи придбані індивідом під час його існування.

Перелічені прагнення, потяги індивіда самі по собі є тілесні, але ще бездуховні у вищому сенсі цього слова, тому що мають розпливчастий, неясний характер і навряд чи мають предметну модальність. Сучасна психологія вважає, що тільки в людській психіці вони набувають форми більш визначених почуттів, а останні вже конкретизуються в словесну форму відомих бажань. Для цього вони у своєму розвитку мають піднятися на наступний, вищий психогенний рівень.

«*Психогенний рівень*» (на рис. 2.16 позначений як 2) також є частково спадково обумовлений і тісно пов'язаний з «біогенним», що дає підставу говорити про «біопсихогенні» елементи особистості.

До «психогенного» рівня відносять: пам'ять, складні почуття та емоції, психічні процеси і стани, волю, характер. Завдяки «біогенному» і частково «психогенному» рівням будь-яка людина ще до всякого соціального досвіду має вроджені тенденції відчувати (емоції й прості почуття) та діяти (інстинкти, «робочі» рефлексії, потреби) під впливом численних факторів середовища, що діють на неї з моменту народження. Біопсихогенні «елементи» формуються в кожній людині впродовж чотирьох етапів:

- 1) внутрішньоутробний розвиток;
- 2) перші два роки життя — неусвідомлене фіксування середовища, так зване влучування (імпринтинг);
- 3) сприйняття навчання за участю свідомості — вже з елементами особистого добору інформації (із третього року життя);
- 4) самовиховання, самосвідомість особистості — трансформація почуттів на основі індивідуального досвіду.

Питома вага кожного етапу достовірно невідома. Можна стверджувати, що наскільки біогенний і психогенний «рівні» у всіх людей структурно подібні (як варіант «психологічного кістяка»), настільки ж вони індивідуально різняться за силою, рухливістю, виразністю, змінністю та іншими функціональними параметрами складових їх елементів. Завдяки можливості утворення численних комбінацій повторюваність одних і тих самих маломовірна.

Накопичений у літературі емпіричний досвід засвідчує, що психогенний рівень (на відміну від біогенного) може певною мірою трансформуватися зусиллями самої особистості під впливом виховних елементів зовнішнього середовища. Можна, хоч і не безмежно, розвивати й удосконалювати як окремі елементи психогенного рівня — пам'ять, волю, мислення, почуття, інші природні задатки, так і окремі сторони найбільш виражених і відносно стійких властивостей особистості, що у сукупності утворюють її *характер*. На схемі він розміщений на межі біогенного рівня («темпераменту») і соціогенного рівня («виховання»).

Елементи біогенного і, частково, психогенного рівня — лише потенційна можливість для перетворення людини як біологічної істоти на соціальну особистість, однак ще не гарантують цього. Подальше залежить від того, як ці потенційні можливості, що існують до певного часу лише віртуально, будуть реалізовані, доповнені, трансформовані та перетворені елементами «соціогенного рівня» під впливом соціальної системи, суспільних відносин, тобто «виховання» у широкому сенсі цього слова. В цілому, як уже зазначалося, наскільки «біогенний» і «психогенний» рівні

у всіх людей організовані структурно подібно, настільки ж вони індивідуально різняться за силою і виразністю, рухливістю та стійкістю, іншими функціональними параметрами складових їх елементів у ході формування елементів соціогенного рівня.

«Соціогенний рівень» (на рис. 2.16 позначений як 3) у дорослої, соціально зрілої особистості представлений такими елементами, як честь, совість, відповідальність, достоїнство та інші, які прийнято відносити до «вищих» моральних (моральнісних — від рос. «нравственность», «нравственный». — *Авт.*) почуттів, якостей особистості. Вони формуються на базі біологічних емоцій і «нижчих» почуттів. Зв'язок між біогенним, психогенним і соціогенним «рівнями» здійснюється за допомогою особливої системи «Я» (індивідуальна свідомість, вольовий самоконтроль, особистий досвід людини).

Формування набору біологічних і соціальних почуттів шляхом посиленого розвитку одних і пригнічення інших до відомого співвідношення під спрямовуючим впливом соціальної системи, суспільних відносин, культурної спадщини є процес виховання. Те, якою людиною виглядає чи сприймається оточенням на підставі здійснених нею вчинків, дій прийнято називати її репутацією, тобто *фенотипом*. Це підсумковий результат реалізації потенційних можливостей генотипу під впливом суспільного та індивідуального досвіду, виховання і самовиховання.

Від того, як у особистості збігаються та не конфліктують елементи різних рівнів, наскільки людина не входить у суперечність зі своєю совістю, залежить рівень її психологічного комфорту, загальне почуття особистого щастя. Кожна людина прагне бути щасливою, але ми до сьогодні не знаємо, що це за стан. Відомо тільки, що всю різноманітність і силу впливів зовнішнього оточення будь-яка людина оцінює за власними почуттями. Останні визначаються ситуаційними моментами, звичками, способом життя, світоглядом, силою свідомого-вольового контролю, рисами характеру, вмінням адаптуватися до мінливих обставин життя та праці. У конкретної особистості одні й ті самі почуття, виражені різною мірою, можуть бути приємними і неприємними, тобто мають різну модальність щодо нейрофізіологічних центрів «приємно» і «неприємно». Уявлення про «щастя» людини, як нам здається, можна одержати через *рівень психологічного комфорту (РПК)* — загальне співвідношення універсальних оцінних почуттів «приємно» і «неприємно».

2.4.3. Еволюція моделей особистості та соціальної поведінки

Закордонні моделі особистості та соціальної поведінки. Дослідникам треба було довести принципову можливість побудови моделей об'єктів соціально-психологічної природи, зокрема моделі особистості та соціальної поведінки. Ці роботи почалися незалежно вченими Сходу і Заходу в середині 60-х років минулого століття і базувалися на уявленнях про можливу структуру особистості, механізми діяльності людини, особливості соціальної поведінки.

Побудова моделей соціальних систем великої складності потребує достовірних кількісних характеристик їх елементів і підсистем. Переважна більшість психологічних теорій усе ще має описовий або гіпотетично-дедуктивний характер. Якісної описової гіпотези також уже недостатньо, оскільки словами не можна охопити велику різноманітність взаємозалежних показників. Роль математизації психологічного знання полягає в розвитку логічної структури психологічних теорій від описових до гіпотетично-дедуктивних і далі до змістовно-аксіоматизованих. Розглянемо основні моделі особистості та соціальної поведінки в закордонній і вітчизняній науковій літературі.

Модель «Олдос», розроблену Лоеліном у 1962 р. (Loelin, 1962), прийнято вважати першою діючою на ЕОМ моделлю особистості. «Олдос», як вказує її автор, дає просте і дуже схематичне відображення деяких процесів, що, очевидно, визначають риси особистості людини.

Основні підпрограми моделі «Олдос» відтворюють процес розпізнавання, ряд емоційних реакцій, вибір дій, «самоспостереження» (інтроспекції) та навчання. «Олдос» має два види пам'яті: тимчасову (оперативну), невелику за обсягом, і постійну, значно більшу, пам'ять.

Блок-схему моделі «Олдос» наведено на рис. 2.17. За допомогою п'яти головних підпрограм «Олдос» здатний розпізнати «вхідну» ситуацію, проявити при цьому ряд емоційних реакцій (страх, гнів чи потяг) і реагувати на неї «вихідними діями» (прагненням ухилитися від контакту, нападу, зближенням, ворожістю чи байдужністю). Зовнішня підпрограма — «наслідок» — забезпечує зворотний зв'язок з оточенням. У результаті цього «Олдос» іноді навчався і модифікував своє відношення до зовнішнього світу, тобто на відповідні «вхідні впливи».

Підпрограма самоаналізу реалізована в блоці постійної пам'яті. Після кількохразового пред'явлення «вхідних» ситуацій через певний проміжок часу «Олдос» виробляє як загальне, так і специ-

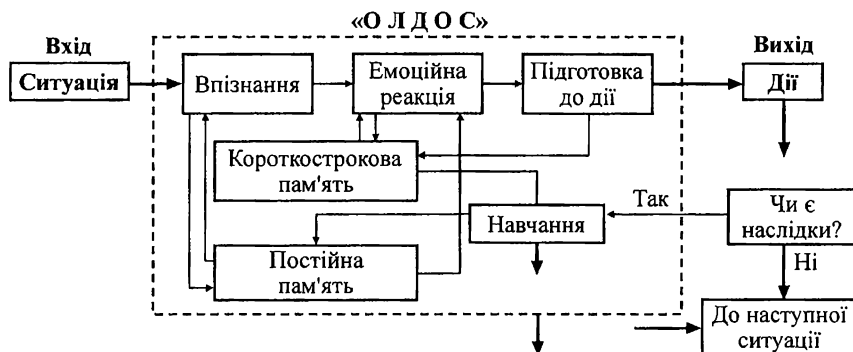


Рис. 2.17. Схема функціонування моделі «Олдос» (за Loelin, 1962): товсті стрілки — алгоритми; тонкі — взаємні зв'язки між системами пам'яті. Решта пояснень у тексті

фічне відношення до предметів, з якими стикається. «Риси характеру» «Олдоса», тобто властиві йому схеми реакцій, могли бути змінені шляхом зміни значень параметрів його підпрограм («нормальний», «рішучий», «нерішучий» і т. д.). Функції «Олдоса» полягають у відпрацюванні визначеного відношення до об'єктів його оточення. Набір цих концепцій дуже обмежений. Об'єкти оточення представлені у вигляді сполучення невеликої кількості властивостей (кон'юнкцій ознак), що виражені довільними числовими кодами. Абстрактна форма кодування, як вказує автор моделі, обрана навмисне: вона дає змогу враховувати ситуацію чи сукупність ознак, у межах яких ми б хотіли, щоб «Олдос» зробив класифікацію об'єктів («вхідних ситуацій»). В одному випадку цими об'єктами можуть бути такі ознаки людини, як стать і вік, в іншому — оцінки характеру і власних дій. В останньому випадку їх можна розглядати як найпростіші види самооцінки, оскільки «Олдос» виробляє відношення до власної поведінки, виходячи зі свого «досвіду». Дії «Олдоса» визначаються його емоціями з урахуванням порогового параметра; він не планує завчасно свої дії і не оцінює їх можливі наслідки. У спеціальній серії експериментів два і навіть три типи моделей («з різними характерами») одночасно вводилися в ЕОМ для імітації соціальної взаємодії кількох особистостей. При цьому дії однієї моделі були стимулом для вироблення емоційних реакцій іншої та навпаки.

Тут немає необхідності вдаватися в деталі проведених експериментів. Підкреслимо лише важливі в принциповому плані ви-

слова самого Лоеліна, оскільки він звернув увагу на обставини, які довгий час (у 50—60-х роках минулого століття) були предметом тривалих дискусій. Він писав: «...варто підкреслити, що Олдос — лише модель людської особистості, а не сама особистість. Таким чином, коли я кажу про «страх» Олдоса, я маю на увазі складову в програмі, що набуває різних числових значень, тобто різних ступенів страху» (1971).

Перша машинна модель, яка наділена деякими рисами особистості, безсумнівно, мала багато і дуже значних недоліків. Зокрема, у ній дуже бідно представлені особистісні якості, властиві людині, та вкрай спрощені механізми, що забезпечують її соціальну поведінку. Разом з тим модель Лоеліна заслуговує на увагу вже тим, що вперше, нехай навіть у примітивному вигляді, вона продемонструвала принципову можливість моделювання на ЕОМ такої складної динамічної системи, якою є особистість людини.

Модель «Невротик». В її основу одним із авторів Колбі (1962), було закладене уявлення про невротичну особистість, що розвивається в теорії психоаналізу. Якщо при створенні моделі «Олдос» основною метою було відтворення реакцій загального типу, Колбі в моделі «Невротик» намагався імітувати в деталях інтелектуальні та емоційні процеси індивідуума, створивши більшу і складнішу програму, що призначалася для аналізу невротичної особистості з

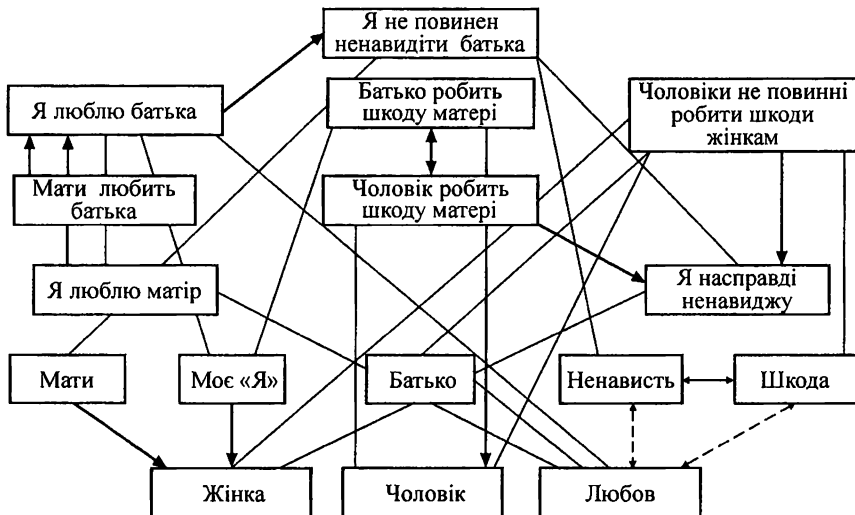


Рис. 2.18. Модель невротичної особи — «Невротик» (за Colby, 1962): тонкі стрілки — зв'язки на рівні уявлень; товсті — зв'язки між переконаннями



Рис. 2.19. Фрагмент поточної діаграми, яка інтерпретує процеси під час здійснення елементарної соціальної поведінки моделі «Гомункулюс» (за Gullahorn, Gallahorn, 1962)

позицій психоаналізу. На фрагменті блок-схеми моделі «Невротик» (рис. 2.18) видно, що вона поділена на два рівні: нижній, відведений іменникам та займенникам («Я», «батько»), деяким дієсловам («любити», «шкодити» тощо), та верхній — для уявлень і переконань.

Програма передбачала можливість обмеженого зовнішнього втручання з боку «психотерапевта», що міг спрямувати увагу моделі на певні теми. Подібний механізм дав змогу вводити стійкі «лікувальні» корективи в систему відносин моделі.

В принципі, модель Колбі подібна до моделі Лоєліна, що, правда, є трохи складнішою і, як він сам вказує, «літературнішою», а тому має ті самі недоліки. Однак це був перший крок машинної реалізації деяких сторін патопсихології, який став корисним згодом, при спробі автоматизації обстежень певного контингенту пацієнтів.

Модель «Гомункулюс» подружжя Галлахорнів (1962, 1967) була першою в історії кібернетики моделлю соціальної групової поведінки. Вона імітувала елементарну соціальну поведінку, що розглядалась як функція винагороди залежно від характеру взаємодії двох умовних персонажів — Теда і Джорджа.

У програмі «Гомункулус» людина представлена у вигляді структури з дуже великою кількістю описових списків. Серед даних, включених у спискову модель людини, є, наприклад, такі, як ідентифікація особистості, його можливості, його відносна та абсолютна позиції в різних соціальних групах, списки образів зв'язаних з ним груп і списки образів кожного члена групи. Авторами моделі заздалегідь передбачалося, що модель повинна вміти сприймати ситуації, розпізнавати їх та зберігати в пам'яті, порівнювати і розрізняти подразники, розрізняти нагороди і покарання, пророкувати імовірність нагороди за передбачуваний вчинок, діяти — «робити вчинок» та ін.

Модель функціонує за типом поточних діаграм шляхом перегляду списків (один з них відтворюється на рис. 2.19). Перегляд починався з персонажа на ім'я Тед, що посилає своєму колезі Джорджу прохання про допомогу у виконанні деякої роботи. Стратегія відповідних «дій» Джорджа формується так:

1. Джордж аналізує, чи зв'язане в минулому подібне прохання-подразник з винагородою та чи одержував він винагороду у відповідь на задоволення подібного прохання. При цьому чим ближче дане прохання до винагороди, тим більша імовірність, що відповідна реакція Джорджа в цій ситуації буде такою ж чи близькою до неї.

2. Аналізується частота і новизна винагороди: чим більше одна людина протягом визначеного проміжку часу винагороджувала діяльність іншої, тим частіше остання буде цю діяльність повторювати.

3. Аналізується цінність винагороди: чим цінніша винагорода, тим частіше діяльність повторюється.

4. Аналізується частота винагороди: чим частіше людина в минулому одержувала винагороду від іншої людини, тим менш кошовною буде ця винагорода. Таким чином, уже на попередньому етапі перегляду списків за основними чотирма позиціями Джордж міг скласти ранги винагород і можливі «вигоди» у випадку надання допомоги своєму колезі. Це торкалося інтересів окремої людини, але включених у групові взаємодії. Однак чим частіше порушуються правила справедливого розподілу винагороди, тим більша імовірність, що «скривджений» виявить реакцію гніву, обурення та ін. Для цього авторами моделі були передбачені відповідні списки реакцій, навіть почуття «совісті». Ступінь участі Джорджа в допомозі Теду оцінювалася за часом виконання останнім програмного завдання — чим швидше, тим ефективніше була допомога.

«Гомункулюс» був перевірений у взаємодії не тільки двох, а й трьох особистостей («раніше не знайомих між собою»), де вдалося одержати утворення стійкої пари та ізоляцію моделі, що залишилася (як часто буває в людей). Однак коли моделі мали у своєму розпорядженні попередній досвід (позитивний чи негативний), виникали й інші соціограми відносин. Можна заперечувати ті чи інші положення і принципи, покладені авторами в основу моделі, але одне безсумнівно — їх модель доволі переконливо проілюструвала можливість модельного представлення групових взаємин, елементів суспільної поведінки, що дотепер вважалося прерогативою людини.

Наведені вище моделі та деякі інші (Абелсона, Симона, Н'юелла і Саймона та ін.) були побудовані на базі евристичного програмування. Однак у ході їх створення та дослідження з'ясувалося, що структура таких евристичних програм ще далека від структури реальних механізмів прийняття рішень людиною. Це пов'язане з тим, що адекватних характеристик було недостатньо, вони мали спеціалізований характер і їх реалізація на той час не могла бути технічно здійснена.

Жорсткий алгоритм евристичного програмування потребував достовірніших і правдоподібніших евристик, що, як уже з'ясовано, не завжди були в розпорядженні дослідників. Звідси і недоліки побудованих на основі евристичного програмування моделей розглянутого класу, в яких акцент робився на вирішенні проблемних ситуацій за рахунок відособленості від інших процесів психічної діяльності, що також лежать в основі евристик, зокрема мотивів, потреб, стимулів діяльності.

Моделі особистості та соціальної поведінки, створені в Україні. Прагнення позбутися недоліків методу евристичного програмування і побудованих на його основі моделей спонукало дослідників шукати нові шляхи моделювання. За відсутності достовірних і достатніх даних про реальні об'єкти, особливо соціально-психологічної природи, ми можемо покладатися на евристичну здатність людини до вирішення поставленого завдання в умовах неповної інформації, про що вже йшла мова раніше.

У вітчизняній науці активним прихильником та ініціатором відтворення відносин «суспільство—особистість» у вигляді моделі був М.М. Амосов. Він визначив шляхи розробки евристичних моделей об'єктів соціально-психологічної природи, формалізований опис яких ускладнений. Евристична гіпотеза про структуру моделі відносин «суспільство—особистість» у найзагальнішому вигляді складається з набору зовнішніх чинників середовища

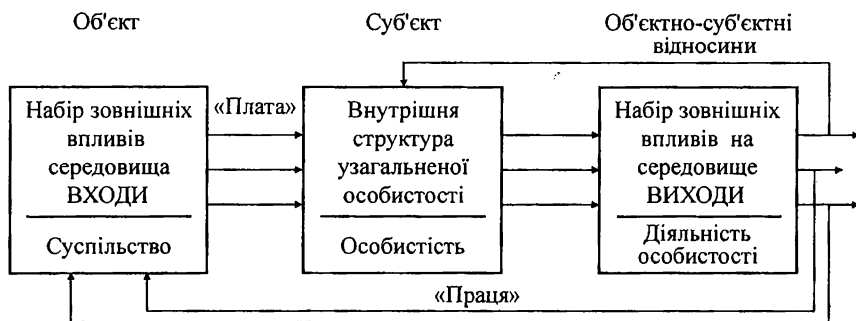


Рис. 2.20. Загальна схема об'єктно-суб'єктних відносин «суспільство—особистість» у моделі «узагальненої особистості» (за Амосовим, Беловим, Галенко, 1971)

(«входів»), що впливають на елементи власне «внутрішньої структури» особистості (потреби, почуття, стимули) (рис. 2.20). В результаті такого впливу виникають дії («виходи»), спрямовані назовні (праця, вчинки, висловлювання і т. д.). Модель відносин «суспільство—особистість» виступає при цьому як замкнута система, яка відображає різноманітність і складність існуючих у реальному житті взаємозв'язків. Оскільки кількість їх величезна, треба узагальнити багато характеристик особистості і соціальної поведінки людини, але з таким розрахунком, щоб збереглися найважливіші якості об'єкта, що моделюється. Свої міркування М.М. Амосов підсумував у відомій монографії «Природа людини» (1983), що дає можливість не зупинятися на його поглядах детальніше.

Основні ідеї методу евристичного моделювання послужили відправним пунктом для циклу робіт з дослідження та моделювання особистості, її соціальної поведінки. На початку велися пошуки прийомів і принципів моделювання окремих проявів поведінки особистості, зокрема деяких емоційних станів, психологічної сумісності, мовної поведінки.

Модель «Емік» («Емоційна модель Інституту кібернетики») була розрахована на вивчення вербальної поведінки людини. Модель призначалася для дослідження утворення та аналізу фраз з урахуванням емоційних проявів й організації пам'яті людини. Зазначимо, що «Емік» порівняно з уже згадуваними мала набагато більшу насиченість «проявами» емоцій людини (24 варіанти). За особливостями динаміки «емоційних процесів» можна було

міркувати про «успіхи» поведінки людини. Ця модель була перевірена в серії психологічних експериментів і реалізована програмно на ЕОМ.

Автор моделі (В.С. Старинець) зазначив, що розроблений алгоритм моделює емоційну поведінку людини в процесі її відповідей на запитання. Разом з тим стало очевидним, що пліднішим буде цілісний підхід до проблеми вивчення поведінки людини порівняно з виділенням та ізолюванням дослідженням окремих складових цієї поведінки.

Використовуючи метод евристичного моделювання вдалося на підставі гіпотез про можливу структуру особистості, особливостей соціальної поведінки розробити і дослідити кількісні моделі особистості (соціальних груп), що відображали різноманітність відношень «суспільство—особистість», деякі емоційні, мотиваційні та особистісні взаємини. На цих принципах вперше в СРСР (Україні) були побудовані моделі «узагальненої» особистості (МУО) — «Соціон», «МАН», «Кроха», які за своєю складністю та задачам, які вони розв'язували, набагато перевершили розглянуті вище закордонні моделі.

Модель «Соціон» являла собою інформаційний аналог поведінки соціальної групи з «узагальнених» особистостей (М.М. Амосов, Д.М. Галенко, В.М. Белов). Модель складалася з набору елементів і зв'язків між ними, що будувалися на цілому ряді допущень і передбачуваних залежностей евристичного характеру, покликаних заповнити відсутні дані для поєднання змінних, що використовувались, у єдиній системі-моделі. Основними були такі блоки (рис. 2.21):

1. «Входи», що імітують інформаційний вплив виділених для дослідження параметрів соціального середовища (характерних для того періоду розвитку суспільства).

2. Блок «первинних» емоцій-почуттів, інстинктів-потреб, стимулів діяльності, що мають біологічне походження («біогенні та психогенні» елементи структури особистості).

3. Блок «вторинних» почуттів, соціальних потреб, стимулів діяльності («соціогенні» елементи).

4. Блок розподілу особистих доходів.

5. «Виходи» — характеристики соціальної поведінки.

Серед параметрів, що у реальних умовах значно впливають на соціальну групу, особливо важливими є: стан ринку і ринкових цін, величина заробітку і матеріального заохочення, вплив з боку сфери культури і побуту, ефективність ідеологічної пропаганди, умови професійної діяльності й інформації про неї, ринок

праці та знання про соціальний контроль тощо. Інформаційний аспект цих параметрів середовища був прийнятий як елементи «входів» (усього 25).

За результатами оцінок були виділені групи з 20 біогенних і психогенних почуттів. До групи з 20 біогенних почуттів увійшли: різні види задоволення (від їжі, діяльності, комфорту, мистецтва, власності, спілкування), честолюбство, властолюбство, лінь, допитливість, альтруїзм, почуття волі, втома, ненависть, самолюбство, заздрість, жадібність, страх та ін. До групи з 20 соціогенних почуттів увійшли: почуття солідарності та справедливості, конформізм, ставлення до праці та інших соціальних груп, відношення до різних ступенів санкцій, почуття професійного удосконалення та ін., які склали «внутрішню мотиваційну структуру» особистості.

У задачах моделювання «узагальненої» особистості (МУО) не можна передбачити багате розмаїття почуттів і їх відтінків. Тому «Соціону» апіорі був запропонований умовний розподіл почуттів на «приємні» та «неприємні». Функція «окремих» почуттів, як було евристично припущено, підсумовувалась у гіпотетичних центрах «приємного» і «неприємного» залежно від модальності відповідних почуттів за знаком, їх силою, активністю прояву і кое-

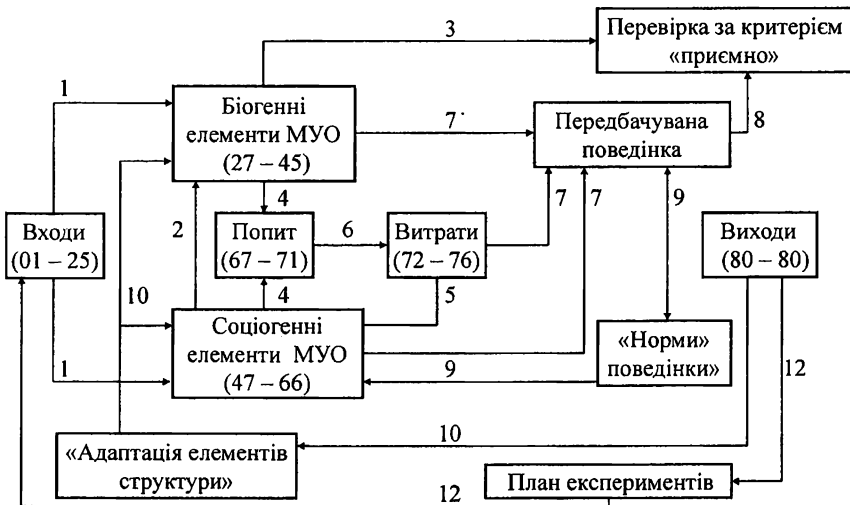


Рис. 2.21. Загальна блок-схема моделі «Соціон» (за Галенко, 1972). У дужках вказані номери елементів блоків (цифри біля стрілки позначають такти перетворень відповідно до блок-схеми процесу, що обчислюється)

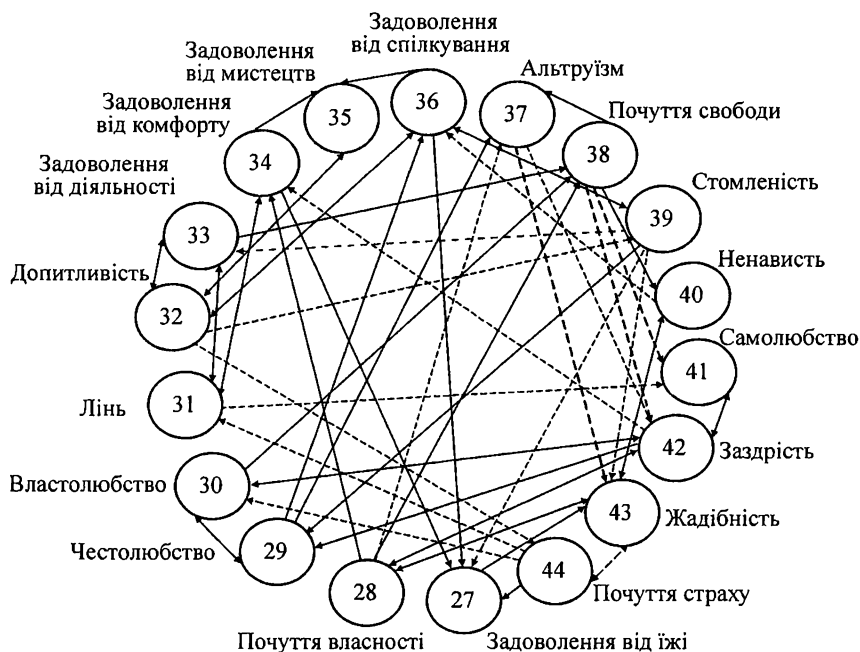


Рис. 2.22. Зв'язки між елементами почуттів-стимулів моделі «Соціон»: суцільна лінія — зв'язки, що посилюють; пунктирна — зв'язки, що послаблюють

фіцієнтами зв'язку між ними. Одне почуття могло гальмувати чи підсилювати інші почуття (рис. 2.22). Тому залежно від переваги тих чи інших почуттів модель дістала можливість оцінювати «свій внутрішній стан» як почуття «рівня психологічного комфорту» чи «дискомфорту».

Саме цей «внутрішній стан» поряд із адаптацією спонукає «узагальнену» особистість до різноманітних дій, спрямованих насамперед на усунення «почуття дискомфорту», що знаходило своє відображення в підвищенні активності визначених «вихідних» параметрів МУО. У такому представленні РПК виступає як один з істотних факторів мотиваційної «діяльності» моделі, що дає можливість досліджувати деякі механізми формування особливостей соціальної «поведінки». Почуття при цьому — це не тільки орієнтація переживань, а й певна спрямованість вчинків, зміна видів діяльності, що дає підставу розглядати їх як критерії-стимули поведінки.

Серед «вихідних» елементів були виділені: напруженість трудової діяльності, прагнення змінити місце роботи чи соціальний статус, прагнення до спілкування, підвищення професійного рівня знань, розподіл особистого бюджету, інформація про вчинки і висловлювання інших соціальних груп, оцінка РПК (всього 10).

Динамічні властивості моделі «Соціон» забезпечувалися спеціальними властивостями елементів, які складали її структуру, і зв'язків між ними, що нагадують властивості нейроподібних, так званих М-мереж. Серед властивостей елементів і зв'язків цієї моделі були виділені такі:

а) кожному елементу структури приписувалося семантичне значення, що кодує конкретну функціональну сутність цього елемента для моделі;

б) активність даного елемента із семантикою розглядалась як чисельна міра впливу його на інші змінні структури;

в) елементи з'єднувалися між собою зв'язками, по яких їх активність передавалась іншим перемінним структури моделі;

г) зв'язок був позитивний чи негативний, що визначило характер привнесеної зміни в процесі функціонування структури для кожного конкретного її елемента;

д) для кожного зв'язку була задана певна характеристика перетворення активності елемента (коефіцієнт зв'язку — k), на який даний зв'язок впливав. Характеристика зв'язку була функцією активності елемента, від якого зв'язок був спрямований. Структура зв'язків між елементами, їх знак (позитивний чи негативний), а також коефіцієнт ослаблення чи посилення зв'язку задавалися спеціальними матрицями;

е) активність кожного елемента змінювалась залежно від часу функціонування моделі (характеристика адаптації).

Реалізація змін у структурі моделі по всіх зв'язках проводилась за «тимчасову одиницю функціонування», або за один крок. Усім елементам і характеристикам моделі також евристично були приписані кількісні значення в діапазоні від 1 до 50 умовних одиниць із кроком через 10. У свою чергу, кожен крок реалізувався загальним алгоритмом (рис. 2.23). Таким чином, динаміка моделі виражалася послідовністю статичних станів структури по окремих кроках. Для розглянутої моделі тимчасовим кроком був місячний інтервал зміни характеристик, що обумовлено «історією» функціонування реальної соціальної групи, за якою проводилась коректуюча верифікація «поведінки» інформаційного аналога.

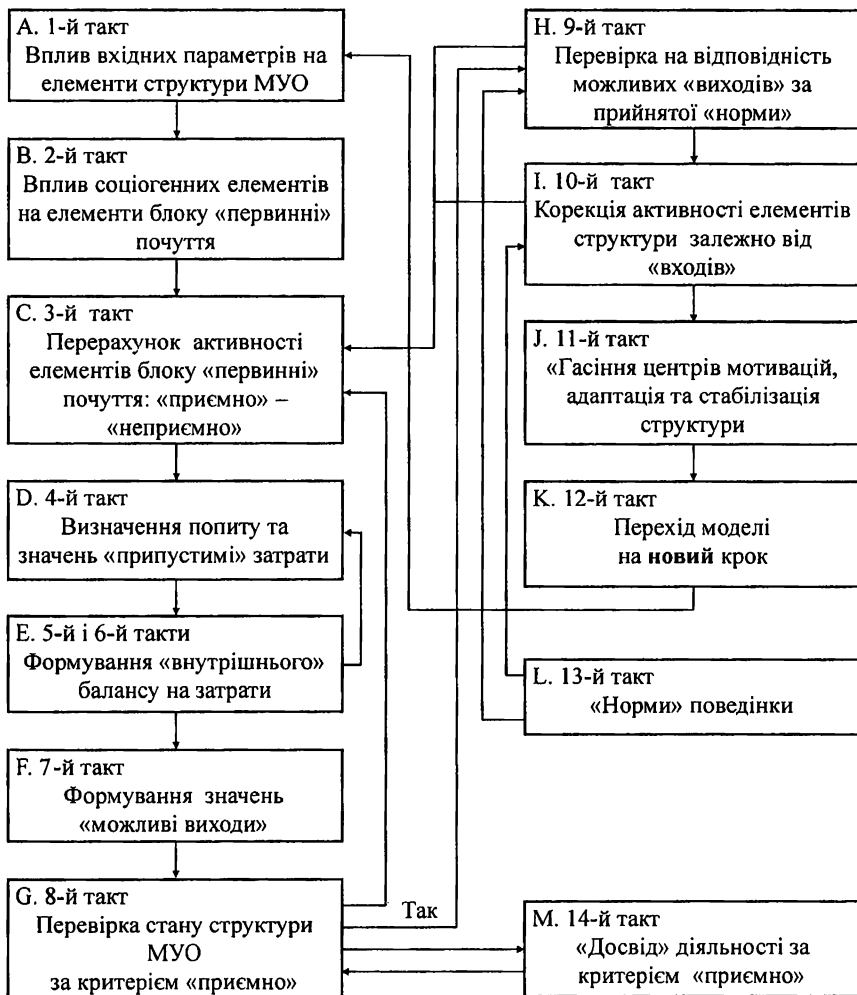


Рис. 2.23. Блок-схема обчислювального процесу моделі «Соціон»

Модель «Соціон» була програмно реалізована, містила понад 80 змінних, зв'язки між якими були задані 930 рівняннями алгебраїчного типу. З цією моделлю було проведено понад тисячу експериментів, зокрема, з вивчення впливу всіх елементів структури особистості на всі характеристики моделі, перевірки «поведінки» моделі в різних середовищах за спеціально поставленими «нормами» і «граничними відхиленнями». Результати експе-

риментів були зіставлені з якісними даними конкретних соціологічних і соціально-психологічних досліджень, наявними в літературі. Результати зіставлення після ряду коректувань вихідної гіпотези показали вірогідність реалізованих у моделі евристичних механізмів, які відображають важливі гіпотетичні детермінанти поведінки людини в плані її узагальненої соціальної діяльності, і довели принципову можливість модельного дослідження гіпотез про мотивацію соціальної поведінки.

Не будемо зупинятися на конкретних експериментах з моделлю «Соціон». Звернімо увагу на деякі позитивні сторони і недоліки обговорюваної моделі, аналіз яких дав змогу надалі приступити до створення нових МУО. Так, до достоїнств, мабуть, можна віднести такі положення.

1. Евристична модель «Соціон» на етапі проектування і технічної реалізації дала можливість кількісно зв'язати великий обсяг якісної інформації і даних про мотивацію та соціальну поведінку людей.

2. Модель уможливила цілеспрямоване планування конкретних психо-соціальних досліджень, завдання яких полягало в уточненні наявних і одержанні нових відомостей про механізми, що детермінують поведінку людини.

3. Евристична МУО дала змогу провести теоретичні експерименти для прогнозування можливих реакцій поведінки особистості за межами обмежень, в яких вона була верифікована. Результатами таких експериментів можуть бути набори передбачуваних альтернатив поведінки, наприклад, у ситуаціях, що не допускають конкретних досліджень з реальними групами людей.

До недоліків моделі «Соціон» варто віднести те, що вибір психофізіологічних, особистісних, соціологічних та інших характеристик людини і факторів середовища був, в основному, здійснений евристичним шляхом, хоча там, де це було можливо, вони уточнювалися методом експертних оцінок. Ступінь узагальнення елементів і характеристик моделі, особливо їх кількісна оцінка і значимість були доволі приблизними. Однак одне з основних завдань розглянутої моделі — відпрацювання принципової можливості модельного представлення складних механізмів, які обумовлюють поведінку людини, було вирішено.

Моделю «Соціон» за своєю складністю та розв'язуваням задач набагато перевершила відомі закордонні аналоги свого часу, про які згадувалося вище, і зберігає ці переваги дотепер.

Моделю «МАН». Аналіз недоліків моделі «Соціон» дав змогу передбачити і визначити точніший облік і вимір різноманітних

параметрів середовища та особистості відповідного реального об'єкта-аналога. Орієнтація на практичне застосування моделі змусила звернути особливу увагу на повноту її структури і точність, що дало б можливість перенести результати модельних досліджень на об'єкт моделювання. Тому модель «МАН» із самого початку мала напівевристичний характер. Там, де це було можливо, евристика поступилася місцем точним конкретним кількісним даним.

Так, у моделі «МАН» об'єктом моделювання став типовий представник соціальної групи — «робітник-верстатник» одного із відомих підприємств Києва. Основними характеристиками моделі «МАН» були: ступінь участі у виробничому процесі (інтенсивність праці та якість виконуваних робіт) і рівень душевного комфорту, що поєднували в собі інтереси виробництва й особистості.

У цілому модель «МАН» мала 63 «вхідних» впливи, 128 елементів «внутрішньої структури особистості», 39 параметрів, 47 коригувальних коефіцієнтів і 16 «виходів». Елементи структури моделі і зв'язки між ними, а також між параметрами, входами і виходами були описані 320 алгебраїчними рівняннями. Звертає на себе увагу те, що великому числу «входів» було поставлено у відповідність порівняно невелике число «виходів». Це зроблено для того, щоб за допомогою великого спектра «вхідних» впливів задати чіткі області припустимих керуючих впливів для формування передбачуваної «поведінки» узагальненої особистості («виходів») в умовах трудової діяльності.

Оскільки взаємини людини із суспільством складаються з її участі в діях різних (формальних і неформальних) груп, здавалося доцільним виділити три рівні «входів» для моделі: 1) параметри суспільства як цілого; 2) параметри близьких до модельної особистості соціальних груп з безпосереднім контактом; 3) умови праці та побуту даної соціальної групи.

«Виходи» моделі були представлені такими змінними: грошові витрати (відповідно до параметрів ринку), розподіл вільного часу, інтенсивність праці, якість роботи, підвищення кваліфікації, зміна місця роботи, зміна професії.

Елементами «внутрішньої структури» моделі були такі змінні: задоволення від задоволених потреб і діяльності, жадібність, властолюбство, підпорядкованість, гордість, марнославство, альтруїзм, групова солідарність, допитливість, страх втратити роботу, привабливість професії, почуття власності, переконання стосовно моралі, економіки і ряд інших. Кожне почуття було визначе-

но набором відповідних параметрів зовнішнього середовища і внутрішньої структури, а характер кількісних залежностей відображає якісне уявлення про природжені та набуті вихованням інтереси і прагнення особистості.

«Почуття» як елементи «внутрішньої структури» моделі «МАН» мали визначені динамічні властивості:

- *інерційності* (зміна активності почуттів могла запізнюватися відносно зміни «входів»);
- *насиченості* (залежності активності почуттів від «входів» були нелінійні та обмежені за величиною);
- *адаптації* (якщо почуття за своєю активністю перевищувало деякий заданий рівень, то збудливість відповідного елемента поступово і мимоволі знижувалася до деякого номінального значення);
- *стомлення* (зусилля з інтенсифікації стимулів могло збільшуватись тільки до того моменту, доки зростання приємного почуття від зусилля не перевищить неприємного почуття стомлення від нього).

«Поведінка» моделі «МАН» як МУО залежала від матеріальних і моральних стимулів, оскільки ці сумарні поняття набули найбільшого поширення в літературі про трудову діяльність. При цьому матеріальний стимул будувався за принципом дефіциту позитивних почуттів «біогенної» природи. Так, наприклад, матеріальний стимул містив: заробіток і можливість його підвищення, ідеали грошових витрат, фактичні грошові витрати, організацію праці та ін.

Моральний стимул значною мірою формувався «соціогенними» почуттями і містив: почуття громадянського обов'язку, задоволення від процесу праці, фактори злагожденості колективу, надії на просування по службі та підвищення кваліфікації, а також страх втратити вигідну роботу.

Сумарний стимул розраховувався в такий спосіб: від суми морального і матеріального стимулів віднімалася величина стомлення, бо, як відомо, будь-яке надмірне зусилля людини пов'язане з почуттям стомлення. У моделі «МАН» почуття стомлення описувалося спеціальною характеристикою зі шкалою з п'яти ступенів. Сумарне стомлення, відповідно до гіпотези, залежало від таких параметрів: виду трудової діяльності, інтенсивності праці з даного виду діяльності, часу роботи із заданої діяльності, ставлення особистості до даного виду діяльності, властивостей особистості (кваліфікація і тренованість працівника).

Отже, у моделі узагальненої особистості «МАН» було прийнято гіпотезу про три характеристики особистості працівника,

що визначають його поведінку, а саме: почуття, стимули і стомлення. Таким чином, були визначені основні елементи і параметри моделі, від яких залежать ті чи інші сумарні характеристики, що беруть участь у формуванні «виходів» і сприймають вплив середовища — «входів» через її «внутрішню мотиваційну структуру». Найвищим рівнем у мотиваційній структурі були їх інтегральні оцінки — сумарний стимул, інтегральне почуття «рівня психологічного комфорту» і сумарне стомлення. Елементи, що впливали на зниження рівнів, розкривали зміст кожної інтегральної характеристики. Інтегральне почуття «рівня душевного комфорту» розраховувалося аналогічно моделі «Соціон» як різниця між сумою «приємних» і «неприємних» почуттів.

Формування структури зв'язків між параметрами та елементами моделі здійснювалось за допомогою проектування статичних характеристик за якісними показниками. Це зводилося, по суті, до визначення функцій багатьох змінних з накладеними обмеженнями на зміни значень аргументів і самих функцій. Аналіз статичних характеристик дав змогу вносити цілеспрямовані зміни в елементи на всіх рівнях ієрархічної структури, досліджувати вплив окремих параметрів без проведення складних обчислювальних процедур, що значно скоротило обсяг роботи зі створення і налагодження моделі. Цим самим була сформована структура моделі і встановлений порядок функціональних зв'язків між ними (рис. 2.24).

Функціональні характеристики для кожної змінної з метою спрощення вибиралися з обмеженого класу таких функцій:

$$y = a + bx, \quad (2.4.1)$$

де y, x — змінні; b, a — коефіцієнти (дійсні числа, позитивні чи негативні). Коефіцієнти a, b задавалися на підставі якісних описів залежно або на підставі експертних оцінок.

Основний «вихід» моделі «МАН» — інтенсивність праці, яка багато в чому визначає трудову поведінку особистості, будувався шляхом порівняльної оцінки інтегрального почуття РДК і сумарного стимулу. Інші «виходи» моделі будувалися на стимулах і почуттях, що відповідають кожному «виходу», послідовно сформованому з використанням параметрів і змінних кожного рівня.

Динамічні властивості особистості та розрахунок зміни її поведінки в часі (тимчасовим тактом був обраний один місяць) у моделі «МАН» розглядалися як реакції на зміну умов праці, системи

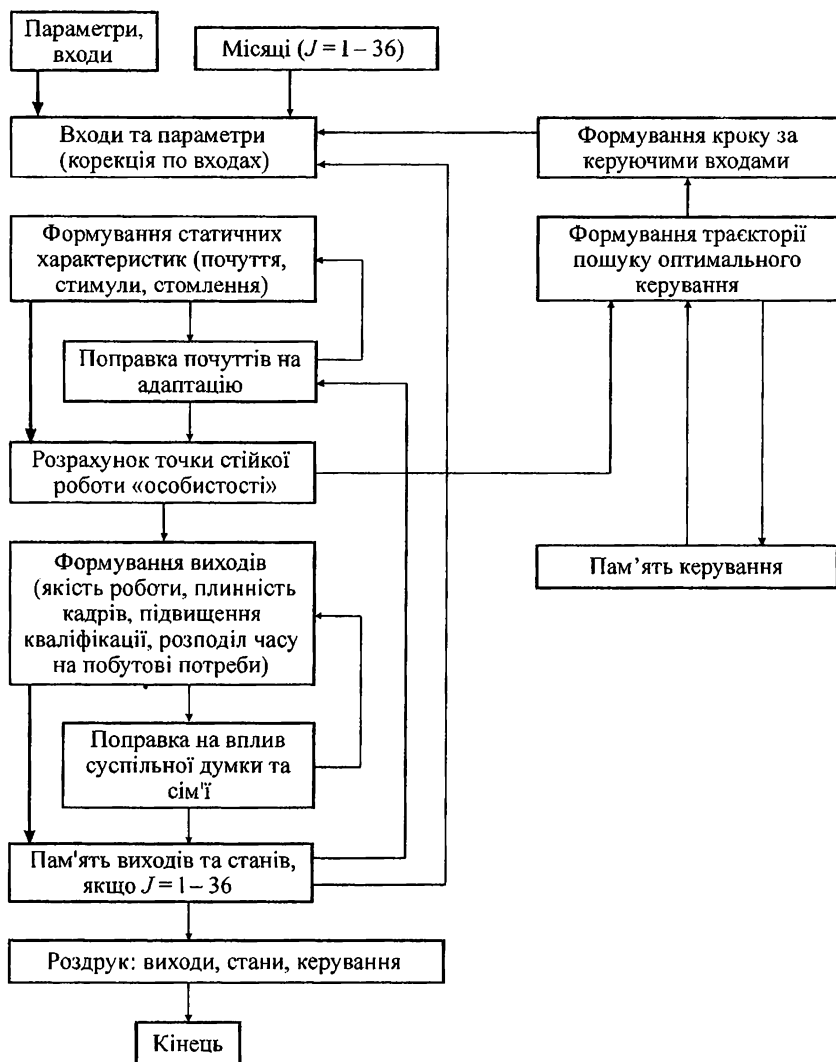


Рис. 2.24. Блок-схема розрахунку «виходів», стану та керування моделі «МАН» (за Ольшаніковим, 1978)

оплати, системи морального заохочення та інших змін «входів». Динамічні властивості моделі задавалися особливістю «реагування» почуттів, їх динамічними властивостями — адаптацією, інерційністю і насиченням.

Модель «МАН» була програмно реалізована. Час розрахунку всіх характеристик моделі залежав від поставленого завдання і міг становити від 5 хв (розрахунок статичних характеристик) до 30 хв. Вивчення динаміки поведінки моделі проводилось протягом 24 тактів, де кожен такт відповідав 1 міс. Керуючи динамікою «входів», можна було компенсувати зазначені властивості почуттів і підтримувати РПК на доволі високому рівні з незначними коливаннями або досягти гранично високих значень з наступними спадами до мінімуму і водночас оцінювати зміни, що відбуваються з «виходами».

Дослідження і досвід роботи з моделлю «МАН» показали практичну цінність подібних моделей для вирішення ситуаційних завдань.

Модель особистості дитини «Кроха». Моделі, що розглянуто, — це моделі дорослої особистості, які відображають систему відносин і поведінку. Це було зумовлено завданнями, що стояли перед моделюванням. Тим часом не викликає сумнівів, що особистість дорослої людини є занадто «амальгамним» утворенням, в якому різноманітні індивідуальні властивості та якості особистості спаяні так тісно, що практично являють собою неподільне ціле. В особистості дорослого важко, а часом і неможливо виділити різноманітні біологічні та соціальні характеристики для врахування їх внеску в загальне функціонування особистості в рамках соціальної діяльності.

Найвдалішою для натурної верифікації гіпотези і моделі, як нам здається, є така системна взаємодія середовища й особистості, за якої можна впродовж порівняно короткого часу провести спостереження та оцінити істотні зміни параметрів і станів особистості. Для цієї мети особливо сприятливим є ранній дитячий вік як етап початкового становлення і формування особистості, взаємодії генотипу і фенотипу.

Модель узагальненої особистості дитини (УОД), яка одержала назву «Кроха», являє собою спеціально адаптований для дитячого віку варіант моделі «узагальненої» особистості з урахуванням взаємин елементів різних «рівнів» відповідно до гіпотези про трансформацію структури особистості (підрозділ 2.4.2).

У найзагальнішому вигляді «Кроха» мала три взаємодіючі сфери (рис. 2.25):

- 1) «входи» як середовище, що оточує дитину в родині та дитячій установі;
- 2) власне «внутрішню структуру»;
- 3) «виходи» як типи діяльності та вчинків дитини.

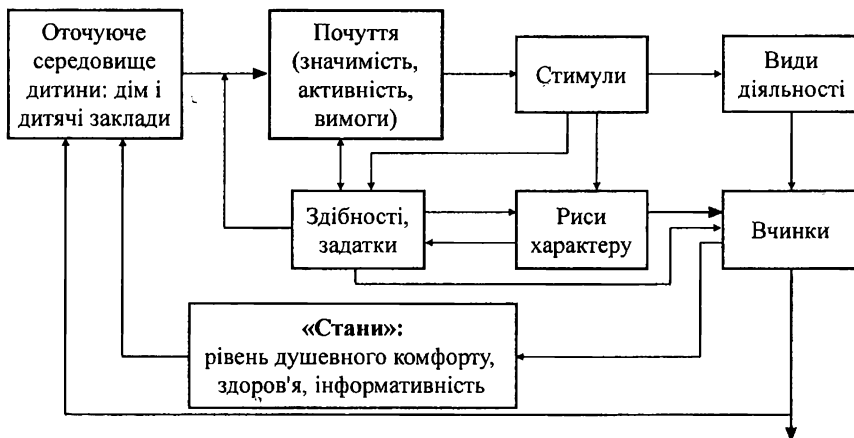


Рис. 2.25. Блок-схема моделі узагальненої дитини «Кроха» (за Беловим, 1976)

«Середовище» містило специфічні для дитячого віку характеристики і визначений набір впливів на дитину. Серед них було 40 «вхідних» параметрів, що характеризують такі показники, як інформативність, зацікавленість, пестливість чи ворожість оточення в дитячій установі та родині стосовно конкретного індивіда, кваліфікація вихователів, 18 видів чуттєвого забарвлення вчинків і дій середовища стосовно дитини.

Власне «внутрішню структуру» моделі (її так би мовити «психологічний кістяк») склали 18 «ключових» якостей, що, згідно з нашою гіпотезою, є необхідними і достатньо забезпечують почуттєву і діяльну мотивацію людини (у задачах моделювання). Серед них: *страх, лідерство, здатність підкоритися, товариш-кість, егоїзм, доброта, пестливість, агресивність, допитливість, ініціативність, рішучість, цілеспрямованість, оптимізм/песимізм, жадібність, здатність до зусиль, захопленість, можливість пере-ключатися з одного виду діяльності на інший*. Частина цих якостей передбачала початкові вольові зусилля, здатність до особистих зусиль і досягнень мети, що є «джерелом» майбутнього ха-рактеру.

У моделі «Кроха» дії «середовища» стимулювали (чи пригнічували) роботу відповідних почуттів «внутрішньої структури». «Природжені» якості (у вигляді 15 параметрів здібностей) задавалися початково заданою чутливістю до «вхідних впливів» кожного почуття, що значною мірою визначало «інтереси і праг-

нення» моделі. Якості здібностей були побудовані на неперервній шкалі (від -2 до +2). Числове значення якості відповідало значимості аналогічного почуття в особистості, тобто максимально можливому задоволенню (чи невдоволенню) від переживання даного почуття. У процесі діяльності почуття не обов'язково досягає максимальної величини, а може мати і деяке проміжне значення. Воно визначається співвідношенням рівня домагань, тобто «платою», за якої досягається максимум душевного комфорту, і фактичною «платою» середовища.

«Виходи» моделі були представлені 10 видами діяльності і 23 вчинками, характерними для дитячого віку. Вони формувалися на основі інтегральної оцінки активності почуття (за силою та знаком), що визначали стимули поведінки, інтереси і зайнятість дитини. Серед «виходів» виділимо:

- спілкування з дорослими та однолітками, у процесі якого дитина чітко виявляє властиві йому індивідуальні якості в системі відносин (лідерство—підпорядкованість, егоїзм—альтруїзм, агресивність—миролюбність тощо);

- організовані та спонтанні ігри і заняття;
- дослідження і спостереження;
- непродуктивні дії без мети, які ми назвали «діяльність заради діяльності».

Кожному виду занять ми приписували ступінь активності (від нуля до двох умовних одиниць), що визначає зусилля («працю»), з якими дитина впливає на навколишнє середовище, оточення. Залежно від мети дослідження розраховувалось середнє значення поведінки, складеної з наведеного набору видів діяльності за визначений проміжок часу (наприклад, за місяць). Коли вивчалася поведінка дитини в реальному масштабі часу, допускалося одночасне фіксування декількох видів діяльності (наприклад, гри, спілкування, дослідження).

Величина зусиль з кожного виду діяльності визначалась активністю відповідних почуттів, стимулами і рисами характеру, серед яких виділяємо: заповзятливість, рішучість, цілеспрямованість, оптимізм.

До числа «станів» входили: 1) рівень здоров'я і фізичного розвитку; 2) рівень розумового розвитку; 3) значимість почуттів; 4) оцінка рис характеру. Сполучення зазначених параметрів «станів» утворювало ансамбль, який необхідно розглядати як відносну сталість психологічного складу особистості за зовнішніх обставин, що змінюються. Параметри «станів» можуть змінюватися в різному ступені під впливом інтенсивних тренувань, навчання,

тобто тривалої роботи відповідних почуттів з високим рівнем активності, за якими можна судити про міру і досяжність виховних впливів. Відношення по всьому спектру «вхідних» впливів на кожне почуття «внутрішньої структури», що бере участь у формуванні того чи іншого виду діяльності, вчинку, задавалися нелінійними статичними характеристиками з заданими вагами від (-1) до (+1), за якими будувалися інтегральні характеристики загального почуття задоволення (РПК), стомлення, стимулів з різних видів діяльності. На підставі цих характеристик «стани» коректувалися в часі, де за тимчасовий такт динаміки їх змін було прийнято 1 міс.

Таким чином, модель «Кроха» являла собою замкнуту систему з евристично заданими статичними і динамічними характеристиками, побудованими з обліком наявних кількісних і якісних даних. На першому, дворічному, етапі дослідження модель дитини була переважно евристичною — приблизно на 80 %. Її машинна реалізація та перші експерименти показали несуперечливість вихідних припущень і дали задовільний збіг «поведінки» моделі з натурними даними в заданих умовах (на етапі перших років «життя» моделі «Кроха»).

Модель «Кроха» як інформаційна система представлення знань про людину на перших етапах її життя відіграла роль маршрутної карти, за якою дослідники змогли точніше зорієнтуватися в складному, мінливому оточенні, яким є раннє дитинство. Саме з моделі дитини стало зрозуміло, як треба орієнтувати натурні експерименти на одержання кількісних характеристик «плат» середовища, елементів структури особистості, сфери діяльності та вчинків.

Верифікація параметрів моделі дитини «Кроха» була здійснена в ході лонгіт'юдного 10-літнього спостереження за розвитком і вихованням однієї і тієї ж групи дітей (46—28 осіб), починаючи з 9—11-місячного віку.

Були використані такі методики і прийоми збору натурної інформації:

- спостереження та якісний опис особливостей особистості і характерних елементів вільної поведінки дитини в групі;
- поліваріантний хронометраж поведінки дитини в групі;
- оцінка рівня розумового розвитку;
- фото- і кінореєстрація поведінки дітей;
- проведення активних ситуаційних експериментів на визначення «значимості» почуттів;
- оцінка виховних «плат» дитячої установи;
- обстеження родин дітей за власною методикою.

На другому етапі дослідження модель «Кроха-2» враховувала понад 160 параметрів особистості, виховних і освітніх впливів, що існують у дитячій установі та родині, різних видів діяльності і вчинків дитини, отриманих упродовж понад 10-літнього спостереження. Контроль за якісною і кількісною відповідністю результатів моделювання натурним даним проводився дискретно, в точках, що відповідають тимчасовим зрізам у спостереженнях за дитиною (із приблизним інтервалом у 3 міс). На моделі вдалося відтворити характерні зміни в поведінці дитини у віці від одного до чотирьох років з розбіжністю, що не перевищує 10 %.

2.4.4. Математичні моделі динаміки «ключових» якостей особистості

Обговоримо результати дослідження динаміки психічних функцій особистості з використанням інформаційних технологій, а саме *методу математичного моделювання*.

На підставі лонгіт'юдного спостереження за 28 дітьми впродовж 10 років у різних умовах (дитячі ясла, дитячий садок, родина, школа), даних хронометражу вільної поведінки, особливих експериментальних ситуацій на визначення «значимості» окремих «ключових» якостей, особливостей поведінки дитини в групі однолітків у ході індивідуальних занять було експериментально виявлено 18 «ключових» якостей особистості.

Серед них: страх (порядковий номер 1, умовна позначка в таблицях Str), лідерство (2, L), підпорядкованість іншим (3, P), товариськість (4, Ob), егоїзм (5, Eg), пестливість (6, La), агресивність (7, Ag), доброта (8, Do), допитливість (9, Lu), ініціативність (10, In), рішучість (11, Re), цілеспрямованість (12, Zel), оптимізм/песимізм (13, Op), здатність до зусиль (14, Spus), жадібність (15, Gd), захопленість (16, Uvl), здатність переключатися у видах діяльності (17, Per), посидючість (18, Us).

Якісні результати для кожної «ключової» якості, одержані в результаті спостереження, були переведені за прийнятою експертним шляхом аксіоматично умовною шкалою у кількісні оцінки (в умовних балах). Вважалося, що мінімальна оцінка почуття не може дорівнювати нулю, а бралася лише менше 0,5. Середній ступінь вираженості «ключової» якості (y) описувався кількісною оцінкою, що лежить у межах $0,5 \leq y \leq 1,2$. Високий ступінь відповідно оцінювався $1,5 \leq y \leq 2,0$.

Узагальнення всіх кількісних значень за кожною психічною якістю проводилося в такі часові інтервали життя дітей: 1—1,5 роки; 1,5—2,5 роки; 2,5—3,5 роки; 5—7 років і 9—10 років, які в літературі називають «критичними», «найважливішими», «дру-

гим» народженням дитини. Таким чином, кожна оцінка якості особистості у визначеній часовій точці є певною результируючою багатьох оцінок, отриманих за різними методиками, висновків експертів і незалежних спостерігачів. Вона підбиває підсумок усім якостям особистості за силою, частотою, часом їх прояву за певний інтервал спостереження.

За усієї умовності отриманих таким шляхом експериментальних даних визначена тенденція до кількісного наростання (чи зменшення) кожної «ключової» якості особистості здається найцікавішою та найзначущою інформацією. Вона дає змогу робити висновки про індивідуально-типологічні особливості конкретної дитини в її взаємодії із зовнішнім оточенням, виділити в дитини провідні якості, що обумовлюють її індивідуальність, тип її особистості. Тут не обговорюються індивідуальні характеристики кожного з «ключових» слів в окремих часових точках, а розглядаються особливості їх динаміки в «узагальненій» дитини в цілому, на всьому 10-літньому інтервалі часу спостережень.

Динаміка показників психічних якостей «узагальненої» дитини та їх класифікація. Кожна з 18 «ключових» якостей має своє кількісне значення, отже, здійснює свій внесок у загальне функціонування особистості, обумовлюючи її психологічні особливості. Розподіл значень експериментальних даних, безумовно, не підпорядковується закону нормального розподілу, а, як правило, є полімодальним. Аналогічні нестандартні розподіли, як показав аналіз, характерні для всіх 18 «ключових» якостей. У зв'язку з цим, обробляючи експериментальні дані, неможливо скористатися стандартними методиками визначення математичного сподівання, дисперсії і моментів вищого порядку. Тому для одержання динаміки опорних елементів особистості «узагальненої» дитини використовувався метод обчислення середнього арифметичного.

Таблиця 2.5. Результати експериментальних значень «ключових» якостей

Період життя, роки	Назва і номер							
	Str	L	P	Ob	Eg	La	Ag	Do
	1	2	3	4	5	6	7	8
1—1,5	0,72	0,64	0,92	0,83	0,71	0,74	0,75	0,74
1,5—2,5	0,64	0,70	0,86	0,75	0,78	0,69	0,72	0,75
2,5—3,5	0,59	0,76	0,78	0,81	0,77	0,70	0,86	0,81
5—7	0,58	0,80	0,83	0,91	0,76	0,75	0,88	0,8
9—10	0,66	0,89	0,89	0,98	0,78	0,81	0,91	0,94

Для «узагальненої» дитини кількісні показники мають виражену динамічну тенденцію. За часові градації були взяті ліві значення експериментальних часових інтервалів (табл. 2.5).

Якісна класифікація динаміки елементів особистості. Динамічні криві зміни елементів особистості по роках (від одного до 9 років) у якісному відношенні можна поділити на три основних типи (рис. 2.26). Так, показники лідерство (2), доброта (8), рішучість (11), здатність до зусиль (14) і здатність переключатись (17) монотонно нарастають від одного до 9 років. Цей вид залежності ми відносимо до *першого типу*.

Велика група показників, у яку входять страх (1), підпорядкованість (3), товариськість (4), пестливість (6), агресивність (7), ініціативність (10), цілеспрямованість (12), жадібність (15) і посидючість (18), змінюються в такий спосіб: спочатку показник зменшується до мінімуму, а потім монотонно нарастає. Цей вид залежності ми відносимо до *другого типу* (рис. 2.26).

За часом наростання мінімуму елементи особистості можна поділити на три групи. Першу групу, яка має мінімум у точці 1,5 року, склали: товариськість, пестливість, агресивність, ініціативність, цілеспрямованість і жадібність. Друга група з мінімумом у 2,5 роки представлена показниками підпорядкованість і посидючість. Нарешті до третьої групи, що має мінімум у 5 років, можна віднести страх.

Третій тип складають залежності з вираженим хвилювим характером, що відрізняє їх від попередніх двох типів. Цей тип охоплює показники: егоїзм (5), допитливість (9), оптимізм (13) і захопленість (16). Третій тип залежності, у свою чергу, можна поділити за точкою мінімуму на дві групи: мінімум у точці 2,5 роки — допитливість і захопленість; мінімум у точці 5 років — егоїзм і оптимізм.

якостей (елементів)									
Lu	In	Re	Zel	Op	Sp. us	Gd	Uvl	Per	Us
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1,04	0,96	0,65	0,82	0,94	0,95	0,75	0,96	0,76	0,88
1,07	0,96	0,74	0,79	1,0	0,96	0,58	0,97	0,77	0,84
1,05	1,04	0,85	0,87	0,97	1,03	0,61	0,94	0,79	0,84
1,07	1,09	0,95	0,93	0,97	1,09	0,69	0,98	0,94	0,84
1,15	1,15	0,96	0,94	1,01	1,17	0,70	0,99	0,99	0,87

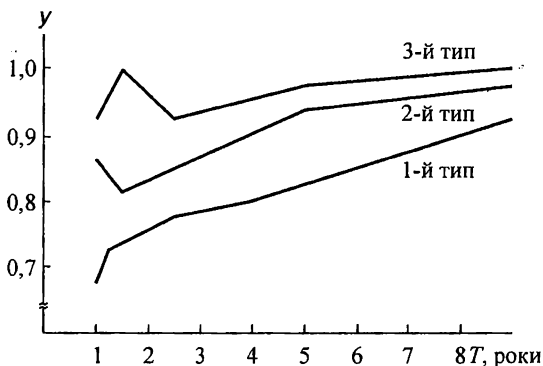


Рис. 2.26. Динаміка кількісних показників від 1 до 9 років життя «ключових» якостей особистості «середньої» дитини 1, 2 і 3-го типів

Специфіка динаміки психічних функцій. При моделюванні біологічних процесів, як правило, складних за своєю внутрішньою природою (до яких, безумовно, належать і психічні функції), виділяють три етапи: ідентифікація класу математичних моделей чи апарату математичного моделювання; ідентифікація структури математичних моделей та ідентифікація їх параметрів.

Стало традиційним вважати, що для адекватного опису процесів, які мають динамічну тенденцію, доцільно використовувати апарат диференціальних рівнянь. Цей метод обробки експериментальних даних широко застосовується вітчизняними і закордонними авторами. Зовнішній вигляд кривої, що охоплює експериментальні показники, як правило, може підказати досліднику порядок диференціального рівняння, а отже, й структуру математичної моделі.

Звернімося до показників першого типу, що монотонно нарастають від одного до 10 років (рис. 2.26). Відомо, що монотонно нарастаючі показники з обмеженням кінцевого значення можуть бути описані розв'язком звичайного диференціального рівняння першого чи другого порядку з постійними коефіцієнтами. Однак попередній аналіз динаміки кривих першого порядку показав, що для адекватного вибору структури математичної моделі слід враховувати принаймні два різноспрямованих процеси. Виявилося, що на початковому етапі становлення психічної функції має місце накладання двох процесів, один із яких може бути описаний розв'язком звичайного неоднорідного диференціального рівняння першого порядку з постійними коефіцієнтами і нульовою початковою умовою:

$$\frac{dy_1}{dt} + a_1 y_1 = P; \quad y_1(0) = 0, \quad (2.4.2)$$

де y_1 — значення наростаючої складової психічної функції; a_1 — коефіцієнт розмірності та пропорційності — величина, зворотна постійній часу; P — права частина рівняння, що відображає, з одного боку, потенційні можливості розвитку даної психічної функції, а з іншого — умови середовища, які впливають на формування цієї функції.

Другий процес також впливає на початковому етапі на значення показника — психічної функції, а в міру збільшення віку дитини його вплив зменшується. Такий процес може бути описаний розв'язком звичайного однорідного диференціального рівняння першого порядку з ненульовою початковою умовою:

$$\begin{aligned}\frac{dy_2}{dt} + a_2 y_2 &= 0; \\ y_2(0) &= y_2^0,\end{aligned}\tag{2.4.3}$$

де y_2 — значення складової психічної функції, що зменшується; a_2 — коефіцієнт розмірності та пропорційності — величина, зворотна постійній часу; y_2^0 — початкове значення показника. Воно відповідає тому значенню розглянутої психічної функції, яке здатний проявити новонароджений індивідум.

Попередній аналіз кривих другого і третього типів (рис. 2.26) показав, що вони в цілому також відображають взаємодію, як мінімум, двох процесів, виявлених при аналізі кривих першого типу. Другий і третій типи кривих є ще складнішими, що виправдовує вибір складнішої структури математичної моделі.

Синтез математичних моделей онтогенезу психічних функцій першого і другого типів. Таким чином, можна стверджувати, що динаміка онтогенезу психічних функцій першого і другого типів являє собою результат взаємодії двох різноспрямованих процесів, один із яких має тенденцію наростання (рівняння (2.4.2)), а другий — спадання (рівняння (2.4.3)).

Розв'язок рівняння (2.4.2) для нульових початкових умов записується у вигляді

$$y_1 = \frac{P}{a_1} (1 - e^{-a_1 t}).\tag{2.4.4}$$

Розв'язок рівняння (2.4.3) записується у вигляді

$$y_2 = y_2^0 e^{-a_2 t}.\tag{2.4.5}$$

Загальна формула для розрахунку психічної функції y має вигляд

$$y = y_1 + y_2 = \frac{P}{a_1}(1 - e^{-a_1 t}) + y_2^0 e^{-a_2 t}. \quad (2.4.6)$$

Для зручності перепишемо розв'язок (2.4.6), замінивши $\frac{P}{a_1}$ на $y_{\max}$,

$$y = y_{\max} (1 - e^{-a_1 t}) + y_2^0 e^{-a_2 t}. \quad (2.4.7)$$

Проаналізуємо рівняння (2.4.7): якщо $t = 0$, $y = y_2^0$; якщо $t \rightarrow \infty$, $y \rightarrow y_{\max}$.

Таким чином, незважаючи на те, що психічна функція є результатом двох процесів, у початковий період значення її в основному визначається «силою» генотипу, а наприкінці розглянутого тимчасового інтервалу ($t = 10$ років) — в основному рівнем впливу соціального середовища (фенотипу).

У рівняння (2.4.7) входять чотири невідомих: $y_{\max}$, y_2^0 , a_1 , a_2 . Для того, щоб побудувати конкретну математичну модель «ключової» якості, треба визначити ці невідомі за експериментальним масивом даних (табл. 2.5). Зіставлення теоретичних і експериментальних значень психічних функцій першого і другого типів дає максимальну похибку по всьому масиву експериментальних даних — 7,75 %, середню похибку — 1 %.

Синтез математичних моделей онтогенезу психічних функцій третього типу. До третього типу належать функції з вираженим коливальним характером у процесі їх становлення: допитливість, захопленість, егоїзм, оптимізм. Слід зазначити, що при формуванні цих психічних функцій, безумовно, працюють два розглянутих процеси. Разом з тим початковий хід кривих від одного до 1,5 років має наростаючий характер на відміну від кривих другого типу. Отже, щоб зберегти спільність розгляду динаміки становлення всіх психічних функцій, слід ввести в розгляд для кривих третього типу третю складову. Очевидно, що для відповідності експериментальним даним ця складова має істотно позначатися на значенні функції від нуля до одного року життя, входячи в загальний вираз для психічної функції з від'ємним знаком. Це означає, що третя складова на початковому інтервалі становлення психічної функції має «гальмівний» вплив на результуючу двох розглянутих вище процесів.

Формальний вплив третьої складової на формування психічної функції може бути відображений диференціальним рівнянням типу (2.4.5). У цілому математичну модель онтогенезу психічних функцій третього типу можна представити такою системою рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{dy_1}{dt} + a_1 y_1 &= P; \\ y_1(0) &= 0; \\ \frac{dy_2}{dt} + a_2 y_2 &= 0; \\ y_2(0) &= y_2^0; \\ \frac{dy_3}{dt} + a_3 y_3 &= 0; \\ y_3(0) &= y_3^0; \\ y &= y_1 + y_2 - y_3.\end{aligned}\tag{2.4.8}$$

Розв'язок системи (2.4.8) має вигляд

$$y = y_{\max}(1 - e^{-a_1 t}) + y_2^0 e^{-a_2 t} - y_3^0 e^{-a_3 t},\tag{2.4.9}$$

де $y_{\max}$ — граничне значення психічної функції.

У рівнянні (2.4.9) невідомими є: $y_{\max}$, a_1 , a_2 , a_3 , y_2^0 , y_3^0 .

Для їх визначення використовуються експериментальні дані (табл. 2.5).

Аналіз структури динаміки психічних функцій. У табл. 2.6 наведено значення розрахованих за експериментальними даними параметрів усіх «ключових» якостей. Аналіз даних табл. 2.6 дає змогу до якісного розмежування функцій на типи, наведеного вище, додати специфіку структури динаміки, внесену співвідношеннями граничних і початкових значень психічних функцій.

Так, для *першого типу* кривих (якості 2, 8, 11, 14, 17) граничне значення $y_{\max}$ завжди вище її початкового значення y_2^0 . Величина (Δy) характеризує різницю між досягнутим значенням функції в результаті виховання і початковим значенням функції в момент народження.

Для *другого типу* кривих (якості 1, 3, 4, 6, 7, 10, 12, 15, 18) граничне значення функції, досягнуте в результаті виховання, завжди нижче початкового (біогенного) значення.

Таблиця 2.6. Параметри математичних моделей психічних функцій

Параметр	Назва і номер							
	Str	L	P	Ob	Eg	La	Ag	Do
	1	2	3	4	5	6	7	8
a_1	0,39	0,44	0,53	0,60	0,78	0,67	0,92	0,36
$y_{\max}$	0,68	0,90	0,89	0,99	0,78	0,81	0,91	0,98
a_2	0,76	0,47	0,99	1,64	0,88	1,29	3,2	0,48
y_2	1,06	0,52	1,59	1,95	0,90	1,25	4,95	0,70
y_3	—	—	—	—	704,7	—	—	—
a_3	—	—	—	—	8,98	—	—	—

На відміну від двох попередніх типів для структури динаміки *третього типу* кривих (якості 5, 9, 13, 16) на початковому етапі додається гальмівна складова.

Абсолютне значення величини (Δy) дає змогу провести ранжування всіх «ключових» якостей особистості за чутливістю їх до виховних впливів: 1) жадібність; 2) агресивність; 3) цілеспрямованість; 4) товариськість; 5) рішучість; 6) підпорядкованість; 7) захопленість; 8) пестливість; 9) здатність до зусиль; 10) страх; 11) лідерство; 12) доброта; 13) оптимізм; 14) ініціативність; 15) посидючість; 16) допитливість; 17) егоїзм; 18) здатність до переключення.

За спадом абсолютних значень «сили» генотипних властивостей якості особистості розташувалися в такому порядку: 1) жадібність; 2) агресивність; 3) цілеспрямованість; 4) товариськість; 5) підпорядкованість; 6) захопленість; 7) ініціативність; 8) допитливість; 9) оптимізм; 10) пестливість; 11) страх; 12) посидючість; 13) здатність до переключення; 14) егоїзм; 15) доброта; 16) здатність до зусиль; 17) лідерство; 18) рішучість.

За спадом абсолютних значень граничного значення $y_{\max}$ соціогенної складової результуючої психічних функцій якості особистості дитини розташувалися таким чином: 1) здатність до зусиль; 2) допитливість; 3) ініціативність; 4) оптимізм; 5) захопленість; 6) здатність до переключення; 7) товариськість; 8) доброта; 9) рішучість; 10) цілеспрямованість; 11) агресивність; 12) лідерство; 13) підпорядкованість; 14) посидючість; 15) пестливість; 16) егоїзм; 17) жадібність; 18) страх.

Порівняльний аналіз динаміки становлення елементів особистості на основі дослідження математичної моделі. Для аналізу

якостей (елементів)

Lu	In	Re	Zel	Op	Sp. us	Gd	Uvl	Per	Us
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0,53	0,76	0,98	0,97	0,66	0,53	0,83	0,71	0,61	0,72
1,16	1,15	0,96	0,94	1,01	1,18	0,70	1,01	0,99	0,87
0,76	1,39	0,61	2,64	0,83	0,92	3,06	1,09	1,89	0,90
1,35	1,39	0,9	3,37	1,28	0,68	7,7	1,58	0,97	1,06
249,9	—	—	—	11,5	—	—	658,5	—	—
8,29	—	—	—	9,29	—	—	8,93	—	—

становлення функцій являє інтерес *тимчасова точка*, в якій кількісне значення зменшуваної біогенної складової дорівнює значенню наростаючої складової, що обумовлено виховними впливами середовища. Ця точка, очевидно, характеризує момент настання переважного впливу соціальних факторів у поведінці дитини, причому в перспективі роль їх зростає. Характер відносин і змін динаміки біогенної та соціогенної складових нагадують ситуацію, з якою мали справу дослідники рефлексорної поведінки.

У нашому випадку можна сказати, що для формування психічних функцій, якостей особистості, адекватних виховним впливам середовища, треба знівелювати вплив чисто вроджених, біогенних факторів, обумовлених біологічною еволюцією.

Таким чином, можна сформулювати *перший принцип онтогенезу психічних функцій*: для становлення дитини як соціальної особистості треба насамперед зменшити вплив біогенних факторів на процес формування особистості чи принаймні трансформувати біогенні фактори в соціогенні.

Ранжування біогенної складової за y_2^0 та a_2 . Враховуючи те, що розглядається процес формування дитини як соціальної особистості, будемо вважати, що факторами, які позитивно впливають на цей процес, є: мале початкове значення y_2^0 і велика швидкість зменшення цього значення a_2 .

Як узагальнений показник, що враховує ці два фактори, прийемо суму порядкових номерів, за якими дана психічна функція виявилася в переліку за y_2^0 та a_2 . При визначенні суми місць використовувався прямий перелік за a_2 і зворотний за y_2^0 .

Ранжування соціогенної складової за a_1 і $y_{\max}$. Для цієї складової психічної функції на формування особистості позитивно впливають високі значення a_1 і $y_{\max}$. Як показник ранжування беремо суму місць, зайнятих даними якостями у відповідних переліках.

Ранжування психічних функцій за параметрами двох складових. Як узагальнений показник вибираємо суму місць, зайнятих психічними функціями у розглянутих вище двох останніх переліках. Це означає, що для формування якості особистості позитивним є виконання одночасної умови: мале початкове значення біогенної складової і швидке її загасання та велике граничне значення соціогенної (середовищної) складової і швидке її наростання.

Ранжування за сумарним показником проводилося на основі гіпотези про позитивний вплив великих значень параметрів математичної моделі соціогенної складової, великої швидкості зменшення впливу і меншого початкового значення біогенної складової на процес формування психічної функції.

До питання про лінійну незалежність якості особистості. Попередній аналіз попарного порівняння близьких за динамікою (що потрапляють до одного типу кривих) психічних функцій дав змогу встановити лінійну залежність таких пар функцій:

- здатність до зусиль (14) — здатність до переключення (17);
- рішучість (11) — лідерство (2);
- підпорядкованість (3) — посидючість (18);
- цілеспрямованість (12) — агресивність (7);
- товариськість (4) — пестливість (6);
- допитливість (9) — захопленість (16);
- оптимізм (13) — егоїзм (15).

Знайдено значення множників для виписаних пар і їхні середні значення. Знаючи середні значення коефіцієнтів лінійної залежності, можна за експериментальними даними однієї функції одержати значення іншої, лінійно з нею зв'язаної. З 18 якостей особистості лінійно незалежними можна вважати 11, решта може бути отримана шляхом розрахунку. Уже після проведення дослідження стало очевидним, що число «ключових» якостей особистості, які гіпотетично складають її «психологічний кістяк», можна цілком скоротити з 18 до 10—12. Така можливість дає змогу експериментально не вимірювати деякі якості, а одержати інформацію про них з вимірювання ряду інших. Ця обставина має особливе значення також у задачах моделювання, коли треба мінімізувати можливе число змінних.

Експериментально виявлена структура «узагальненої особистості» дитини. Аналіз експериментальних значень показників 18 психологічних якостей особистості «середньої» дитини в інтервалі часу спостережень від року до 10 років дав можливість виявити динамічні тенденції та складну внутрішню природу особистісних характеристик. Кожна якість як психічна функція є деякою результуючою, як мінімум, двох процесів, спрямованих у різні боки. З одного боку, вона обумовлена впливом генотипу як складовою, а з іншого — впливом фенотипу як складовою та впливами середовища.

Відповідно до гіпотези «біогенний» рівень, представлений елементами жадібність, страх, лідерство, агресивність, займає «нижній» поверх структури, і внесок його елементів у загальне функціонування, судячи з рангів, є меншим порівняно з елементами «психогенного» і «соціогенного» рівнів. Елементи цих рівнів займають вище і провідне положення, «перекриваючи» значення «біогенного» рівня. Саме «ключові» якості «верхніх» рівнів більшою мірою забезпечують типологічну індивідуальність дитини.

Проаналізувавши «ключові» якості групи дітей, що досліджувались, ми переконалися в тому, що кожна з них має своє кількісне значення, свій ранг і, таким чином, здійснює свій внесок у загальне функціонування особистості. Якщо підсумувати ранги всіх 18 якостей для кожного досліджуваного, то можна скласти уявлення про «узагальнену» структуру «середньої» дитини взагалі. У цьому разі мова буде йти вже не про гіпотетичну структуру, а про структуру, що базується на експериментальних даних, отриманих у ході довгострокового натурного спостереження. Таким чином, маємо таку структуру «узагальненої» особистості дитини, де «ключові» якості розташовані в порядку зменшення внеску кожного елемента у функціонування особистості:

1) допитливість, здатність до зусиль	9 (сума рангів)
2) захопленість	14
3) ініціативність	16
4) посидючість	22
5) товариськість, підпорядкованість, здатність до переключення	23
6) оптимізм	27
7) егоїзм	31
8) цілеспрямованість	33
9) доброта, пестливість	34
10) рішучість	35
11) агресивність	39
12) лідерство	41
13) страх	48
14) жадібність	51

Зазначимо, що таке розташування елементів «узагальненої» структури особистості за експериментальними даними збігається з нашими вихідними гіпотетичними припущеннями, розглянутими в параграфі 2.4.3. Отримані дані дуже цінні та корисні для дитячої й загальної психології.

Таким чином, можна сформулювати *другий принцип онтогенезу психічних функцій: розвиток психічних функцій особистості на етапах онтогенезу йде «нагору» — від «біогенного» рівня до «соціогенного», а функціонування відбувається навпаки, «зверху — вниз» — від «соціогенного» до «біогенного»* (див. рис. 2.16). Цей принцип добре узгоджується з уже висунутим вище першим принципом.

Отже, конструктивність використання моделі як системи представлення знань про людину, дає змогу більш направлено вирішувати завдання цілісного вивчення її поведінки. Таке дослідження має відчутну перевагу перед фрагментарними, розрізненими дослідженнями. Інформаційні технології сприяють подальшій інтеграції різноманітних даних, будують конструктивні шляхи формалізації складних об'єктів психологічної та соціальної природи.

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ «ІНДЕКСУ ЗДОРОВ'Я»

Сформоване на сьогодні уявлення про здорову людину міцно пов'язане з гармонійною, всебічно розвиненою особистістю. Здоровою у всіх відношеннях особистістю можна назвати таку, яка має здатність адекватно реагувати й адаптуватися до умов екологічного, біологічного і соціального середовища, що постійно змінюються, здатна морально вдосконалювати себе, підтримувати високу особисту дієздатність. Це принципово відрізняє людину як суспільну істоту від будь-якого іншого представника тваринного світу.

На сучасному етапі дослідження цієї проблеми треба користуватися уявленням про здоров'я як про інтегральну систему, що покликана виконувати основну функцію життєздатності організму і життя людини в суспільстві в цілому. При цьому, якщо йдеться про рівень інтегрального здоров'я, то високий його ступінь має характеризуватися функціональною рівноваженістю організму з навколишнім середовищем за наявності стану фізичної, психічної та соціальної комфортності.

Пропонується нова інформаційна парадигма *індивідуального здоров'я здорової людини як триєдності фізичної, психічної та соціальної його сторін.*

2.5.1. Інформаційний простір проблеми здоров'я

Останнім часом стало очевидно, що подальше продуктивне вирішення проблеми здоров'я можливе не лише шляхом універсалізації самого визначення «здоров'я», а й за допомогою нових підходів, принципів його дослідження, де особливе місце займають методи інформаційних технологій. Отже, чітко намітився підхід до вивчення здоров'я як інформаційної проблеми.

Категорія здоров'я як складна інформаційна проблема потребує інших підходів для її вивчення, оцінювання, розкриття внутрішньої організації, ніж це прийнято в підході, традиційно орієнтованому більше на фізичну сторону здоров'я. Звідси виникає необхідність спочатку розглянути інформаційну структуру проблеми здоров'я як триєдності фізичного, психічного і соціального статусів. Ця структура має характеризувати, з одного боку, теоретичну сферу дослідження проблеми, а з іншого — показувати практичну, прагматичну значимість отриманих результатів.

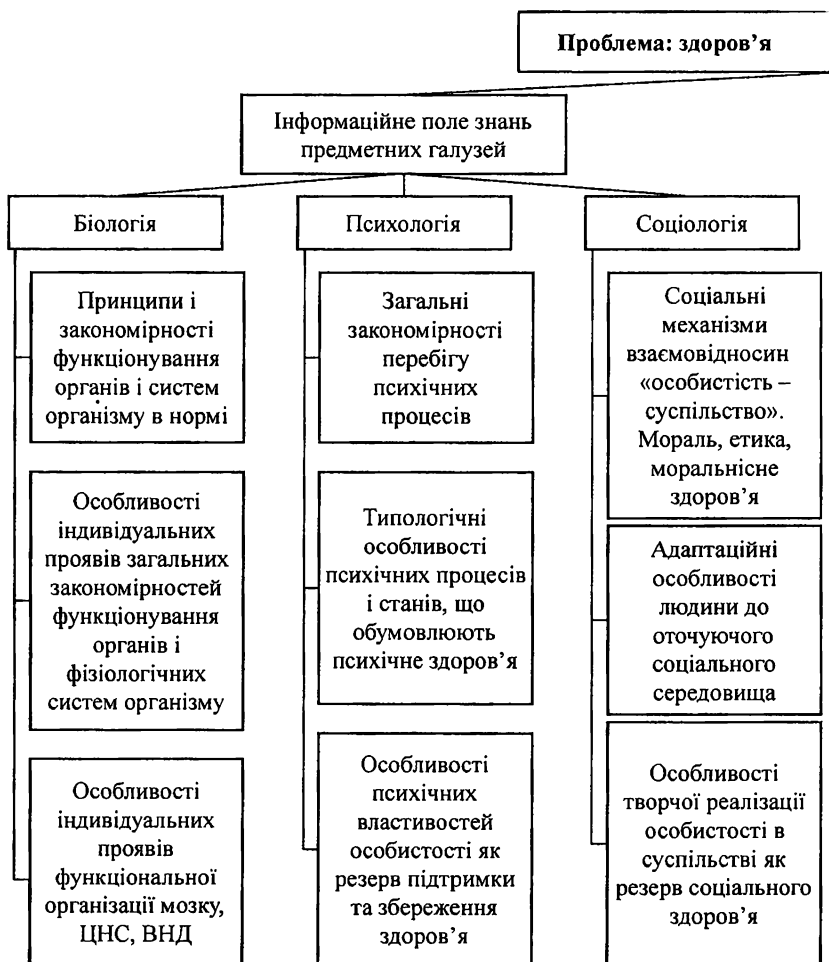


Рис. 2.27. Інформаційно-структурна модель здоров'я як проблеми

Якщо під методом інформаційно-структурного моделювання розуміти дедуктивний спосіб розчленовування складної проблеми на різноякісні блоки, що містять інформацію про структуру та функціонування предмета моделювання, то треба розглянути загальну організацію цих блоків і дати їх проблемно-орієнтований вербальний опис.

Здоров'я здорової людини як інформаційна проблема потребує, на нашу думку, опису, як мінімум, трьох блоків (рис. 2.27):

- блоку інформаційного поля знань основних предметних сфер;



- блоку інформаційно-технологічної бази дослідження;
 - блоку інформаційно-організаційних засобів керування.
- Зупинимось на кожному з них.

Перший блок (рис. 2.28) — *інформаційне поле знань основних предметних сфер* — утворюють такі науки, як біологія, психологія, соціологія, що є базисними для категорії здоров'я здорової людини. Вони поставляють основні знання для формування концептуальних уявлень про здоров'я здорової людини. Саме завдяки біології, психології та соціології здійснюється системний підхід до проблеми здоров'я з позицій триєдності фізичного, психічного і соціального його сторін, реалізується міждисциплінарна методологія дослідження, здійснюється концептуальний обмін конструктивною інформацією.

Біологія, формулюючи принципи і закономірності функціонування окремих органів і фізіологічних систем організму, дає можливість визначити індивідуальні відхилення чи особливості цих проявів в організмі конкретної людини в діапазоні норми у вигляді відповідних нормативних показників. Біологічні науки отримують знання про структурно-функціональну організацію мозку, індивідуальні особливості центральної і периферичної нервової системи, вищої нервової діяльності. Нервова система, як відомо, поряд із гуморально-ендокринною системою здійснює внутрішньосистемне гомеостатичне регулювання функцій організму в рамках еволюційно заданих діапазонів норми, що є однією з головних умов збереження здоров'я організму. Можна сказати, що через *гомеостаз і норму* біологія та суміжні з нею наукові напрями і дисципліни йдуть все далі шляхом наукового пізнання природи здоров'я. Це стосується і психології, оскільки поняття «норми» психічного здоров'я усе ще до кінця не визначено.

Психологія, об'єктом дослідження якої є людина, її особистість, суспільні відносини, завжди належала до гуманітарних наук (рис. 2.27). Вона вивчає закономірності прояву і розвитку психіки, психічних («душевних») явищ, які підрозділяють на психічні процеси (функції), властивості та стани. Цей розподіл є чисто умовним, оскільки всі психічні процеси тісно взаємозалежні та взаємообумовлені. Перебіг психічних процесів завжди відбувається на фоні визначених психічних станів, а індивідуальні розходження в психічних процесах виступають як характеристики психічних властивостей.

За допомогою психічних процесів (функцій) людина пізнає навколишній світ і себе в ньому, засвоює й одержує нові знання, здійснює свою багатопланову соціальну діяльність. Основні види

психічних функцій усім добре відомі: відчуття і сприйняття, пам'ять і мислення, емоції та почуття, свідомість і воля. Вони, у свою чергу, групуються в три основних класи — пізнавальні (когнітивні), емоційні та вольові функції. Психічні властивості — це індивідуальні психологічні особливості особистості, що роблять людей несхожими один на одного, визначають їх типологічне й індивідуальне розходження. До них належать: темперамент, характер, здібності, потреби і мотиви. Психічні стани визначають тимчасову динаміку психічної діяльності (настрій, стомлення, стресові переживання тощо). Таким чином, до проблеми здоров'я взагалі і психічного здоров'я зокрема психологія додає знання про внутрішній суб'єктивний світ людини як особистості, індивідуальні особливості переживань і усвідомлення рівня свого здоров'я (нездоров'я), відчуття «психологічного комфорту/дискомфорту», «м'язової радості» та ін. Хоча поки що не достатньо науково вивірених знань про роль, властивості та типи інтелекту, типи чуттєво-емоційних переживань, роль характеру в структурі особистості, значення останнього у формуванні життєвої орієнтації людини на підтримку і збереження здоров'я. Однак емпірично добре відомо, що люди ні певним чином вдається підтримувати свої психічні переживання на задовільному для неї рівні доволі тривалий час за рахунок передбачених механізмів внутрішньосистемного і системно-середовищного гомеостазу в діапазоні психічної «норми» психічного здоров'я.

Зазначимо, що наукові знання про можливі механізми системно-середовищного гомеостазу в інформаційній системі відносин «особистість—суспільство» надходять також від соціології та суміжних з нею наукових дисциплін.

Соціологія (рис. 2.27) вивчає соціальні механізми взаємин «особистість—суспільство», конкретні форми прояву загальних законів у сфері соціальної взаємодії людей в історично сформованих формах спілкування. Для проблеми здоров'я важливішим є аспект явищ і процесів, які виникають при взаємодії людей із суспільством, групові взаємодії з іншими людьми відповідно до загальноприйнятих у даному суспільстві морально-етичних цінностей.

Характер моральних і моральнісних взаємин, конфліктність чи конформність соціальної поведінки індивіда як члена соціальної групи впливають на механізми його системно-середовищного гомеостазу. До порушення нормального балансу соціального здоров'я призводять: незадоволеність людини життям у цілому; діяльність з порушенням морально-етичних, моральних

норм, що супроводжується каяттям, почуттям провини, невиконаного обов'язку і т. д.; не реалізація свого творчого потенціалу; розбіжність між бажаним і досягнутим. Із цим пов'язане, як можна припустити, порушення адаптаційних можливостей пристосування людини до постійно мінливих соціальних умов, сучасного динамічного ритму життя, що опосередковано позначається на її здоров'ї, особливо на його соціальній стороні.

Соціальним наукам іще треба отримати необхідні знання, щоб виробити строго наукові критерії «норми» соціального здоров'я, встановити механізми соціально-середовищного гомеостазу, які забезпечують разючу здатність людини адаптуватися до будь-яких екстремальних екосередовищ без розладів індивідуального здоров'я в цілому.

Другий блок проблеми здоров'я утворює *інформаційно-технологічна база* досліджень (рис. 2.28). На сьогодні кожна з описаних вище наук має в розпорядженні власні методи і засоби діагностики, які оцінюють показники переважно «своєї» сторони здоров'я людини — тіла, мозку чи поведінки, що абсолютно необхідно і виправдано. Тим часом стало очевидним, що перевагу над ізольовано отриманими даними про фізичне, психічне і соціальне здоров'я будуть мати знання, які початково орієнтовані системною концепцією про інтегральне здоров'я і завдяки їй переосмислені.

Сучасний рівень розвитку нових інформаційних технологій з їх методологією, методами, засобами аналізу і синтезу дає змогу вийти на новий рівень усвідомлення і представлення уже відомих і одержання нових знань. Однак розробка такої уніфікованої технології інтегрального дослідження здоров'я з урахуванням його троїстої природи фактично тільки починається.

Третій блок утворюють *інформаційно-організаційні засоби керування станом здоров'я* (рис. 2.27). На нашу думку, до них належать:

- інформаційно-пропагандистські засоби формування в людини нового типу мислення, спрямованого на формування навичок здорового способу життя, «моди на здоров'я»;
- формування інформаційного «банку здоров'я» населення за уніфікованою технологією біоекології;
- розробка інформаційної технології комплексного комп'ютерного самотестування користувачем індексу інтегрального здоров'я;
- розробка універсальних критеріїв адекватності та оптимізації оздоровчих програм, спрямованих на формування, підтримку і збереження здоров'я на усіх вікових етапах життя людини (валеологічний аспект).

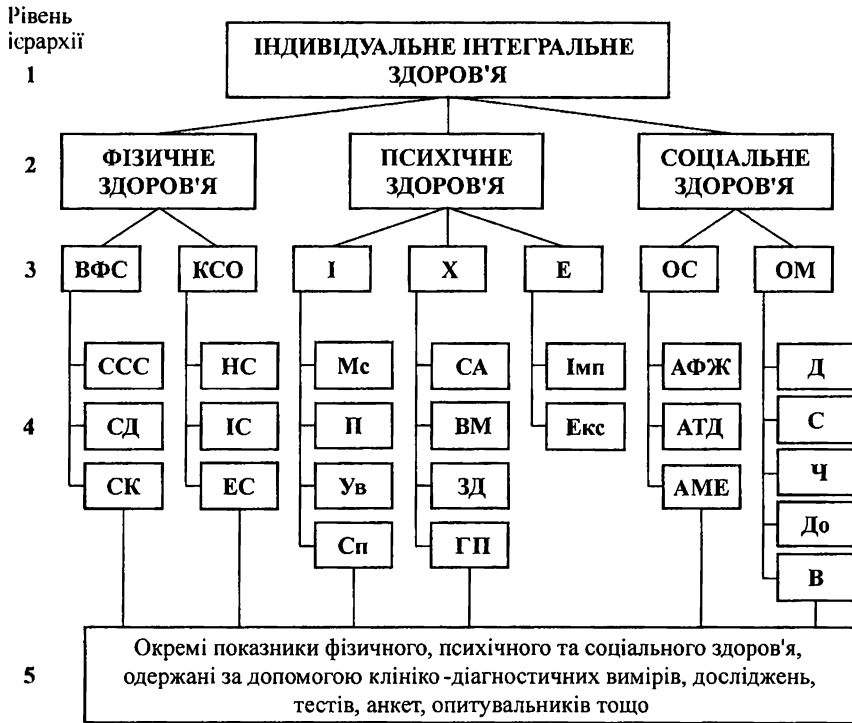


Рис. 2.28. Інформаційно-структурна модель інтегрального здоров'я.
Пояснення в тексті

Інформаційний аспект розгляду проблеми здоров'я дає можливість сформулювати узагальнене завдання дослідження проблеми індивідуального здоров'я людини: розробити інформаційну концепцію інтегрального здоров'я як триєдності фізичного, психічного і соціального здоров'я і, по можливості, верифікувати її, одержавши інформаційні знання про стан системи в цілому шляхом переведення вербально-якісної інформації в кількісні оцінки. Вирішення цього завдання передбачає розробку:

- принципів системного дослідження здоров'я;
- інформаційної моделі структури здоров'я людини;
- аксіоматики для кожного статусу;
- уявлень про можливі механізми норми і гомеостазу, покладених в основу інформаційної концепції інтегрального здоров'я;
- методів кількісної міри «індексу здоров'я» для різних ієрархічних рівнів структури здоров'я та «інтегрального індексу здоров'я».

2.5.2. Інформаційна структура інтегрального здоров'я

На здоров'я як найважливіший процес життєдіяльності організму й особистості людини впливає весь комплекс оточуючих факторів — фізичних, духовних і соціальних. Звідси випливає, що абсолютно необхідно виділяти фізичну, психічну і соціальну сторони здоров'я, які рівноправно представлені в загальній структурі здоров'я як цілісної системи. Разом з тим можна скласти інформаційне уявлення про «блокову» структуру категорії здоров'я шляхом декомпозиції її як цілого.

Інформаційну структуру здоров'я можна представити як ієрархічно розгалужене дерево із принаймні *п'ятьма рівнями*. Кожен рівень, у свою чергу, містить різну кількість інформаційних моделей, що відображають його поточний стан (рис. 2.28).

Перший рівень структури здоров'я утворює *індивідуальне інтегральне здоров'я* (рис. 2.28).

Другий рівень утворюють окремі сторони здоров'я — так звані *статуси*: фізичний, психічний і соціальний.

Третій рівень утворюють *компоненти* статусів здоров'я, кожна з яких має власні структуру і функцію.

Компоненти фізичного здоров'я представлені: внутрішніми фізіологічними системами організму (ВФС) і керуючими системами організму (КСО).

Компонентами психічного здоров'я виступають: інтелект (І), емоції (Е) і характер (Х).

Компонентами соціального здоров'я виступають: особистісно-середовищна (ОС) і особистісно-моральнісна (ОМ) компоненти. Підкреслимо, що моральнісна компонента розглядається нами як аналог рівня духовного здоров'я, розвитку особистості.

Четвертий рівень утворюють *складові* компонент.

Для компоненти внутрішньої фізіологічної системи організму (ВФС) — це *окремі* фізіологічні системи організму, наприклад, серцево-судинна система (ССС), система дихання (СД), система крові (СК). Для керуючої системи організму (КСО) — нервова система (НС), імунна система (ІС) і ендокринна система (ЕС).

Складовими інтелектуальної компоненти виступають: *властивості* мислення (Мс), пам'яті (П), уваги (Ув) та сприйняття (Сп).

Складовими емоційної компоненти є суб'єктивні переживання індивіда — власне внутрішня (імпресивна складова — Імп) і зовнішня (експресивна складова — Екс), які можна визначити за мімікою, мовою, руховими актами і поведінкою людини.

Складовими компоненти характеру виступають якості особистості, відповідальні за збереження і підтримку здоров'я: показ-

никами складових компоненти характеру (Х) обрані якості особистості, що найбільше ніж інші відповідають за збереження та підтримку здоров'я: соціальна активність (СА), волева мобілізація (ВМ), емоційне забарвлення діяльності (ЗД), генерація поведінкових проявів (ГП).

Як складові соціальної «особистісно-середовищної» компоненти прийняті:

- адаптація до фізичних умов життя (АФЖ);
- адаптація особистості до умов трудової діяльності (АТД);
- адаптація до морально-етичних норм суспільства (АМЕ).

Особистісно-моральнісну компоненту, на наш погляд, утворюють такі п'ять «ключових» складових якостей соціально зрілої особистості: честь (Ч), совість (С), достоїнство (Д), відповідальність (В), доброчинність (До). Їх наявність, ступінь прояву у людини дають змогу зробити висновок про ймовірний рівень духовного розвитку цієї особистості.

П'ятий рівень структури здоров'я формують окремі показники всіх складових здоров'я. Так, для серцево-судинної системи як складової — це: частота серцевих скорочень (ЧСС), систолічний артеріальний тиск (САТ), діастолічний артеріальний тиск (ДАТ), хвилинний обсяг серця (ХОС) та ін.

Значення показників фізичного здоров'я одержують за допомогою клініко-діагностичних і лабораторних методів або шляхом розрахунків. Показники психічного та соціального статусів визначають методами натурного та лабораторного спостереження, тестування, опитування, анкетування. Якщо показник неможливо визначити в такий спосіб, його кількісна оцінка встановлюється експертним шляхом або застосовуються спеціальні прийоми інформаційних технологій. Докладніше питання стосовно статусів, компонент і їх складових структури буде розглянуто в наступних підрозділах.

2.5.3. Особливості взаємин здоров'я, норми і гомеостазу

Описана вище інформаційна структура здоров'я має такий вигляд не випадково, а ґрунтується на особливостях гомеостатичної взаємодії її різних рівнів. Поняття норми і поняття здоров'я чиняться неподільними. У багатьох випадках їх просто ототожнюють, протиставляючи поняттю патології. У свою чергу поняття норми, здоров'я і гомеостазу належать до фундаментальних понять біології та медицини. Багато дослідників близько підхо-

дили до розуміння «норми» з позицій гомеостазу, вважаючи підтримку останнього особливою формою пристосування організму до умов навколишнього середовища.

Таке визначення норми в нашій аксіоматиці є близьким до розуміння норми з погляду системного гомеостазу. Розглянемо поняття «норма і здоров'я» з точки зору триєдності ієрархії гомеостазу в організмі людини. Найдослідженіший — *параметричний гомеостаз* як підтримка сталості життєво важливих для організму параметрів (наприклад, сталість у заданих межах рівня цукру крові, рН крові, температури тіла тощо).

Функціональний гомеостаз — підтримка сталості виконання біосистемами організму різного ієрархічного рівня своїх системних функцій (наприклад, серце — насосної, нирки — видільної, печінка — очисної тощо).

Системно-ієрархічний гомеостаз — сталість ускладнення системних функцій при русі від нижнього рівня ієрархії біосистеми до її верхнього рівня.

Норма як взаємодія різних типів гомеостазу. З точки зору параметричного гомеостазу під нормою можна розуміти середньостатистичний діапазон кількісних значень показників, коли кількісні значення не переходять у якісні зміни. З погляду функціонального гомеостазу під нормою можна розуміти можливість виконання біосистемою своєї системної функції, кількісні значення якої вкладаються в поняття норми з точки зору параметричного гомеостазу. З погляду системно-ієрархічного гомеостазу норма — це доцільність ускладнення системних функцій на кожному рівні ієрархії, спрямована на збереження динамічної взаємодії параметричного і функціонального гомеостазу з метою підтримки здоров'я організму та особистості в різних умовах існування.

Здоров'я як взаємодія різних типів гомеостазу. Виходячи з вищевикладених понять, мабуть, доцільно виділяти внутрішньосистемний і системно-середовищний прояви здоров'я.

Під *внутрішньосистемним* проявом здоров'я будемо розуміти норму фізичного здоров'я і нормальну основу потенційних можливостей індивідуума, яка розкривається у взаємодії із середовищем.

Під *системно-середовищним* проявом здоров'я будемо розуміти «норму» психічного і соціального здоров'я як адекватної емоційної, інтелектуальної, психічної, морально-етичної взаємодії із середовищем. Це до певної міри інші адаптаційні механізми пристосування людини до екологічного постійно мінливого навколишнього середовища, в тому числі психосоціального.

Підсумовуючи аналіз особливостей взаємодії понять норми, гомеостазу і здоров'я, *інтегральне визначення здоров'я може бути сформульоване так: здоров'я — це нормальне внутрішньосистемне функціонування статусів (фізичного, психічного, соціального) як потенційного базису індивідуума та адекватний системно-середовищний і системно-внутрішній їх прояв у соціальній поведінці особистості.*

2.5.4. Інформаційно-структурна модель фізичного статусу здоров'я

Фізичне здоров'я — це стан організму, за якого інтегральні показники фізіологічних систем лежать у межах фізіологічної норми й адекватно змінюються при взаємодії людини із середовищем. Фізичне здоров'я, фізичний статус є еволюційно базисним статусом загального здоров'я людини. Його вектор будується на показниках фізіологічних систем, що функціонують взаємозалежно.

Системна функція цього статусу — статико-динамічний, матеріально-енергетичний гомеостаз організму людини. Здійснюючи гомеостаз фізичного здоров'я, інтегральні показники основних фізіологічних систем лежать у межах фізіологічної *норми*, а під нормою розуміється той діапазон, в якому виявляються лабільність, рухливість, пристосованість організму до навантажень середовища протягом життя (за певними показниками життєдіяльності). У найзагальнішому вигляді інформаційна структура здоров'я вже була показана нами раніше на рис. 2.28. Тепер зупинимось на окремих статусах здоров'я детальніше.

Фізичний статус є найважливішою складовою частиною (2-й рівень) інтегрального здоров'я, про що вже згадувалося раніше. Інформаційна структура власне фізичного статусу відображена на рис. 2.29.

Компоненти фізичного статусу (3-й рівень) представлені внутрішньою фізіологічною сферою організму і його керуючими системами, обґрунтованість виділення яких як основних компонентів фізичного здоров'я не потребує доказів.

Складові компонент фізичного статусу (4-й рівень). Для «*внутрішньої сфери організму*» ними є: серцево-судинна система, система крові, система дихання. У даному разі число складових залишається відкритим, оскільки структура фізичного здоров'я в будь-який момент може бути доповнена іншими, не менш важливими фізіологічними системами (виділення, терморегуляції тощо).

Складові компоненти «керуючі системи організму» представлені на рис. 2.29 нервовою, ендокринною та імунною системами, які, як прийнято вважати, забезпечують виконання функцій регу-

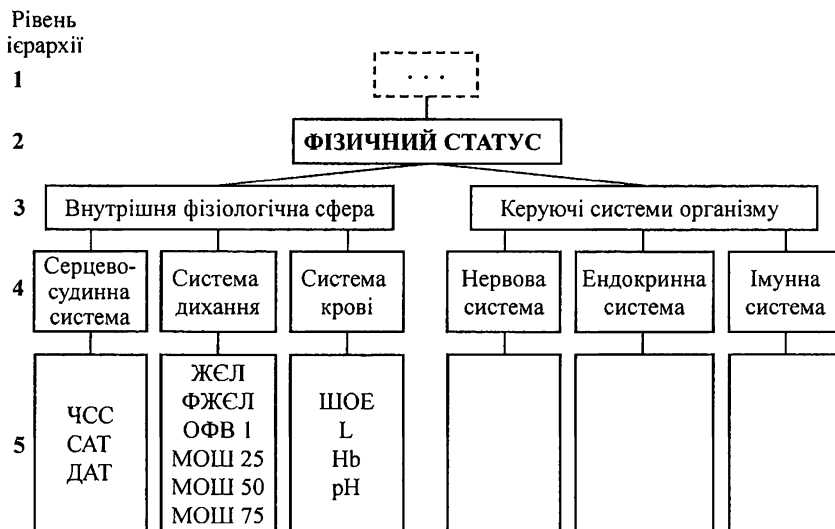


Рис. 2.29. Інформаційна структура фізичного статусу здоров'я.

Рівні ієрархії: 1-й — інтегральне здоров'я; 2-й — фізичний статус здоров'я; 3-й — компоненти фізичного статусу; 4-й — складові компонент; 5-й — показники складових фізичного статусу

ляції діяльності різних фізіологічних систем організму та їх взаємодію. Наприклад, завдяки виконанню цих регулювальних функцій у рідких середовищах організму підтримується гомеостаз — кислотно-лужна рівновага за рахунок сталості рН крові; сталість складу крові, її об'єм забезпечуються цілою низкою регулювальних систем, де нирки відіграють роль виконавчого органа, а їх екскреція регулюється гормонами.

Вибір фізіологічних систем, їх функцій і показників являє собою складне завдання, а саме: з великого різноманіття показників треба зупинити свій вибір на тих із них, які є найінформативнішими, тобто «опорними», для оцінки стану фізіологічних систем.

Показники складових фізичного здоров'я (5-й рівень) — це натурні показники фізіологічних систем організму, отримані лабораторними, клініко-діагностичними методами або шляхом опитування та розрахунків для керуючих систем організму.

Опорними показниками ССС (рис. 2.29), у першу чергу, є: частота серцевих скорочень, систолічний артеріальний тиск, діастолічний артеріальний тиск, що прямо характеризують насосну функцію серця і стан судин, а побічно й особливості регулювальних впливів з боку КСО.

За якісним і кількісним складом показників червоної крові (вміст гемоглобіну (Hb), швидкість осідання еритроцитів (ШОЕ) та білої крові (кількість лейкоцитів (L)) судять про функціонування системи кровотворення (СК).

Система зовнішнього дихання (СД) людини зв'язана безпосередньо із зовнішнім середовищем, тому побічно є важливим екологічним індикатором і характеризується багатьма натуральними показниками. Серед них: життєва ємність легень (ЖЄЛ), обсяг форсованого видиху за першу секунду (ОФВ1); форсована ЖЄЛ (ФЖЄЛ), максимальна об'ємна швидкість видиху (МОШ) на рівні 25, 50 і 75 % ФЖЄЛ. При цьому прийнято вважати, що ЖЄЛ характеризує обмежені зміни апарату дихання в цілому; ОФВ/ЖЄЛ визначає обструктивні зміни в легенях; МОШ25 характеризує прохідність трахеї і великих бронхів; МОШ50 — прохідність повітряного потоку умовно по середніх бронхах; МОШ75 характеризує прохідність повітряного потоку умовно по дрібних бронхах.

Нервова, ендокринна та імунна системи. Виокремити «опорні» показники для кожної системи з урахуванням їх взаємодії та неінвазійної методики дослідження — доволі складне завдання. Щоб оцінити стан цих систем, було синтезовано загальний опитувальник, який дає змогу виявити такі якості функціонування цих систем, як здатність протистояти несприятливим чинникам внутрішнього та зовнішнього середовища, надійність координування та керування функціонуванням внутрішньої сфери організму, імунно-нейроендокринного комплексу.

Ієрархічна система оцінок стану фізичного статусу. Суть інформаційної технології побудови ієрархічної системи оцінок фізичного статусу здоров'я полягає в тому, що стан фізичного здоров'я (2-й рівень), його компонент (3-й рівень — внутрішня фізіологічна сфера і керуючі системи організму), кожної складової компонент (4-й рівень — фізіологічні системи) оцінюються одним числом, уніфікованим і нормованим.

Відповідно до описаної інформаційної технології конструювання ієрархічної системи оцінок (підрозділи 1.3.4 та 1.3.5) першим кроком є уніфікація і нормування показників, тобто перетворення натурних показників в інформаційні. Далі — побудова оцінок стану складових — згортка відповідних інформаційних показників в одне нормоване число. Наступний крок — згортка оцінок стану відповідних складових в оцінку стану компоненти. І нарешті згортка оцінок стану компонент в оцінку стану фізичного статусу, яка теж характеризується одним кількісним показником, що змінюється в межах від 0 до 1.

Уявлення про функціонування фізіологічних систем можна одержати, вимірявши натуральні значення показників, які визначені як найінформативніші. При цьому кожен фізіологічний показник має свою розмірність, свої діапазони змін, гомеостатичні межі норми. Це первинний інформаційний масив, який є базисним для одержання висновків про функціональний стан фізіологічних систем.

Розглянемо процедуру ієрархічної згортки для конкретних фізіологічних систем і відібраних інформативних показників.

Уніфікація і нормування натурних значень показників серцево-судинної системи. Перетворення натурних значень показників ССС на інформаційні відносні значення розглянуто у підрозділі 1.3.4. Оцінка стану ССС як складової компоненти «внутрішня фізіологічна сфера» розглянуто у підрозділі 1.3.5.

Уніфікація і нормування натурних значень показників системи дихання. Як було показано вище, для системи дихання взяті такі показники: ЖЕЛ, ОФВ/ЖЕЛ, МОШ25, МОШ50 і МОШ70. Етапи перетворення натурних показників на відносну форму розглянуто у підрозділі 1.3.4.

Нагадаємо, що нормальному функціонуванню системи дихання відповідає умова, коли значення показника дорівнює чи перевищує 100 %; нижні межі норми показників, що використовуються, є такими: для ЖЕЛ (X_1) — 80 %; для ОФВ/ЖЕЛ (X_3) — 85 %; МОШ25 (X_5) — 80 % (для чоловіків) і 70 % (для жінок); МОШ50 (X_6) — 70 % (для чоловіків) і 60 % (для жінок); МОШ75 (X_7) — 70 %. Індеси при показниках X наведено згідно з даними підрозділу 1.3.5.

Для переведення цих значень у відносне значення використаємо формулу (1.3.13). Одержимо:

$$\begin{aligned} X_{1\text{відн}} &= \frac{80 - X_1}{80}; \quad X_1 < 80; \\ &0, \quad X_1 \geq 80; \\ X_{3\text{відн}} &= \frac{85 - X_3}{85}; \quad X_3 < 80; \\ &0, \quad X_3 \geq 85; \\ X_{5\text{відн}} &= \frac{80 - X_5}{80}; \quad X_5 < 80 \text{ для чоловіків}; \\ &0, \quad X_5 \geq 80; \end{aligned} \tag{2.5.1}$$

$$X_{5\text{відн}} = \frac{70 - X_5}{70}; \quad X_5 < 70 \text{ для жінок};$$

$$0, \quad X_5 \geq 70;$$

$$X_{6\text{відн}} = \frac{70 - X_6}{70}; \quad X_6 < 70 \text{ для чоловіків};$$

$$0, \quad X_6 \geq 70;$$

$$X_{6\text{відн}} = \frac{60 - X_6}{60}; \quad X_6 < 60 \text{ для жінок};$$

$$0, \quad X_6 \geq 60;$$

$$X_{7\text{відн}} = \frac{70 - X_7}{70}; \quad X_7 < 70;$$

$$0, \quad X_7 \geq 70.$$

За таких уніфікації та нормування діапазон зміни розглянутих інформаційних показників системи дихання лежить у межах від 0 до 1.

Побудова оцінки стану системи дихання. Алгоритм синтезу оцінки стану системи зовнішнього дихання з використанням методу ієрархічного згортання розглянуто у підрозділі 1.3.5. У цьому підрозділі розглянемо синтез даної оцінки у спрощеному варіанті, а саме враховуючи лише п'ять опорних показників.

На *рівні складових* (рис. 1.14) відносні значення X_1 , X_3 , X_5 , X_6 , X_7 (формули 2.5.1) і є інформаційні оцінки стану відповідно структурної та функціональної характеристик легенів; великих, середніх та малих бронхів.

На *рівні підсистем* «Легені» та «Бронхи» оцінка цих підсистем будується на оцінках стану відповідних складових у вигляді лінійно-виваженої суми. Вагові коефіцієнти визначаємо за формулою (1.3.26). Тоді оцінка стану легенів ($\delta_{\text{л}}$) у цілому

$$(\delta_{\text{л}}) = 0,485X_{1\text{відн}} + 0,515X_{3\text{відн}}. \quad (2.5.2)$$

Оцінка стану бронхів у цілому
для чоловіків:

$$(\delta_{\text{бр}}) = 0,364X_{5\text{відн}} + 0,318X_{6\text{відн}} + 0,318X_{7\text{відн}}; \quad (2.5.3)$$

для жінок:

$$(\delta_{\text{бр}}) = 0,35X_{5\text{відн}} + 0,3X_{6\text{відн}} + 0,35X_{7\text{відн}}. \quad (2.5.4)$$

Конструюємо оцінку *стану системи дихання* ($\delta_{\text{сд}}$) у цілому як складової компоненти «внутрішня сфера». Ця оцінка поєднує інформаційний показник стану ємності легень $\delta_{\text{л}}$ і оцінку стану бронхів $\delta_{\text{бр}}$ у вигляді лінійно-виваженої суми. Для визначення вагових коефіцієнтів робимо таке:

визначаємо середнє значення нижньої межі норми для показників, на яких побудована оцінка стану легень та бронхів;

визначаємо відповідні ваги при координатах $\delta_{\text{л}}$ і $\delta_{\text{бр}}$ за формулою (1.3.26).

За такого підходу оцінка стану системи дихання має вигляд для чоловіків:

$$\delta_{\text{сд}} = 0,53\delta_{\text{л}} + 0,47\delta_{\text{бр}}; \quad (2.5.5)$$

для жінок:

$$\delta_{\text{сд}} = 0,553\delta_{\text{л}} + 0,447\delta_{\text{бр}}. \quad (2.5.6)$$

Уніфікація і нормування натурних значень показників системи крові. Проведемо діагностику стану системи крові за такими показниками: кількість лейкоцитів (L); вміст гемоглобіну (Hb); швидкість осідання еритроцитів (ШОЕ). Відповідно до вимог загального алгоритму побудови оцінок стану розглянемо шкалу значень цих показників. Виділимо на ній межі нормального та екстремального функціонування.

Для лейкоцитів межі норми становлять: $4 \cdot 10^9 \div 10 \cdot 10^9$ од/л; загальний діапазон — $2,5 \cdot 10^9 \div 40 \cdot 10^9$ од/л. Для гемоглобіну межі норми — $120 \div 160$ г/л; загальний діапазон — $40 \div 400$ г/л. Для ШОЕ межі норми — $2 \div 0$ мм/м; загальний діапазон — $1 \div 90$ г/мм.

Натурні значення показників переводяться у відносні з використанням формул (1.3.11) і (1.3.12), які оцінюють відхилення від норми значень показників. У разі нормальних значень показників $X_{\text{відн}}$ приймається рівним 0. Наведемо формули для оцінки стану системи крові за показниками L, Hb, ШОЕ.

Для показника L

$$\begin{aligned} X_{\text{відн}} &= \left(\frac{X - 10}{30} \right), & \text{якщо } 10 < X \leq 40; \\ X_{\text{відн}} &= \left(\frac{4 - X}{1,5} \right), & \text{якщо } 2,5 \leq X < 4; \\ X_{\text{відн}} &= 0, & \text{якщо } 4 \leq X \leq 10. \end{aligned} \quad (2.5.7)$$

Для показника Нб

$$\begin{aligned} X_{\text{відн}} &= \left(\frac{X - 160}{240} \right), & \text{якщо } 160 < X \leq 400; \\ X_{\text{відн}} &= \left(\frac{120 - X}{80} \right), & \text{якщо } 40 \leq X < 120; \\ X_{\text{відн}} &= 0, & \text{якщо } 20 \leq X \leq 160. \end{aligned} \quad (2.5.8)$$

Для показника ШОЕ

$$\begin{aligned} X_{\text{відн}} &= \left(\frac{X - 10}{80} \right), & \text{якщо } 10 < X \leq 90; \\ X_{\text{відн}} &= 2 - X, & \text{якщо } 1 \leq X < 2; \\ X_{\text{відн}} &= 0, & \text{якщо } 20 \leq X \leq 160. \end{aligned} \quad (2.5.9)$$

І в цьому випадку інформаційні показники системи крові змінюються в інтервалі від 0 до 1 і визначають стан системи крові за кожним показником.

Побудова оцінки стану системи крові. Оцінку стану системи крові визначають за формулою (1.3.22). Для розрахунку нормованих вагових коефіцієнтів, з якими кожен показник входить у структуру оцінки, використовують формулу (1.3.25).

У результаті проведених обчислень одержано таку формулу для визначення оцінки стану системи крові як іще однієї складової компоненти «внутрішня сфера»:

$$\delta_{\text{ск}} = 0,44X_{\text{відн}}(\text{L}) + 0,31X_{\text{відн}}(\text{Hb}) + 0,25X_{\text{відн}}(\text{ШОЕ}). \quad (2.5.10)$$

Оцінка стану компоненти «внутрішня фізіологічна сфера» фізичного статусу. Відповідно до алгоритму побудови ієрархічної системи оцінок стану здоров'я наступним рівнем ієрархії оцінок є оцінка стану компоненти «внутрішня фізіологічна сфера» (ВФС) (див. рис. 2.29).

Оцінки станів фізіологічних систем, синтезовані вище, є основою для синтезу оцінки стану даної компоненти. Згідно з формулою (1.3.23) ця оцінка будується у вигляді такої лінійно-виваженої суми:

$$\Delta_{\text{ВФС}} = \beta_1\delta_{\text{есс}} + \beta_2\delta_{\text{сд}} + \beta_3\delta_{\text{ск}}, \quad (2.5.11)$$

де β_1 — β_3 — вагові коефіцієнти.

Відповідно до правила синтезу кількісної оцінки стану зміна оцінки повинна лежати в стандартному інтервалі (0...1). Звичай-

но для цього застосовують нормування вагових коефіцієнтів таким чином, щоб сума ваг дорівнювала 1.

У нашому випадку комплексна ієрархічна оцінка стану цієї компоненти визначається по трьох фізіологічних системах (ССС, СД і СК). Вагові коефіцієнти цієї оцінки були визначені експертним шляхом і прийняті рівними

$$\Delta_{\text{ВФС}} = \frac{1}{3} (\delta_{\text{ССС}} + \delta_{\text{СД}} + \delta_{\text{СК}}) \quad (2.5.12)$$

Очевидно, що при $\delta_{\text{ССС}} = \delta_{\text{СД}} = \delta_{\text{СК}} = 0$, тобто коли розглянуті показники усіх фізіологічних систем, включених в оцінку (2.5.12), збігаються з нормальними значеннями, стан компоненти $\Delta_{\text{ВФС}}$ знаходиться в нормі.

Оцінка стану компоненти «керуючі системи організму» фізичного статусу. Синтез оцінки стану цієї компоненти відрізняється від синтезу стану компоненти «внутрішня фізіологічна сфера». Як було наведено вище, ця компонента розглядається як єдиний імунно-нейроендокринний комплекс. Для оцінки стану цієї компоненти розроблено анкету-опитувальник, що містила 18 питань. За результатами опитування знаходимо інформативний натурний показник, тобто абсолютне значення, що дорівнює сумі одержаних балів (позитивна відповідь — 0, негативна — 1 бал). Одному питанню анкети (що стосується наявності хронічних захворювань) було приписано 2 бали, тому максимально можлива кількість балів 19.

Таким чином, абсолютне значення показника, за яким оцінюється стан координуючої компоненти, знаходиться у діапазоні від 0 до 19. Для перетворення балів на відносну форму треба визначити нижню межу норми, оскільки верхня її межа збігається з максимально можливою кількістю балів, а саме $X_{\text{max}}^{\text{н}} = 19$. Експертно було визначено нижню межу норми: $X_{\text{max}}^{\text{н}} = 16$. Перетворення абсолютних значень на відносну форму здійснюється за формулою (1.3.13). Тоді

$$X_{\text{відн}} = \frac{16 - X_{\text{абс}}}{16}, \quad X_{\text{абс}} < 16; \quad (2.5.13)$$

$$X_{\text{відн}} = 0, \quad X_{\text{абс}} \geq 16.$$

Значення $X_{\text{відн}}$ лежить в інтервалі 0—1. Оцінка стану компоненти «керуючі системи організму» $\Delta_{\text{КСО}}$ визначається за величиною $X_{\text{відн}}$

$$\Delta_{\text{КСО}} = X_{\text{відн}}.$$

Оцінка стану фізичного статусу. Комплексна ієрархічна оцінка стану фізичного статусу (фізичне здоров'я — $\Delta_{\Phi 3}$) будується у вигляді лінійної суми

$$\Delta_{\Phi 3} = \gamma_1 \Delta_{\text{ВФС}} + \gamma_2 \Delta_{\text{КСО}},$$

де $\Delta_{\text{КСО}}$ — оцінка стану компоненти «керуючі системи організму»; $\Delta_{\text{ВФС}}$ — оцінка стану компоненти «внутрішня фізіологічна сфера»; γ_1, γ_2 — вагові коефіцієнти.

Згідно з правилом синтезу кількісних оцінок, оцінка $\Delta_{\Phi 3}$ також має змінюватись у стандартному інтервалі 0 ...1. Для цього використовують, як і в попередньому випадку, нормування вагових коефіцієнтів таким чином, щоб сума дорівнювала одиниці.

Вагові коефіцієнти цієї оцінки $\Delta_{\Phi 3}$ були визначені експертним шляхом з урахуванням того, що координуючий комплекс, об'єднуючи три фізіологічні системи, виконує такі важливі функції, як узгодження роботи усіх органів і фізіологічних систем та підтримання загального гомеостазу на рівні цілісного організму. Тому ваговий коефіцієнт оцінки компоненти «керуючі системи організму» збільшено до 0,6:

$$\gamma_1 = 0,4; \gamma_2 = 0,6.$$

Тоді

$$\Delta_{\Phi 3} = 0,4 \Delta_{\text{ВФС}} + 0,6 \Delta_{\text{КСО}}. \quad (2.5.14)$$

Усі оцінки стану статусу лежать в інтервалі $0 \leq \Delta_{\Phi 3} \leq 1$.

Вербальна характеристика шкали оцінок стану. Одним із правил синтезу кількісних оцінок стану є таке: вербальне трактування стану оцінок показників, складових, компонент, статусів і здоров'я в цілому всередині інтервалу (0...1) має базуватися на єдиній кількісній класифікаційній шкалі. Для вербальної інтерпретації стану треба попередньо поділити всю шкалу станів від 0 до 1 на інтервали. Зрозуміло, що додати вербальну інтерпретацію одиниці шкали в інтервалі (0...1), наприклад, із кроком 0,1 важко, та й у цьому немає потреби. Тому можна йти шляхом укрупнення інтервалів шкали у такий спосіб:

Норма, нормальний стан	оцінка = 0
Практична норма	$0 < \text{оцінка} < 0,033$
Відхилення від норми:	
мале	$0,033 < \text{оцінка} < 0,333$
середнє	$0,33 < \text{оцінка} < 0,666$
значне	$0,666 < \text{оцінка} < 0,999$
максимальне	оцінка = 1

2.5.5. Інформаційно-структурна модель психічного статусу здоров'я

Визначення психічного здоров'я. Дуже своєчасним є питання про необхідність валеологічного підходу до проблеми психічного здоров'я, тобто початкове спрямування уваги на виховання, збереження і підтримку психічного статусу особистості, збереження її високої психічної працездатності та творчого довголіття.

Психологія визначає психічне здоров'я як «стан душевного благополуччя, що характеризується відсутністю хворобливих психічних проявів і забезпечує реакцію поведінки, адекватну умовам навколишньої дійсності» (Б.Д. Карвасарський).

Відповідно до нашої концепції здоров'я пропонуємо таке визначення поняття психічного здоров'я.

Психічне здоров'я як статус — це стан мозку, за якого його вищі відділи забезпечують нормальну адекватну інтелектуальну, емоційну і свідомо-вольову взаємодію з зовнішнім оточенням за рахунок відображення як властивості психіки та інтегративної діяльності мозку. Психічний статус людини — це основа його соціальної поведінки. Тому *системну функцію* психічного статусу здоров'я варто визначити як внутрішньосистемний інформаційний гомеостаз, оскільки в цьому випадку ми маємо справу з мозком, його потенційними можливостями і здібностями.

Створення міждисциплінарної концепції психічного здоров'я — непросте завдання, яке поки що не вирішено. У закордонній і вітчизняній психології фактично немає нормативних показників, які б давали змогу оцінювати рівень психічного здоров'я особистості на всіх етапах її розвитку, починаючи від пренатального до танатологічного періодів життя людини. Пояснюється це тим, що питання про конкретні критерії психічного здоров'я вивчені недостатньо. Відомі авторитети в галузі медичної психології вважають, що до них правомірно відносити насамперед такі особливості (наведені не в порядку їх ранжування):

- відповідність психічних реакцій людини силі та частоті зовнішніх подразнень;
- почуття сталості й ідентичності психічних переживань за однотипних обставин;
- здатність розвивати зрілість розуму і почуттів відповідно до віку людини;
- вміння зберігати високий психологічний статус особистості, рівень душевного комфорту як головну умову творчого довголіття;

- здатність змінювати спосіб поведінки залежно від зміни життєвих обставин;
- самоствердження себе в суспільстві без психічних наслідків для себе;
- критичний підхід до умов життя, що змінюються, та ін.

Наведені критерії психічного здоров'я важко використовувати для розробки кількісних мір його оцінки. На нашу думку, психічне здоров'я доцільно розглядати як складну систему. Щоб мати можливість синтезувати комплексну оцінку стану цієї системи, треба пілігітично виділити основні елементи психічного здоров'я людини, дослідити їх характеристики. Почнемо розгляд організації цієї системи з етапу виділення основних блоків психічної діяльності.

Інформаційна структура психічного статусу здоров'я побудована за таким самим ієрархічним принципом, що й фізичний статус, тобто як п'ятирівнева система. Психічна сторона здоров'я входить складовою частиною в загальне інтегральне здоров'я (1-й рівень) як психічний статус (2-й рівень) (рис. 2.30).

Три основні компоненти психічного статусу — інтелектуальна, емоційна і характерологічна — складають 3-й рівень ієрархічної структури здоров'я.

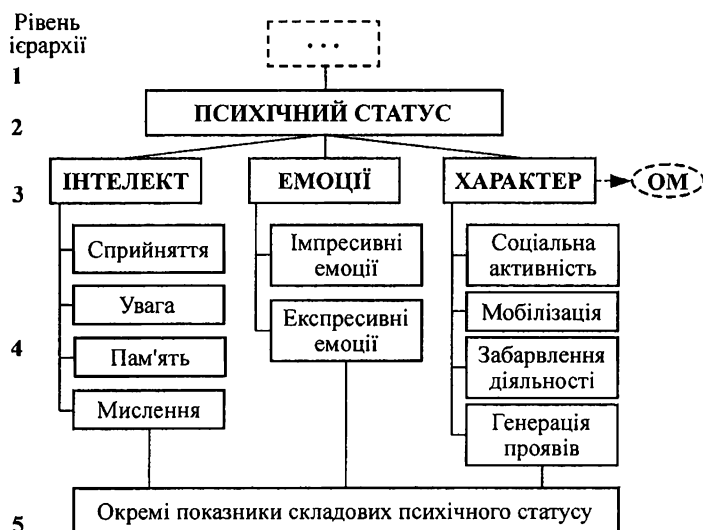


Рис. 2.30. Інформаційна структура психічного статусу здоров'я.
Рівні ієрархії: 1-й — інтегральне здоров'я; 2-й — статус психічного здоров'я; 3-й — компоненти психічного статусу; 4-й — складові компонент; 5-й — показники складових компонент психічного здоров'я

Серед складових компонент (4-й рівень) — інтелектуально-мнестична база інтелекту; емоції (імпресивні та експресивні); свідомо-вольові якості характеру особистості.

П'ятий рівень даної ієрархічної системи утворюють окремі показники складових, які отримують у ході спеціальних психологічних і психометричних досліджень. Розглянемо докладніше окремі компоненти, складові та показники психічного статусу здоров'я з урахуванням їх специфіки.

Інформаційна структура *інтелектуальної компоненти психічного статусу* представлена на рис. 2.31. Як складові до неї входять: сприйняття, увага, пам'ять та деякі особистісні властивості мислення. Інтелект можна розглядати як потенційні можливості мозку і рівень розумового розвитку людини. У такому трактуванні інтелект відображає відносно стійку структуру розумових здібностей особистості, пізнавально-раціональну сторону розумових процесів людини, тобто систему розумових операцій, пов'язаних із вирішенням завдань, проблемних ситуацій («стратегій»), ефективним індивідуальним підходом до ситуації, що потребує швидкої пізнавальної активності та відповідної дії, тощо. Кожна складова характеризується своїми показниками. При цьому інтелектуальна компонента психічного статусу містить норму структурно-функціонального базису інтелекту (параметричний гомеостаз), що виявляється у вирішенні ситуаційних завдань вербально-логічного і логіко-алгоритмічного характеру (функціональний гомеостаз).

Системною функцією інтелекту є статико-динамічний гомеостаз мозку як основа його потенційних здібностей. Діапазон норми інтелекту обмежений, мабуть, тільки нижньою межею. Щодо верхньої межі норми, то вона визначається таким рівнем, за якого високоінтелектуальний індивідум не втрачає (в силу своєї геніальності) нормального контакту з найближчим до нього соціальним середовищем.

Емоційна компонента психічного статусу представлена на рис. 2.32. Емоції з точки зору нейрофізіології — це активний стан системи спеціалізованих мозкових утворень, що спонукають суб'єкт змінити поведінку в напрямку максимізації (позитивні емоції) чи мінімізації (негативні емоції) цього стану. Емоційна компонента психічного статусу є системно-середовищною і виявляється при взаємодії із середовищем («моє відношення до мого середовища»). Емоції надають, так би мовити, «смак» кожному виду людської діяльності. Отже, *системна функція* емоційної компоненти — статико-динамічний гомеостаз рівня почуттєвого забарвлення поведінки.

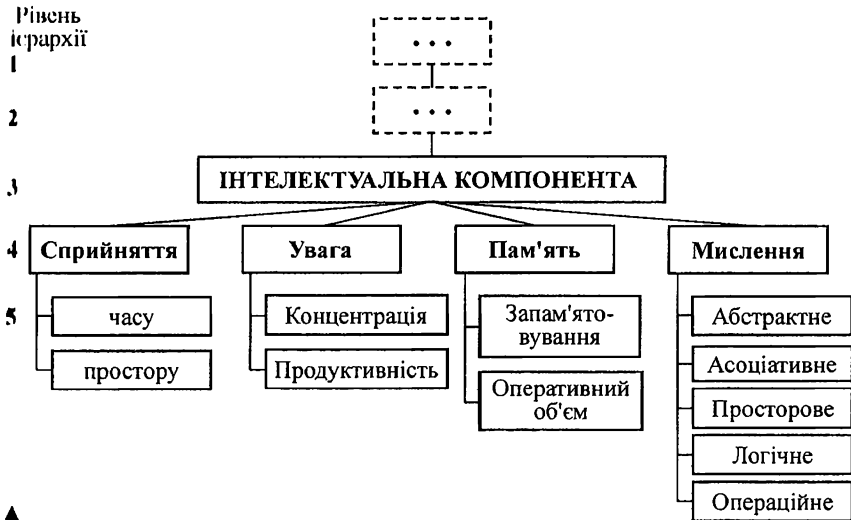


Рис. 2.31. Інформаційна структура інтелектуальної компоненти.

Рівні ієрархії: 1-й — інтегральне здоров'я; 2-й — статус психічного здоров'я; 3-й — компонента психічного статусу; 4-й — складові компоненти; 5-й — показники складових компонентів

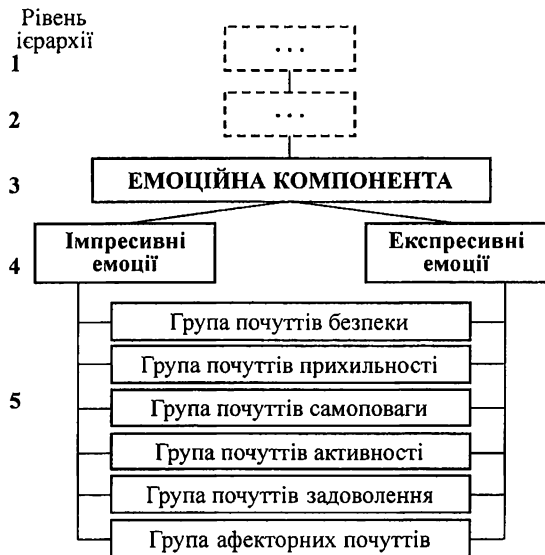


Рис. 2.32. Інформаційна структура емоційної компоненти.

Рівні ієрархії: 1-й — інтегральне здоров'я; 2-й — статус психічного здоров'я; 3-й — компонента психічного статусу; 4-й — складові компоненти; 5-й — показники складових компонентів

Зазвичай емоції розглядають як систему, що має три основних аспекти: 1) власне психічні переживання — внутрішній психічний аспект емоцій; 2) прояв емоцій у зовнішньому середовищі — зовнішній психічний аспект емоцій; 3) зміни функціонування

ня внутрішніх органів — фізіологічний аспект емоцій. Зупинимося на перших двох аспектах, які найбільше відповідають питанню, що розглядається.

В емоційну компоненту психічного статусу включено імпресивну та експресивну складові (рис. 2.32). Імпресивна складова поєднує характеристики внутрішньої психічної компоненти — це внутрішні переживання емоцій. Показники даної складової можна визначити опосередковано за самозвітами, описами емоційного стану, складеними респондентами. Експресивна складова включає в себе зовнішні прояви психічної компоненти (рухові та поведінкові акти, міміку, мову).

Показниками складових виступають шість груп почуттів: безпеки, прихильності, самоповаги, активації, задоволення, афекторні. Причому перші чотири групи викликаються потребами і приводять до дії, а останні дві є індикаторами ступеня досягнення мети.

Показники цих складових визначаються за результатами спостережень за поведінкою і жестами людей у ситуаціях, що викликають різні емоції; за результатами аналізу характеристик мови, тестуванням за спеціальними анкетами-опитувальниками. При цьому імпресивну й експресивну складові визначають як для кожної конкретної групи почуттів, так і сумарно для всієї компоненти.

Відомо, що вимірювання показників емоційної компоненти являє собою складне психологічне завдання, яке також не вирішене. Для визначення співвідношення імпресивної та експресивної складових запропоновано використовувати поняття емоційного дисбалансу як різницю між імпресивною та експресивною складовими.

Діагностичною характеристикою, що дає змогу оцінювати стан емоційної компоненти, є рівень загального емоційного дисбалансу. За ступенем відхилення від нуля величини емоційного дисбалансу можна робити висновок про погіршення емоційного стану людини. Емоційний дисбаланс відображає внутрішню здатність людини гармонізувати виникнення і вираження емоцій та почуттів. Це показник успішності емоційного гомеостазу. Можна проводити аналіз успішності емоційного гомеостазу за рівнем як емоційного дисбалансу кожної із шести груп почуттів, так і загального емоційного дисбалансу.

Характерологічна компонента психічного статусу являє собою організовану сукупність визначених якостей особистості, вироблених під впливом виховання і самовиховання, що обумовлюють особливості індивідуального стилю поведінки людини і відносини її до навколишньої дійсності (рис. 2.33). Характерологічна компо-

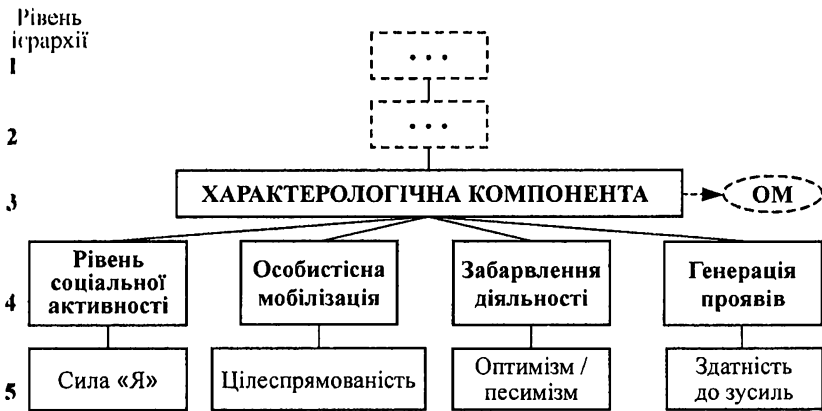


Рис. 2.33. Інформаційна структура характерологічної компоненти.

Рівні ієрархії: 1-й — інтегральне здоров'я; 2-й — статус психічного здоров'я; 3-й — компонента психічного статусу; 4-й — складові компоненти; 5-й — показники складових компонент

нента психічного статусу, як і емоційна, є системно-середовищною і виявляється при взаємодії із середовищем. Виходячи з цього, *системна функція* характерологічної компоненти являє собою статико-динамічний гомеостаз спрямованості поведінки.

В інформаційній структурі характерологічної компоненти виділені такі *складові*: рівень соціальної активності особистості, можливості особистої мобілізації, забарвлення діяльності, генерація особистих проявів, які біологічно, психологічно і соціально обумовлені.

Показниками складових виступають якості особистості, що, відповідно до літературних даних, емпіричного досвіду та модельних уявлень, є «ключовими» у структурі особистості та обумовлюють індивідуальні особливості тієї чи іншої соціальної діяльності людини як особистості. В інформаційну структуру характерологічної компоненти ми відібрали чотири «ключових» показники: *силу «Я»*, *оптимізм*, *здатність до зусиль*, *цілеспрямованість*. Розглянемо їх докладніше.

Сила «Я» — внутрішній честолюбний мотиватор самовиховання і самоорганізації, що виявляється в здатності й умінні володіти собою, бути холоднокрівним, зібраним у різноманітних ситуаціях, незалежно від їх складності чи небезпеки.

Оптимізм (антонім *песимізм*) — уміння з позитивним емоційним знаком без відчаю переживати невдачі.

Здатність до зусиль — уміння напружуватися, затратити значні фізичні, інтелектуальні та психічні сили для виконання будь-яких завдань.

Цілеспрямованість — здатність ставити особисті цілі, завдання і домагатися їх здійснення наполегливою, напруженою особистою працею.

Характерологічні якості разом із моральнісними якостями особистості (див. особистісно-моральнісну компоненту соціального статусу) формують індивідуальну тактику і стратегію поведінки, а в сумі відповідальні за соціальну спрямованість поведінки особистості.

Ієрархічна система оцінок стану психічного статусу здоров'я. Конструюючи ієрархічну систему оцінок стану психічного статусу здоров'я використовують інформаційну технологію, викладену в підрозділах 1.3.4 і 1.3.5. Вона включає: переведення натурних показників в інформаційні, побудову оцінок стану складових компонент і статусу в цілому. При цьому оцінка стану складових — це згортка відповідних інформаційних показників; оцінка стану компонент — згортка оцінок стану відповідних складових; оцінка статусу — згортка оцінок стану компонент.

Інтелектуальна компонента. Відповідно до інформаційної структури (див. рис. 2.31), вона має такі складові: *сприйняття, увагу, пам'ять і мислення*, кожна з яких характеризується своїми натурними показниками.

Уніфікація і нормування показників складової «сприйняття». Показниками цієї складової є сприйняття часу і сприйняття простору. Показник сприйняття часу оцінюється за здатністю сприймати й оцінювати інтервал часу. Він базується на порівнянні внутрішньої моделі еталону часу, сформованої в системі оцінки тимчасових характеристик навколишнього світу, із зовнішнім еталоном фізичного часу. За еталон часу був обраний інтервал в 1 хв.

Характеристики сприйняття простору досліджуються за допомогою методики відмірювання відрізка горизонтальної прямої лінії заданої довжини і порівняння його величини з фізичним еталоном довжини. Довжина відрізка дорівнювала 10 см. Переведення цих показників у відносну форму проводиться за формулами (1.3.11) і (1.3.12), для чого треба знати межі норми і весь діапазон зміни. Загальний діапазон визначався за результатами тестування як максимальні та мінімальні значення цих показників, що трапляються в інформаційних масивах. Так, для показника сприйняття часу X_4 межі норми лежать в інтервалі

55 ÷ 65 с; весь діапазон — 20 ÷ 100 с. Для показника сприйняття простору $X_{\text{пр}}$ межі норми становлять 9,5 ÷ 10,5 см; загальний діапазон — 5 ÷ 15 см. Слід зазначити, що якщо в результаті тестування цих показників значення їх вийдуть за межі загального діапазону, то відносні значення цих показників можуть бути прийнятими рівними одиниці.

Формула розрахунків відносної оцінки сприйняття часу має вигляд:

$$X_{\text{відн}}^{\text{ч}} = \begin{cases} \frac{X_i^{\text{ч}} - 65}{35}, & \text{якщо } 100 \geq X_i^{\text{ч}} > 65; \\ \frac{55 - X_i^{\text{ч}}}{35}, & \text{якщо } 20 \leq X_i^{\text{ч}} < 55; \\ 1, & \text{якщо } 20 > X_i^{\text{ч}} > 100; \\ 0, & \text{якщо } 65 > X_i^{\text{ч}} \geq 55, \end{cases} \quad (2.5.15)$$

де $X_i^{\text{ч}}$ — значення «індивідуальної хвилини» i -ї особи.

Відносна оцінка сприйняття простору визначалася в такий спосіб:

$$X_{\text{відн}}^{\text{пр}} = \begin{cases} \frac{X_i^{\text{пр}} - 10,5}{4,5}, & \text{якщо } 10,5 < X_i^{\text{пр}} \leq 15; \\ \frac{55 - X_i^{\text{пр}}}{35}, & \text{якщо } 5 \leq X_i^{\text{пр}} < 9,5; \\ 1, & \text{якщо } 15 < X_i^{\text{пр}} < 5; \\ 0, & \text{якщо } 9,5 \geq X_i^{\text{пр}} \geq 10,5, \end{cases} \quad (2.5.16)$$

де $X_i^{\text{пр}}$ — величина відрізка, виміряного i -ю особою.

Оцінка стану складової «сприйняття» обчислюється за формулою (1.3.22) з рівними ваговими коефіцієнтами, вважаючи характеристики сприйняття часу і простору рівнозначними за їх внеском

$$\delta_{\text{сп}} = 0,5X_i^{\text{ч}} + 0,5X_i^{\text{пр}}. \quad (2.5.17)$$

Уніфікація і нормування показників складової «увага». Як відомо, одним з найбільш простих та інформативних тестів, які дають можливість оцінити функцію уваги, є «коректурна проба». (Обсяг уваги, що характеризує складову «увага», можна розрахувати (за концентрацією та продуктивністю) після виконання тесту, володіючи такими параметрами, як правильна кількість помі-

чених літер, наприклад «к» та «н», кількість помічених інших літер ($\dot{I}_N$).

Обсяг уваги ($X_{ув}$) визначається за формулою

$$X_{ув} = \frac{K + N - \dot{I}_N}{\sum_{KN}} \cdot 100 \%, \quad (2.5.18)$$

де K , N — кількість правильно помічених літер «к» і «н»; $\dot{I}_N$ — кількість неправильно помічених інших літер; $\sum_{KN}$ — сума літер «к» і «н» у коректурній пробі.

Інформативний показник $X_{ув}$ виражений у відсотках. Його уніфікація і нормування проводиться за формулою (1.3.12), відповідно до якої необхідно знати нижню межу норми і мінімальне значення загального діапазону. Аналіз масиву даних тестування дав змогу вибрати нижню межу норми — 99 %, а мінімальне значення загального діапазону — 50 %. Зрозуміло, що верхня межа норми і максимальне значення загального діапазону збігаються і становлять 100 %.

Таким чином, показник уваги визначається за формулою

$$X_{відн}^{ув} = \begin{cases} \frac{X_i^{ув} - 99}{49}, & \text{якщо } 50 \leq X_i^{ув} \leq 99; \\ 0, & \text{якщо } X_i^{ув} \geq 99; \\ 1, & \text{якщо } X_i^{ув} < 50, \end{cases} \quad (2.5.19)$$

де $X_i^{ув}$ — обсяг уваги i -ї особи.

У цій формулі враховано той факт, що за обсягу уваги, який виходить за рівень нижньої межі загального діапазону, значення інформаційного показника $X_{відн}$ приймається рівним одиниці.

Оцінка стану складової «увага». Оскільки увага характеризується одним інформативним показником — обсягом уваги, то оцінка стану складової «увага» визначається значенням $X_{відн}^{ув}$:

$$\delta_{ув} = X_{відн}^{ув}. \quad (2.5.20)$$

Уніфікація і нормування показників складової «пам'ять». Оцінка характеристик пам'яті визначається за результатами виконання тестового завдання із запам'ятовування та відтворення числової інформації. Оцінка обсягу короточасної пам'яті розраховується як відношення (у відсотках) відтвореної інформації до всієї інформації, запропонованої в тесті.

Аналіз результатів досліджень показав, що 50%-й рівень запам'ятовування і відтворення можна вважати нижньою межею норми цього показника. Мінімальне значення загального діапазону для цього показника задавалося рівним 0. У цьому випадку, як і в попередньому, верхнє значення норми і загального діапазону дорівнюють 100 %. Тоді відповідно до формули (1.3.13)

$$X_{\text{відн}}^{\text{пм}} = \begin{cases} \frac{50 - X_i^{\text{пм}}}{50}, & \text{якщо } X_i^{\text{пм}} < 50; \\ 0, & \text{якщо } X_i^{\text{пм}} \geq 50, \end{cases} \quad (2.5.21)$$

де $X_i^{\text{пм}}$ — кількість чисел, які було правильно запам'ятовано і відтворено, співвіднесена до кількості заданих чисел (у %) i -ю особою.

Оцінка стану складової «пам'ять», як і оцінка стану складової «увага», збігається зі значенням інформаційного показника

$$\delta_{\text{пм}} = X_{\text{відн}}^{\text{пм}}. \quad (2.5.22)$$

Уніфікація і нормування показників складової «мислення». Ця складова характеризується такими показниками: абстрактне, асоціативне, логічне, операційне і просторове мислення.

Під час тестування людям пред'являли п'ять субтестів, які давали змогу визначити первинні («сирі») значення цих показників, а саме коефіцієнт успішності при виконанні кожного субтесту — відсоток правильних відповідей з десяти запропонованих завдань.

У даному випадку уніфікація і нормування проводиться, як і в попередньому випадку, за формулою (1.3.13). За результатами аналізу масиву експериментальних даних були визначені значення величин нижніх меж норми і загального діапазону для кожного показника з урахуванням складності тестового матеріалу та особливості виконання тесту. Так, для коефіцієнтів успішності, що характеризують абстрактний ($X^{\text{аб}}$) і асоціативний ($X^{\text{ас}}$) стилі мислення, нижня межа норми встановлювалася на рівні 70 %, а мінімальне значення загального діапазону задавалося рівним нулю. Для коефіцієнтів успішності, що характеризують логічне ($X^{\text{л}}$) та операційне ($X^{\text{оп}}$) мислення, нижня межа норми становила 80 %, а загального діапазону — 0 %. Для коефіцієнта успішності, що характеризує просторове мислення ($X^{\text{пр}}$), нижня межа норми 66,7 %, а загального діапазону — 0 %.

Тоді відповідно до формули (1.3.13) інформаційні показники складової «мислення» такі:

$$\begin{aligned} X_{\text{відн}}^{\text{аб}} &= \begin{cases} \frac{70 - X_i^{\text{аб}}}{70}, & \text{якщо } X_i^{\text{аб}} < 70; \\ 0, & \text{якщо } X_i^{\text{аб}} \geq 70; \end{cases} \\ X_{\text{відн}}^{\text{ас}} &= \begin{cases} \frac{70 - X_i^{\text{ас}}}{70}, & \text{якщо } X_i^{\text{ас}} < 70; \\ 0, & \text{якщо } X_i^{\text{ас}} \geq 70; \end{cases} \\ X_{\text{відн}}^{\text{л}} &= \begin{cases} \frac{80 - X_i^{\text{л}}}{80}, & \text{якщо } X_i^{\text{л}} < 80; \\ 0, & \text{якщо } X_i^{\text{л}} \geq 80; \end{cases} \\ X_{\text{відн}}^{\text{оп}} &= \begin{cases} \frac{80 - X_i^{\text{оп}}}{80}, & \text{якщо } X_i^{\text{оп}} < 80; \\ 0, & \text{якщо } X_i^{\text{оп}} \geq 80; \end{cases} \\ X_{\text{відн}}^{\text{пс}} &= \begin{cases} \frac{66,7 - X_i^{\text{пс}}}{66,7}, & \text{якщо } X_i^{\text{пс}} < 66,7; \\ 0, & \text{якщо } X_i^{\text{пс}} \geq 66,7; \end{cases} \end{aligned} \quad (2.5.23)$$

де X_i у всіх формулах — коефіцієнт успішності виконання відповідного тесту i -ю особою.

Оцінки стану складової «мислення» визначається як лінійно-виважена сума всіх п'яти інформаційних показників:

$$\delta_{\text{м}} = 0,19X_{\text{відн}}^{\text{аб}} + 0,19X_{\text{відн}}^{\text{ас}} + 0,19X_{\text{відн}}^{\text{л}} + 0,19X_{\text{відн}}^{\text{оп}} + 0,24X_{\text{відн}}^{\text{пс}}. \quad (2.5.24)$$

Вагові коефіцієнти визначалися експертним шляхом залежно від складності субтесту.

Оцінка стану інтелектуальної компоненти визначається шляхом згортки оцінок стану складових, причому всі складові входять з рівними вагами:

$$\Delta_{\text{Ін}} = 0,25\delta_{\text{сп}} + 0,25\delta_{\text{ув}} + 0,25\delta_{\text{пм}} + 0,25\delta_{\text{м}}. \quad (2.5.25)$$

Уніфікація і нормування показників складових емоційної компоненти трохи відрізняються від процедури, яка використовувалася для інтелектуальної компоненти. На рівні показників усі почуття по відповідних шести групах оцінювалися балами, отриманими в результаті тестування. На рівні складових стан імпресивної та експресивної складових оцінювався як сума балів по відповідних шести групах почуттів.

Як уже зазначалося, *стан емоційної компоненти* оцінюється за ступенем емоційного дисбалансу (X^D), що визначається як різниця між сумарними значеннями імпресивної та експресивної складових. Величина X^D виражена в балах. Саме вона підлягає уніфікації і нормуванню. Для переведення X^D у відносну форму треба знати загальний діапазон зміни X^D і межі норми. Слід зазначити, що межі загального діапазону залежать від обсягу тесту-опитувальника і від ваги (кількості балів) відповіді на питання, причому $X_{\min}^D = -X_{\max}^D$. За межами норми вибираємо значення на рівні відхилення 10 % від меж загального діапазону.

Ідентифікація характеристик імпресивної та експресивної складових, проведена за розробленим тестом-опитувальником, показала, що величина X^D не виходила за межі ± 20 балів. Отже, за загальний діапазон зміни X^D можна взяти ± 20 балів, а за межі норми приймемо величину, що дорівнює ± 2 бали. Тоді оцінка стану емоційної компоненти визначається за формулою:

$$\Delta_{(E)} = X_i^D = \begin{cases} \frac{|X_i^D| - 2}{18}, & \text{якщо } 2 < X_i^D \leq 20; \\ 0, & \text{якщо } -2 \leq X_i^D \leq 2; \\ 1, & \text{якщо } |X_i^D| > 20, \end{cases} \quad (2.5.26)$$

де X_i^D — дисбаланс емоцій i -ї особи. У цій формулі передбачений випадок виходу за межі ± 20 .

Уніфікація і нормування показників складових характерологічної компоненти. Інформаційна структура характерологічної компоненти (рис. 2.34) має чотири складові, кожна з яких характеризується одним показником — визначеною якістю особистості.

Показники характерологічної складової визначалися за допомогою тесту, що дає змогу одержати кількісні бальні оцінки. Максимальне значення кожного показника дорівнювало 9 балам, мінімальне — 1 балу. Нижня межа норми була встановлена експертним шляхом рівною 7 балам. Переведення бальних оцінок у відносні проводиться за формулою

$$X_{\text{відн}}^j = \begin{cases} \frac{7 - X_i^j}{7}, & \text{якщо } 1 \leq X_i^j < 7; \\ 0, & \text{якщо } X_i^j \geq 7, \end{cases} \quad (2.5.27)$$

де X_i^j — величина в балах j -ї якості i -ї особи.

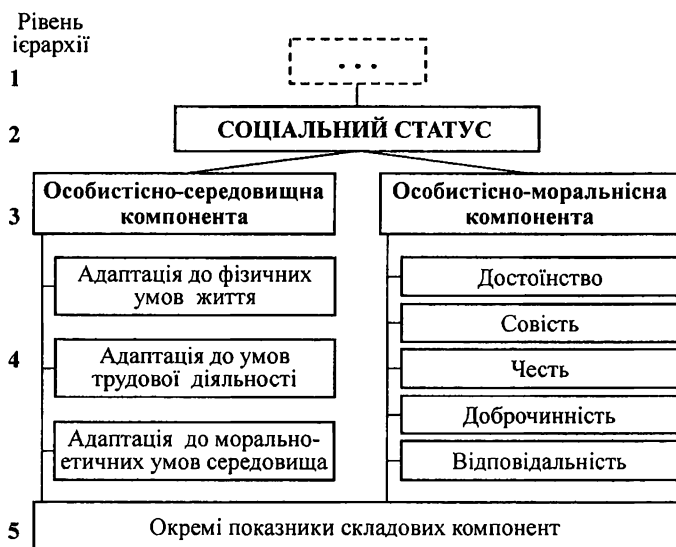


Рис. 2.34. Інформаційна структура соціального статусу здоров'я.

Рівні ієрархії: 1-й — індивідуальне інтегральне здоров'я; 2-й — статус соціального здоров'я; 3-й — компоненти соціального статусу; 4-й — складові компонент; 5-й — показники складових компонент

Оцінка стану характерологічної компоненти збігається зі значенням показників у відносній формі, оскільки кожна складова, як було зазначено, характеризується одним показником. Отже, оцінки стану складових:

- складової «рівень соціальної активності особистості»

$$\delta_{\text{са}} = X_{\text{відн}}^1,$$

де індекс «1» відповідає показнику «сила Я»;

- складової «мобілізація»

$$\delta_{\text{мо}} = X_{\text{відн}}^2,$$

де індекс «2» відповідає показнику «цілеспрямованість»;

- складової «забарвлення діяльності»

$$\delta_{\text{зд}} = X_{\text{відн}}^3,$$

де індекс «3» відповідає показнику «оптимізм/песимізм»;

- складової «генерація особистих проявів»

$$\delta_{\text{гп}} = X_{\text{відн}}^4,$$

де індекс «4» відповідає показнику «здатність до особистих зусиль».

Стан характерологічної компоненти за умови рівності ваг оцінювався як

$$\Delta_{(x)} = 0,25\delta_{ca} + 0,25\delta_{mo} + 0,25\delta_{zd} + 0,25\delta_{go}. \quad (2.5.28)$$

Оцінка стану психічного статусу здоров'я людини. На підставі оцінок стану інтелектуальної, емоційної і характерологічної компонент розраховується оцінка стану психічного статусу за формулою

$$\Delta_{(пз)} = \frac{1}{3} \Delta_{(I)} + \frac{1}{3} \Delta_{(E)} + \frac{1}{3} \Delta_{(x)}. \quad (2.5.29)$$

Виходячи з припущення, що кожна з трьох компонент — інтелектуальна, емоційна і характерологічна — вносить вклад у формування стану психічного статусу здоров'я людини, включено в загальну оцінку стану цього статусу узагальнені оцінки стану його компонент з рівними ваговими коефіцієнтами.

Вербальна характеристика стану психічного статусу і стану всіх рівнів структури дається за аналогією зі статусом фізичного здоров'я.

2.5.6. Інформаційно-структурна модель соціального статусу здоров'я

До проблеми соціального здоров'я. Здоровим у всіх відношеннях можна назвати такий організм, що має здатність активно адаптуватися до постійно змінних умов не тільки природного, а й соціального середовища, зберігаючи при цьому високу дієздатність. Це принципово відрізняє людину як істоту суспільну від будь-якого іншого представника тваринного світу.

Виділяють ряд реєстрів реагування психіки людини на соціальне екосередовище, які можна вважати критеріями соціального здоров'я. До них різні автори відносять:

- здатність адекватно змінювати стиль поведінки залежно від зміни життєвих ситуацій;
- здатність регулювати особисту поведінку відповідно до суспільних «шаблонів»;
- здатність планувати і здійснювати свій життєвий шлях;
- соціальну, насамперед моральнісну зрілість особистості;
- здатність «більше давати суспільству, ніж брати від нього» та ін.

Але все ускладнюється тим, що в оцінці соціального здоров'я практично відсутні пізнавальні межі поняття «норми», «міри здо-

ров'я». Діапазон «моральної норми» не є фіксованим і визначається ситуацією, однак його нижня межа, що визначає ступінь аморальності, може бути зафіксована для конкретних ситуацій, в тому числі й спрощено тестових. Для цієї компоненти верхньої межі діапазону норми, очевидно, немає.

Подальша наукова дефініція поняття «здоров'я» потребує детальнішої розробки *соціального статусу* здоров'я, який знаходиться в стадії становлення, в основному в зв'язку з тим, що його компоненти і складові не можуть бути так об'єктивно виміряні й встановлені, як складові фізичного і навіть психічного статусів на підставі ряду комплексних антропометричних, фізіологічних, біохімічних, психометричних та інших показників.

Соціальне здоров'я як статус — стан вищих відділів мозку, структура інформаційних моделей яких забезпечує нормальні (адекватні для даного суспільства) морально-етичні прояви особистості.

Під *моральністю* будемо розуміти сукупність принципів поведінки особистості, які регулюють її ставлення до суспільства, родини, інших людей і підтримуються особистими переконаннями, традицією, вихованням, наявністю в структурі особистості визначених моральнісних якостей.

При цьому під *параметричним* гомеостазом норми соціального здоров'я розуміємо наявність шаблонів поведінки (інформаційних моделей), прийнятих у даному соціумі. *Функціональний* гомеостаз — це вміння користуватися цими шаблонами та їх комбінацією в соціальному оточенні, що змінюється.

Системна функція соціального здоров'я — це системно-середовищний інформаційний гомеостаз, здатність особистості адаптуватися до навколишнього, динамічно мінливого інформаційного середовища.

Інформаційна структура соціального статусу здоров'я побудована за таким самим ієрархічним принципом, як фізичний і психічний статуси, тобто як п'ятирівнева система. Соціальна сторона здоров'я входить складовою частиною в загальне інтегральне здоров'я (1-й рівень) як соціальний статус (2-й рівень).

Компоненти соціального статусу. Соціальний статус складається з двох компонент (3-й рівень): *особистісно-середовищної та особистісно-моральної*, кожна з яких має власні структуру і функцію (рис. 2.34).

Складові компоненти. Виділені такі *складові особистісно-середовищної компоненти* соціального статусу здоров'я: адаптація до фізичних умов життя; адаптація до умов трудової діяльності; адаптація до морально-етичних умов середовища (рис. 2.34).

Як складові особистісно-моральні компоненти соціального статусу, що визначають особисту соціальну адаптацію індивідууму до соціуму, виділені такі «ключові» морально-етичні якості соціально зрілої особистості: *достойнство, совість, честь, доброчинність і відповідальність* (рис. 2.34).

Дамо їм «робочі» визначення, оскільки для деяких із них (наприклад совісті) немає загальноприйнятого визначення, і позначимо інформаційне поле, в якому ця категорія «працює».

Людське достоїнство — усвідомлення людиною цінності власних йому моральних якостей, свого суспільного значення і незалежне відстоювання своїх моральних принципів; наявність почуття внутрішньої моральної міри.

Совість — моральний самоконтроль, самооцінка і самовизначення людини. Це оцінка своїх думок, почуттів і вчинків згідно з діючими в суспільстві моральними нормами і власною моральною волею; усвідомлення моральної відповідальності людини за свою поведінку.

Чість — сукупність бездоганних якостей, що відображають ціннісний характер дій людини відповідно до істини; внутрішнє достоїнство людини; стійкість щодо спокус, сторонність корисливим інтересам.

Доброчинність — альтруїстична готовність безкорисливо сприяти іншим людям; співчутливий інтерес до інших і активна допомога їм; бажання добра іншій людині.

Відповідальність — особистий обов'язок людини відповідати за свої справи і вчинки, належна налаштованість на сумлінне виконання дорученої справи, взятих на себе зобов'язань; вірність у справах і відносинах.

Моральнісне здоров'я зрілої в соціальному відношенні особистості, на нашу і більшості авторів думку, визначають саме ці її моральні якості. Вони забезпечують конкретному індивідууму відчуття внутрішньої волі («згоди із собою»), не формують хворобливих комплексів, забезпечують високий рівень душевного комфорту, підтримують соціальне здоров'я, обумовлюють високу суспільно-корисну активність особистості («згода з іншими»).

Усі компоненти соціального статусу здоров'я є переважно системно-середовищними і виявляються в стилі поведінки особистості, її вчинках у конкретних ситуаціях, що є аналогом рівня духовного розвитку особистості людини.

Показники складових компонент. Показниками складової «адаптація до фізичних умов життя» є: претензії на рівень комфортності (ПК), мобільність як здатність до змін соціального статусу (М), фізичні можливості адаптації до мінливих умов оточення (ФМ) (рис. 2.35).



Рис. 2.35. Інформаційна структура особистісно-середовищної компоненти.

Рівні ієрархії: 1-й — індивідуальне здоров'я; 2-й — статус соціального здоров'я; 3-й — компонента соціального статусу; 4-й — складові компоненти; 5-й — показники складових компонентів

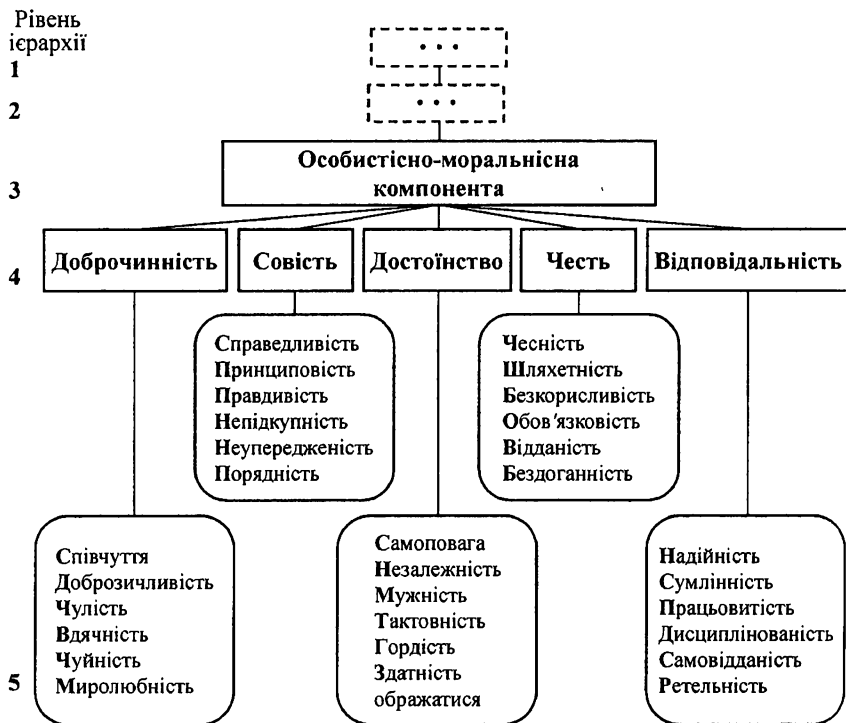


Рис. 2.36. Інформаційна структура особистісно-моральнісної компоненти

Показниками складової «адаптація до умов трудової діяльності» є: адаптація до професійних вимог (АП), адаптація до інтелектуального професійного оточення (АІ), здатність переборювати психологічні бар'єри (ЗП) (рис. 2.35).

Показниками складової «адаптація до морально-етичних умов життя» можуть бути: психологічна сумісність із сімейним оточенням (ПС), комунікативність (К), міжособистісні взаємини (МВ) (рис. 2.35).

Показники складової *особистісно-моральнісної компоненти соціального статусу* є складними за своєю іманентною сутністю й об'єднують спектр або групу близьких до них моральних якостей особистості (рис. 2.36).

Так, інформаційне поле показників складової «достоїнство» може визначатися, як мінімум, шістьма якими. Дамо їм ви-ищення і наведемо в порядку ранжування за даними експертних оцінок.

Самоповага — повага людини до самої себе, ставлення до себе як до особистості.

Незалежність — самостійність, прагнення не підкорятися кому-небудь і не підлежати від чого-небудь, воля вибору.

Мужність — хоробрість, цілковите самовладання в небезпечній ситуації.

Тактовність — уміння поводитися пристойно, належним чином, завдяки шштивому почуттю міри, тобто такту.

Гордість — почуття власного достоїнства, об'єктивне усвідомлення цінності своєї особистості.

Датність ображатися — здатність внутрішньо переживати, болісно реагувати на справедливе зауваження чи об'єктивну оцінку інших людей.

Показники складової «совість» можуть визначатися такими якими, як:

Справедливість — розважлива здатність до ухвалення рівноцінного рішення.

Принциповість — постійне і неухильне дотримання своїх принципів.

Правдивість — властивість говорити правду, прагнення до правди.

Непідкупність — неможливість підкупити чим-небудь, чесність.

Неупередженість — відсутність упередження й упередженості при оцінках лів і чинків інших.

Порядиість — нездатність до низьких, аморальних, антигромадських вчин-нів, чесність.

Показники складової «*честь*» можуть визначатися такими якостями, як:

Чесність — здатність дотримуватися правди, бажання будувати відносини з іншими на основі відкритості та довіри.

Шляхетність — висока моральність, поєднана із самовідданою чесністю і відкритістю.

Безкорисливість — сторонність корисливим інтересам, неприхильність до результатів праці.

Обов'язковість — постійне дотримування і виконання своїх обов'язків і обіцянок.

Відданість — відчуття любові, поваги, вірності до кого-небудь (чого-небудь).

Бездоганність — незаплямованість чим-небудь, зразковість у всьому.

Показники складової «*добročинність*» можуть визначатися такими якостями, як:

Співчуття — жалісливе, співчутливе ставлення до інших живих істот, людей, інтерес до їх долі й активна допомога.

Доброзичливість — щира дружелюбність, прихильність до інших людей.

Чуйність — здатність співпереживати іншим.

Вдячність — подяка за увагу, допомогу, послуги, зроблені іншою людиною.

Чуйність — сприяння всьому позитивному, що корисно іншій людині.

Миролюбність — гуманістична спрямованість, людяність у суспільних відносинах, діяльності.

Показники складової «*відповідальність*» визначаються таким спектром якостей:

Надійність — відчуття довіри, вірність у справах і відносинах.

Сумлінність — уміння відповідати за свої справи, виконання дорученої справи з високою якістю, виконання роботи «на совість».

Працьовитість — любов до праці, бажання займатися доцільною чи суспільно корисною діяльністю, що потребує розумової та фізичної напруги.

Дисциплінованість — звичка до підпорядкування встановленому порядку, заведеним правилам.

Самовідданість — відмовлення від особистих інтересів для блага інших.

Ретельність — звичка виконувати доручену справу, доводити її до кінця.

Особливість розглянутих компонент і їх складових у тому, що вони мають складну, подвійну психосоціальну природу, оскільки є одночасно і моральнісними якостями особистості, і психологічними почуттями. Добір показників складових соціального статусу і їх діагностика — одне з найбільш складних і дискусійних питань усієї інформаційної структури здоров'я.

Ієрархічна система оцінок стану соціального статусу здоров'я. Ієрархічна система оцінок стану цього статусу базується на методичці інфотомування, однак певним чином відрізняється від алгоритму побудови оцінок стану фізичного і психічного статусів. Крім того, існують розходження в алгоритмі одержання оцінок для особистісно-середовищної та особистісно-моральнісної компоненти соціального статусу, які враховують специфіку цих компонент.

Діагностика показників складових особистісно-середовищної компоненти соціального статусу. Оцінка особистісно-середовищної компоненти соціального статусу відображає різні аспекти внутрішнього і зовнішнього реагування людини на соціальне оточення. Вона містить три параметри:

1. Ступінь комфортності в соціумі.
2. Рівень психічної напруги.
3. Тип адаптації в соціумі.

Ступінь комфортності в соціумі відображає рівень адаптованості людини до її соціального оточення.

Рівень психічної напруги свідчить про ступінь дискомфорту, тобто відображає суб'єктивне сприйняття людиною її життєвої ситуації.

Тип адаптації в соціумі дає уявлення про характер поведінки людини в тій чи іншій ситуації, стилі вирішення своїх проблем.

Базуючись на таких передумовах, була розроблена анкетуванняльний. Анкета містить три групи по 9 запитань (всього 27 питань); кожна група відповідає одному із трьох параметрів інтегральної оцінки особистісно-середовищної компоненти. В рамках однієї групи кожне з дев'яти запитань стосується відповідно одного із дев'яти показників складових особистісно-середовищної компоненти (рис. 2.35). Таким чином, дев'яти показникам складових особистісно-середовищної компоненти відповідає в даному опитувальнику по одному запитанню з кожної групи, тобто три запитання, причому одне запитання оцінює рівень комфортності, друге — рівень психологічної напруги, а третє — тип адаптації.

Обробка результатів анкетування проводиться з використанням спеціального «ключа», який дає можливість перейти від вер-

бальної відповіді на запитання («так», «ні») до бальної оцінки відповіді на нього (0 або 1 бал). Отримані в такий спосіб бальні оцінки вербальних показників, підраховані за всіма трьома складовими оцінки окремо, знаходяться в діапазоні від 0 до 9 балів. Саме ці узагальнені бальні оцінки підлягають уніфікації та нормуванню.

Для переведення узагальнених бальних оцінок у відносну форму використовується формула (1.3.13). При цьому треба визначити верхню і нижню границю норми. За верхню границю норми приймається максимально можливе значення оцінки складових (9 балів). Нижня границя норми у 7 балів була встановлена експертним шляхом.

Якщо бальне значення будь-якого показника лежить в інтервалах норми, тоді відносне його значення дорівнює нулю. Формула перерахунку абсолютних значень усіх трьох узагальнених бальних оцінок показників у відносні набуває такого вигляду:

$$X_{\text{відн}}^j = \begin{cases} \frac{7 - X_i^j}{7}, & \text{якщо } X_i^j < 7, \\ 0, & \text{якщо } X_i^j \geq 7, \end{cases} \quad (2.5.30)$$

де індекс j характеризує відповідний вербальний показник; X_i^j — узагальнене бальне значення j -го вербального показника для i -ї особи.

Відносні значення узагальнених вербальних показників змінюються від 0 до 1. Для вербальної характеристики відносних значень цих показників введені такі оцінювальні шкали.

Ступінь комфортності в соціумі:

високий — від 0 до 0,33;
середній — від 0,33 до 0,66;
низький — від 0,66 до 1.

Рівень психологічної напруги:

низький — від 0 до 0,33;
середній — від 0,33 до 0,66;
високий — від 0,66 до 1.

Тип адаптації:

активний — від 0 до 0,33;
помірний — від 0,33 до 0,66;
пасивний — від 0,66 до 1.

Оцінка стану особистісно-середовищної складової соціального статусу ($\Delta_{\text{сз}}^{\circ}$) розраховується як лінійно-виважена сума відносних узагальнених значень трьох вказаних вище вербальних показників,

вигляді з рівними вагами:

$$\Delta_{\text{сз}}^{\text{с}} = \frac{1}{3} (X'_{\text{відн}} + X''_{\text{відн}} + X'''_{\text{відн}}) \quad (2.5.31)$$

де $X'_{\text{відн}}, X''_{\text{відн}}, X'''_{\text{відн}}$ — відносні значення відповідно ступеня ком-
фортності в соціумі, рівня психологічної напруги, типу адаптації.

Діагностика показників особистісно-моральнісної компоненти соціального статусу проводиться також за допомогою спеціально розробленої анкети-опитувальника. Опитувальник містить 60 запитань, які умовно поділені на два рівні блоки (блок А і блок Б). Запитання блоку А сформульовані так, щоб виявити *емоційно-почуттєве ставлення* особи до кожної з 30 моральних якостей, які входять до складових особистісно-моральнісної компоненти соціального статусу (рис. 2.36), а запитання блоку Б спрямовані на виявлення у опитуваного *проявів* цих якостей в тих чи інших життєвих ситуаціях. Таким чином, оцінка особистісно-моральнісної компоненти соціального статусу складається з п'яти складових, відповідно по двох блоках (А та Б) анкети-опитувальника.

Хоча запитання анкети і розташовані в довільному порядку, при обробці анкети загальна сума балів підраховується завдяки розробленому «ключу» за відповіді по кожному її блоку окремо. Можливі два варіанти відповіді на запитання: «так» і «ні». Той чи інший варіант відповіді оцінюється певною кількістю балів (від 0 до 3 балів).

Узагальнені бальні оцінки переводять у відносну форму за формулою (1.3.13). Максимальна кількість балів, яку можна отримати при відповіді на запитання кожного блоку, становить 45 балів, що прийнято за верхню границю норми. Нижня границя норми 35 балів встановлена експертним шляхом. Таким чином, при переведенні абсолютних значень узагальнених бальних оцінок двох блоків у відносні використовується формула

$$X'_{\text{відн}} = \begin{cases} \frac{35 - X_i^j}{35}, & \text{якщо } X_i^j < 35; \\ 0, & \text{якщо } X_i^j \geq 35, \end{cases} \quad (2.5.32)$$

де індекс j характеризує бальний показник відповідного блоку анкети; X_i^j — узагальнене значення j -го бального показника для i -ї особи.

Оцінка стану особистісно-моральнісної складової соціального статусу $\Delta_{\text{сз}}^{\text{м}}$ має вигляд лінійно-виваженої суми двох узагальне-

них оцінок стану цієї частини здоров'я $X_{\text{відн}}^A$ і $X_{\text{відн}}^B$, одержаних після обробки відповідно двох блоків анкети — А та Б, яким задані однакові вагові коефіцієнти,

$$\Delta_{\text{сз}}^M = 0,5X_{\text{відн}}^A + 0,5X_{\text{відн}}^B. \quad (2.5.33)$$

Оцінка стану соціального статусу здоров'я $\Delta_{\text{сз}}$ має вигляд лінійно-виваженої суми двох узагальнених оцінок стану особистісно-середовищної компоненти соціального статусу $\Delta_{\text{сз}}^c$ і особистісно-моральнісної компоненти соціального статусу $\Delta_{\text{сз}}^M$, яка розраховувалась за формулою

$$\Delta_{\text{сз}} = 0,5\Delta_{\text{сз}}^c + 0,5\Delta_{\text{сз}}^M. \quad (2.5.34)$$

Виходячи з припущення, що кожна з двох компонент — особистісно-середовищна і особистісно-моральнісна вносить вклад у формування стану соціального статусу здоров'я людини, включаємо їх у загальну оцінку стану соціального статусу здоров'я з рівними ваговими коефіцієнтами.

Оцінка інтегрального здоров'я. Оцінка інтегрального стану здоров'я Δ_3 має вигляд лінійно-виваженої суми стану узагальнених оцінок трьох його статусів — фізичного ($\Delta_{\text{фз}}$), психічного ($\Delta_{\text{пз}}$) і соціального ($\Delta_{\text{сз}}$), яка розраховується за формулою

$$\Delta_3 = \frac{1}{3}(\Delta_{\text{фз}} + \Delta_{\text{пз}} + \Delta_{\text{сз}}). \quad (2.5.35)$$

Виходячи з припущення, що кожен з трьох статусів (фізичний, психічний, соціальний) вносить однаковий вклад у формування стану інтегрального здоров'я людини, включаємо в загальну оцінку стану інтегрального здоров'я узагальнені оцінки стану його статусів з рівними ваговими коефіцієнтами. Хоча цілком можливо, що серед фізичного і психічного статусів здоров'я оцінка соціального статусу, особливо його моральнісної компоненти, виявиться найзначущою, але це ще треба довести у ході майбутніх досліджень.

На закінчення зазначимо, що інформаційний простір розглянутих статусів здоров'я є цілісною системою, в якій реалізується системно-ієрархічний гомеостаз взаємодії фізичного, психічного і соціального статусів здоров'я на різних ієрархічних рівнях. Ця взаємодія може мати різну глибину чи різний ступінь аж до перекриття масивів елементів, коли окремі елементи є загальними для двох чи трьох статусів.

Слід зазначити, що необхідне подальше теоретичне осмислення з позицій нових інформаційних технологій проблеми здоров'я як системи, що розвивається. Треба переходити від вчення про здоров'я до його теорії, строго наукових уявлень. Для цього дослідження індивідуального здоров'я людини має базуватися, як мінімум, на двох принципах.

Принцип системної триєдності. Для уявлення про індивідуальне здоров'я людини треба досліджувати в рамках єдиного методичного підходу фізичну, психічну і соціальну сторони здоров'я.

Принцип ідентичності базисних механізмів. Базисними загальнобіологічними механізмами організму й особистості мають виступати фундаментальні поняття «норми» і «гомеостазу».

Контрольні запитання

1. Які існують функціональні моделі динаміки електричного потенціалу нервової клітини?
2. У чому сутність моделі Ходжкіна—Хакслі?
3. Як пов'язані між собою провідності до іонів калію і натрію?
4. У чому полягає експериментально-теоретичний метод виокремлення адаптивної складової реакції організму на повторну дію хімічних речовин?
5. Як можна розрахувати теоретичний кумулятивний ефект?
6. Дайте визначення поняттю «гомеостаз». Які види гомеостазу Ви знаєте? Дайте їх визначення.
7. Які основні органи беруть участь у регуляції та підтримці гомеостазу глюкози в організмі? Назвіть інсулінозалежні та інсулінонезалежні тканини.
8. Що таке компартментальне моделювання? Намалуйте схему 3-камерної моделі розподілу введеної ззовні речовини. Напишіть відповідні диференціальні рівняння.
9. Які типи математичних моделей системи регуляції глікемії Ви знаєте?
10. В яких випадках доцільно використовувати складні моделі (mathmod)?
11. Який тип моделей доцільно використовувати для синтезу оптимальних алгоритмів? Сформулюйте постановку завдання керування рівнем глікемії зі зворотним зв'язком методом аналітичного конструювання.

Частина 2. Моделювання як основа синтезу інформаційних технологій та систем

- 12.** *Які алгоритми доцільно використовувати у разі неможливості проведення регулярних вимірювань?*
 - 13.** *Коли доцільно використовувати адаптивні алгоритми керування фізіологічними процесами?*
 - 14.** *Які етапи евристичного моделювання Ви знаєте?*
 - 15.** *Які моделі «узагальненої» особистості були побудовані?*
 - 16.** *З чого складається інформаційне поле здоров'я?*
 - 17.** *В чому сутність інформаційно-структурної моделі здоров'я?*
 - 18.** *Як формується система оцінок при дослідженні здоров'я як триєдності фізичного, психічного та соціального?*
-

ЧАСТИНА 3

Теорія біотехнічних систем та її застосування

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СИНТЕЗУ БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

У цьому розділі розглянуто технологію синтезу біотехнічних систем, розкрито її специфіку, наведено ключові властивості БТС. Класифікацію біотехнічних систем подано за метою їх функціонування. Серед БТС діагностики розглянуто експертну систему як інформаційну технологію комп'ютерної постановки діагнозу і поліалгоритмічну експертну систему як своєрідний «комп'ютерний консиліум». Підкреслено, що метод становить основу синтезу БТС, проблемно-об'єктно орієнтований, підлеглий меті функціонування БТС і є її важливим системоутворювальним фактором. Розглянуто інформаційно-структурні моделі БТС діагностики як засоби усвідомлення тріади «дані — інформація — знання». Наведено новітню інформаційну технологію синтезу БТС діагностики легеневих патологій і на цьому прикладі простежено, як інформаційні технології виконують роль усвідомлення даних і одержання об'єктивної інформації про характер і особливості звуків дихання у вигляді «акустичних портретів» цих звуків.

3.1.1. Ключові властивості біотехнічних систем

Вирішуючи різні завдання дослідження, діагностики, прогнозування і керування (лікування і реабілітації), використовують технічні засоби, цілі комплекси технічних засобів, об'єднані в єдину систему, що включають і засоби обчислювальної техніки. Специфіка таких систем і їхня складність визначаються не лише новим об'єктом дослідження чи керування, що має якісно нову складність, а й складніс-

тю та специфічністю взаємодії людина — технічний засіб, включаючи комп'ютер, об'єкт дослідження, діагностики і/або керування. Такий клас систем прийнято називати біотехнічними системами.

Під *біотехнічною системою* розуміють комплексну систему, що включає в себе об'єкт дослідження, діагностики і/або керування (біосистеми різного рівня ієрархії в нормі і/чи патології); дослідника (лікаря) і технічну підсистему, у тому числі комп'ютер, об'єднані єдиним алгоритмом функціонування. Активною об'єднувальною ланкою в БТС є дослідник (лікар), який виконує функцію *усвідомлення тріади «дані — інформація — знання» як основної ідеї інформаційних технологій*. Усвідомлення тріади є необхідний етап одержання нового знання.

Зазначимо деякі важливі *ключові властивості БТС*:

- БТС як система формується кінцевою і/чи ситуаційною метою її функціонування, тобто мета функціонування БТС є її системоутворювальним фактором. До цього ми ще повернемося при розгляді класифікації БТС і синтезу БТС.

- Структура БТС залежить не тільки від мети, а й від методу, покладеного в основу її функціонування, причому метод завжди спирається на певні властивості об'єкта дослідження, діагностики і/чи керування і підлеглий кінцевій (підсумковій) меті.

- БТС у цілому сама має гомеостатичні властивості і реалізує гомеостазис відносно поставленої мети. Це винятково важлива властивість БТС, тому що до її складу завжди входить біооб'єкт (а всі живі системи підпорядковуються принципу гомеостазу), і БТС сама включається в біосистему, виконуючи в ній роль відсутньої ланки для забезпечення гомеостазу — речовинного, енергетичного й інформаційного, що забезпечує динамічну сталість параметрів внутрішньої сфери організму (параметричний гомеостаз), а також динамічно стійке функціонування фізіологічних систем та організму в цілому (функціональний і системно-ієрархічний гомеостаз). Саме поняття гомеостазу БТС визначається як цілісність, здатна підтримувати гомеостатичну єдність, тобто єдність і взаємозумовленість елементів і зв'язків між елементами системи.

Поняття «гомеостаз» є основною посилкою для визначення таких категорій, як самоорганізація, саморегуляція, самокерування, адаптація, стійкість та інші, перелік яких особливо необхідний при синтезі конкретних БТС керування. Детально поняття гомеостазу і його роль у синтезі БТС керування рухом буде розглянуто у розділі 3.2.

3.1.2. Класифікація біотехнічних систем

Як уже зазначалося, мета функціонування БТС є її системоутворювальним фактором. Тому логічно мету поставити в основу класифікації БТС. Класифікація за метою функціонування БТС представлена на рис. 3.1.

Перший клас БТС — *БТС діагностики*, призначення яких діагностувати функціональний стан органів і/чи систем організму. Це найчисленніший клас БТС — медико-технічних діагностичних систем: електрокардіографи, електроміографи, електроенцефалографи, рентгенівські апарати, ультразвукова діагностична апаратура тощо.

Особливу групу БТС діагностики становлять експертні та поліалгоритмічні експертні системи. Експертну систему (ЕС) можна розглядати як редуковану біотехнічну систему, в якій об'єкт дослідження (діагностики) представлено опосередковано через набір параметрів, що характеризують стан органів, фізіологічних систем і організму пацієнта в цілому, а як технічна підсистема виступає лише комп'ютер.

Експертні системи використовуються для визначення диференціації ступеня патологічного процесу і постановки діагнозу. Характерна риса систем — формалізація результатів індивідуальної і колективної експертизи, розробка на цій основі програм, що дають змогу автоматизувати процес класифікації і діагностики. Експертні системи стосовно лікаря відіграють роль порадирика.

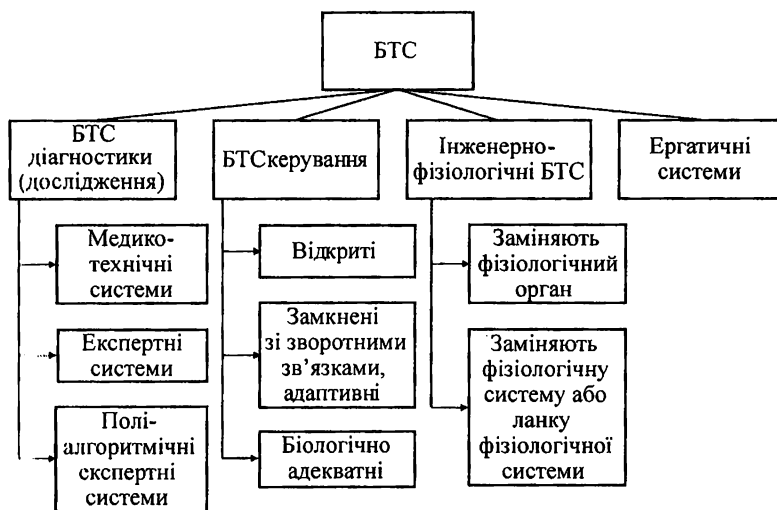


Рис. 3.1. Класифікація БТС за метою функціонування

Існує ряд стратегій розробки банків знань експертних систем медичного призначення:

- консультаційні експертні системи продукційного типу (засновані на використанні правил «якщо ... — то...»);
- Байєсовська стратегія — найперспективніша для розробки експертних систем медичного призначення, оскільки дає змогу моделювати «послідовний» спосіб мислення лікаря-діагноста, що відтворює «образ захворювання» крок за кроком у міру накопичення ознак.

Процес логічного висновку зводиться до порівняння наявних ознак захворювання з «еталонними» ознаками можливих захворювань, що зберігаються в пам'яті експертної системи, і наступним вибором найменування захворювання, яке найкраще відповідає набору наявних ознак.

У сучасних експертних системах діагностики можна виокремити два основних напрями комп'ютерного використання медичних знань. Перший з них пов'язаний зі спробою закласти в діагностичні програми формалізоване уявлення про правила постановки діагнозу. Такі програми складають за участю провідних фахівців у відповідних галузях медицини і звичайно ставлять за мету реалізацію на ЕОМ встановлення діагнозу. Другий напрям пов'язаний з використанням статистичних методів і так званих програм, що навчаються. Суть навчання в даному випадку полягає в обробці та аналізі масиву історії хвороби із зазначеним діагнозом і розроблянні на цій основі алгоритму, що дає можливість поставити діагноз у кожному конкретному випадку. Вирішальні правила використовуються в подальшому для встановлення діагнозу й у випадках, які не розглядалися, для навчання. Навчальна програма в процесі вироблення вирішального правила часто дає змогу оцінити діагностичну значимість різних симптомів, що сприяє істотному скороченню кількості необхідних даних про хворого.

Водночас експертна система як інформаційна технологія комп'ютерної постановки діагнозу не завжди задовольняє лікаря-користувача. Програмне забезпечення експертної системи відбиває алгоритм кінцевого результату консиліуму лікарів. Процес одержання цього результату — логічний висновок, тобто алгоритми постановки діагнозів кожним лікарем, який бере участь у консиліумі, залишаються за кадром і не враховують гнучкості мислення кожного лікаря.

Ця прогалина може бути заповнена з переходом до поліалгоритмічних експертних систем як нового класу інтелектуальних

експертних систем, покликаних моделювати складний процес мислення лікаря, що залежить від його типу інтелекту.

Розробка поліалгоритмічних експертних систем пов'язана, по-перше, з розробкою технології комп'ютерної класифікації типів інтелекту і, по-друге, з розробкою методів і способів інформаційних технологій, що дають змогу розкрити тип інтелекту. Вирішивши це непросте завдання, одержимо розмаїтість алгоритмів мислення лікаря залежно від типів інтелекту при розв'язанні конкретної медичної задачі і зможемо закласти цю розмаїтість у банк розв'язаних задач банку знань поліалгоритмічних експертних систем. Таким чином, поліалгоритмічні експертні системи зможуть виконувати роль своєрідного «комп'ютерного консильюму».

Медико-технічні системи діагностики дають можливість здійснювати автоматизований скринінг і моніторинг за фіксованими програмами переробки інформації, але з активнішою, ніж в експертних системах, участю людини. Як приклад у розділі 3.1.4 буде розглянуто сучасну БТС діагностики легеневих патологій.

Наступний клас — це *БТС керування*. Вони здійснюють керування функціональним станом органів і фізіологічних систем або шкідливим станом організму пацієнта, його фізичним і/чи психічним здоров'ям. У розділі 3.2 на прикладі БТС керування рухами людини буде розглянуто сучасні БТС, призначені для відновлення рухових функцій, порушених через тяжкі захворювання центральної і периферичної нервової системи (наслідки інсульту, дитячого церебрального паралічу, травм та ін.) і показано еволюцію їх синтезу від відкритих систем (без зворотних зв'язків) до замкнених, адаптивних та біологічно адекватних, цілеспрямованих.

Особливу групу БТС становлять так звані *інженерно-фізіологічні системи*, покликані підтримувати внутрішній гомеостаз органів, фізіологічних систем організму чи ланки фізіологічної системи, які вони замінюють. Ці системи являють собою технічні пристрої, здатні тривалий час функціонувати в структурі живого організму без втручання людини. За спрямованістю їх можна поділити на такі, що замінюють фізіологічний орган як об'єкт керування, і такі, що замінюють фізіологічну систему керування (чи порушену в ній ланку) як пристрій керування. Часто густо в одній інженерно-фізіологічній системі поєднуються обидві ці функції.

До БТС, які використовуються у техносфері, належать *ергати́чні системи*. Вони необхідні для дослідження алгоритмічних особностей людини, її місця в ієрархічній системі керування і

вирішення завдань розподілу функцій між людиною-оператором і системами керування в техносфері.

Слід зазначити, що функціонування БТС спрямоване на виявлення ослаблених, патологічних і/чи відсутніх ланок у ланцюзі структурно-функціональної організації гомеостазу тієї чи іншої функціональної системи (БТС діагностики, дослідження) або підтримку формування гомеостазу в умовах ослаблених, патологічних чи відсутніх ланок (БТС керування).

3.1.3. Метод як основа синтезу біотехнічних систем

Метод завжди проблемно орієнтований і підлеглий меті. Як приклад розглянемо основні методи, які використовують при синтезі БТС діагностики.

Методи реєстрації та аналізу електричних процесів, що супроводжують роботу органів і систем:

- ЕКГ — електрокардіограма, що відбиває роботу і характеризує функціональний стан серця (як органа) і серцево-судинної системи в цілому. ЕКГ — головний показник для експрес-контролю загального стану здоров'я пацієнта. БТС реєстрації та аналізу ЕКГ-сигналу використовують різні методи обробки електрофізіологічної інформації. У Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій і систем НАН України і Міністерства освіти і науки України під керівництвом д-ра техн. наук Л.С. Файнзільбера розроблено БТС «Фазаграф». Це нова комп'ютерна технологія оцінки функціонального стану серцево-судинної системи операторів, які працюють у стресових ситуаціях. Система реалізує новий метод аналізу та інтерпретації електрокардіограми у фазовому просторі координат.

- ЕЕГ — електроенцефалограма (ритми роботи мозку), яку використовують для діагностики психофізіологічних станів мозку.

- ЕМГ — електроміограма, що характеризує роботу і функціональний стан м'язів.

- ЕПД — електропунктурна діагностика, яка набула значного поширення. Хоча цей метод прийнято відносити до нетрадиційної медицини, насправді він займає граничне положення, поєднуючи в собі елементи нетрадиційних понять про функції організму (система меридіанів і біологічно активних точок — БАТ) і традиційних методів тестування стану біологічних об'єктів (вимірювання електричних параметрів БАТ).

Метод реєстрації механічної активності шлунково-кишкового тракту: моторної діяльності стравоходу, шлунка, дванадця-

типалюї кишки. Метод ґрунтується на балоннографічній реєстрації: сприйнятті м'язових скорочень досліджуваного органа за допомогою наповнення повітрям балончиків. Як приклад можна навести програмно-апаратний комплекс аналізу моторної активності внутрішньопорожнинних органів «Ягуар». Обробка результатів дослідження цієї БТС відбувається в автоматичному режимі. БТС «Ягуар» дає змогу вірогідно оцінювати порушення моторики і вчасно виявляти симптоми, характерні для післяопераційних порушень моторної функції шлунково-кишкового тракту.

Методи візуалізації патологічних станів: рентгено- та ультразвукова діагностика різних органів, електронна аускультация органів дихання.

Чому «метод» є настільки важливим системоутворювальним фактором БТС? Саме він забезпечує виконання вимог, які ставляться до БТС:

- об'єктивність (діагностики);
- неінвазивність (контроль, що не руйнує) діагностики і керування;
- безпека та екологічність;
- швидкість (обстеження);
- вартість.

По суті, об'єктивність, неінвазивність, безпека та екологічність — це критерії, що забезпечують виконання головного принципу функціонування БТС, — реалізувати гомеостазис щодо поставленої мети.

3.1.4. Біотехнічна система як засіб одержання нового знання

Розглянемо детальніше БТС як засіб одержання нового знання. На рис. 3.2 представлена інформаційно-структурна модель БТС діагностики, активною об'єднуювальною ланкою якої є лікар, котрий виконує роль усвідомлення тріади «дані — інформація — знання». Роль лікаря у такій БТС зводиться до:

- одержання суб'єктивної інформації про об'єкт дослідження в результаті усвідомлення даних (первинного інформаційного мислення) на основі індивідуальних особливостей сприйняття лікарем цих даних;
- одержання знань (постановка діагнозу) в результаті усвідомлення лікарем суб'єктивної інформації на підставі лікарського досвіду.

На рис. 3.3 і 3.4 представлено інформаційно-структурні моделі сучасних БТС діагностики, де роль «усвідомлення даних» і

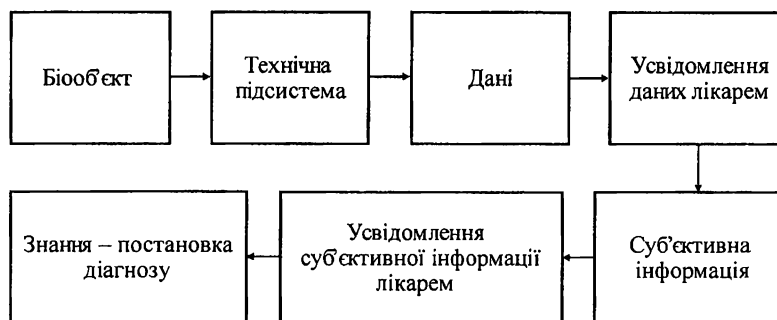


Рис. 3.2. Інформаційно-структурна модель БТС діагностики.
Об'єднувальна ланка БТС — лікар



Рис. 3.3. Інформаційно-структурна модель БТС діагностики з комп'ютерним усвідомленням даних.
Об'єднувальні ланки БТС: комп'ютер, що виконує роль усвідомлення даних, і лікар — усвідомлення інформації

«усвідомлення інформації» виконує не тільки лікар, а й технічна підсистема, включаючи комп'ютер. Відповідно до інформаційно-структурної моделі БТС (рис. 3.3) роль лікаря полягає в усвідомленні інформації, а одержання цієї інформації — «усвідомлення даних» виконує комп'ютер, точніше банк методів банку знань БТС. Під банком методів будемо розуміти алгоритми стандартизації, класифікації, уніфікації, первинної статистичної обробки первинних інформаційних масивів. Така структура БТС припускає постановку діагнозу лікарем на підставі його лікарського досвіду.

У БТС, банк знань яких містить не тільки банк методів для усвідомлення даних, а й медично верифікований банк вирішених завдань, усвідомлення інформації проводиться паралельно і лікарем, і комп'ютером. І комп'ютер, і лікар ставлять діагноз (рис. 3.4). Ос-

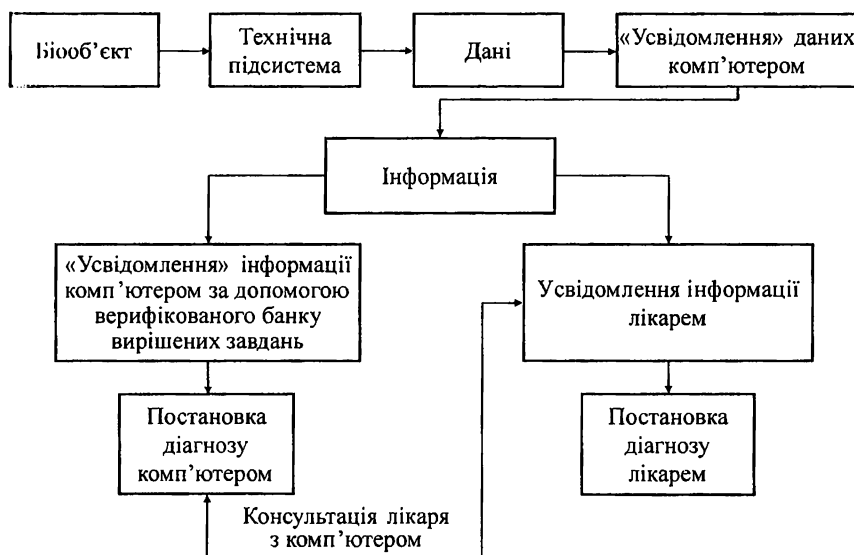


Рис. 3.4. Інформаційно-структурна модель «інтелектуальної» БТС

тигочний діагноз ухвалює лікар. Такі БТС виступають як підтримка ухвалення рішення лікарем і можуть бути названі інтелектуальними.

Розглянемо функціонування однієї з БТС діагностики — БТС *діагностики легеневих патологій* за допомогою комп'ютерної реєстрації звуків дихання і на цьому прикладі простежимо, як інформаційні технології, реалізовані в такій БТС, виконують роль усвідомлення тріади «дані — інформація — знання».

До методів візуалізації патологічних станів дихання належать методи, що активно розробляються в даний час, реєстрації, аналізу і документування звуків дихання, що виникають у респіраторному тракті людини. Міжнародна організація International Lung Sound Association (ILSA) поєднує дослідників у цьому напрямі¹.

Відомо, що найдавнішим методом прослуховування звуків дихання є аускультация. Це один із найважливіших неінвазивних, безпечних і екологічних методів діагностики захворювань органів дихання за допомогою стетофонендоскопа. Постанова діагнозу

¹ В Україні роботи зі створення комп'ютерних систем діагностики легеневих патологій ведуться в Інституті гідромеханіки НАН України під керівництвом академіка НАН України В.Т. Грінченка.

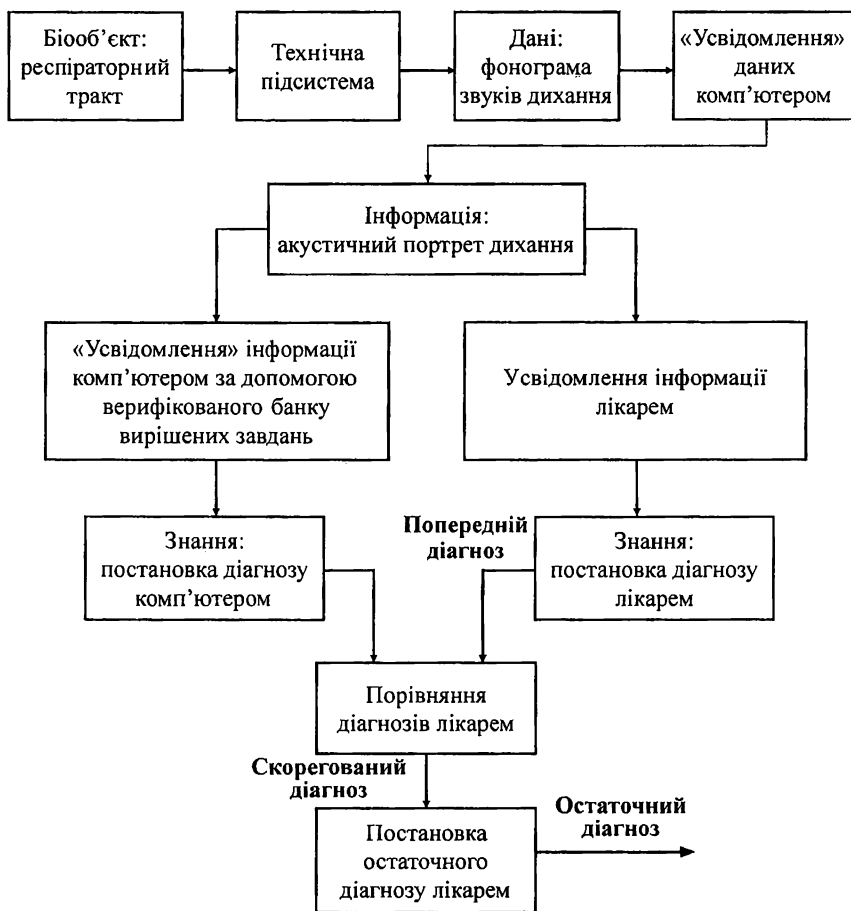


Рис. 3.5. Структурно-функціональна модель БТС діагностики легневих патологій

лікарем за допомогою стетофонендоскопа являє собою найпростішу БТС, до складу якої входять:

- біооб'єкт — респіраторний тракт людини;
- технічна підсистема — стетофонендоскоп;
- дослідник (лікар).

Активною об'єднуювальною ланкою такої БТС є лікар, який виконує роль усвідомлення тріади «дані — інформація — знання» (згідно з рис. 3.2). Насправді, єдиною інформацією про характер і особливості дихальних шумів або звуків дихання є думка

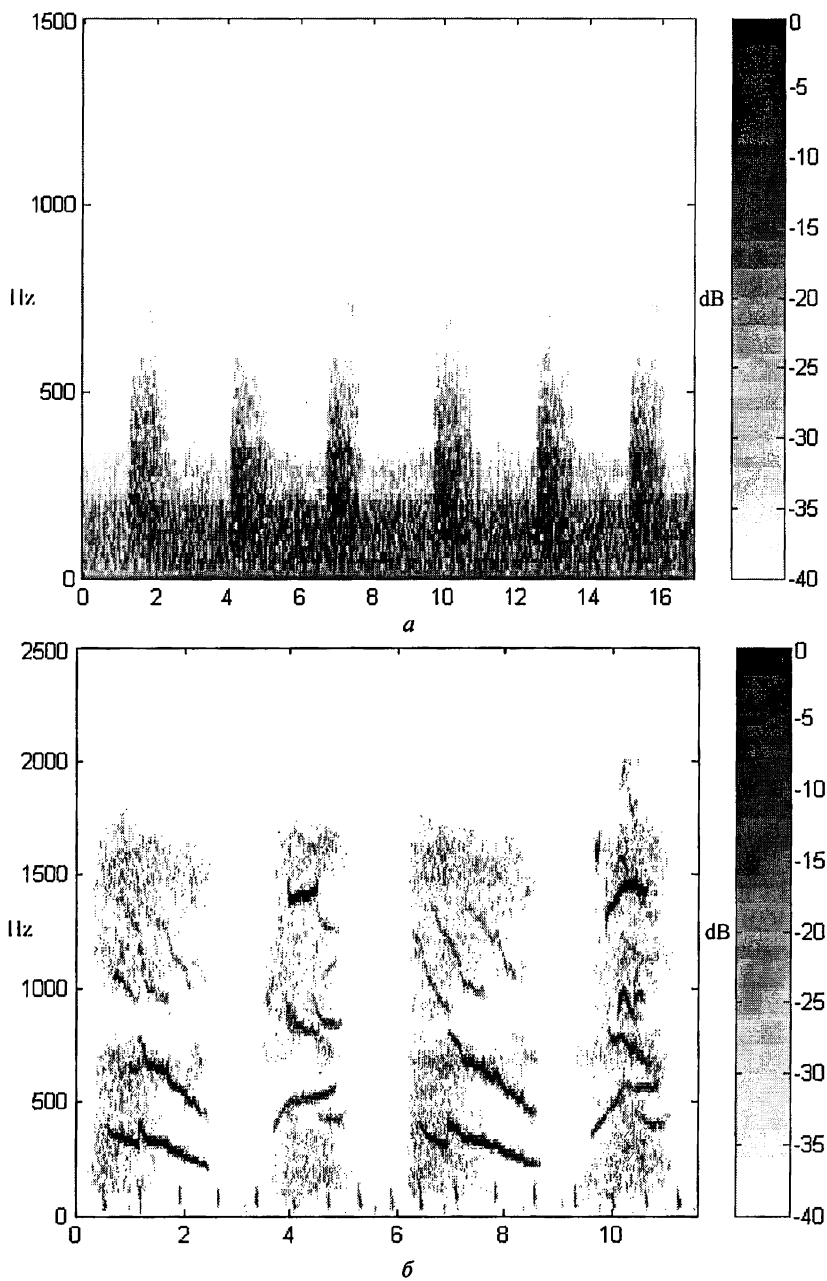


Рис. 3.6. «Акустичні портрети звуків дихання»:
 « — норма; б — тяжкий трахеїт

медика на підставі його лікарського досвіду та індивідуальних особливостей слухового сприйняття. Очевидно, що за такого способу прослуховування звуків дихання фактично неможливо поставити їм у відповідність які-небудь об'єктивні кількісні характеристики. До того ж суб'єктивна інформація про звуки дихання на практиці найчастіше не документується (на відміну від кардіограм, флюорограм та ін.) і тому за необхідності не може бути відновлена.

Структурно-функціональну модель БТС діагностики легеневих патологій за допомогою комп'ютерної реєстрації й обробки звуків дихання, що відповідає інформаційно-структурній моделі БТС (рис. 3.3), представлено на рис. 3.5. Ця модель складається з:

- біоб'єкта — респіраторного тракту людини;
- технічної підсистеми, в яку входять: високочутливі датчики у вигляді набору бінарних п'єзокерамічних пластин, чотириканальний підсилювач, чотириканальний частотний фільтр, головні телефони, багатоканальний аналого-цифровий перетворювач;
- персонального комп'ютера;
- дослідника (лікаря).

На виході технічної підсистеми дані у вигляді фонограми звуків дихання — акустичного сигналу, перетвореного за допомогою датчика на електричний сигнал, через аналого-цифровий перетворювач надходять у комп'ютер, де відбувається «усвідомлення даних». У результаті маємо інформацію у вигляді спектрограм звуків дихання (респіросонограм) — своєрідних «акустичних портретів звуків дихання», що зберігаються в пам'яті комп'ютера (рис. 3.6). По цих портретах на підставі свого лікарського досвіду лікар ставить діагноз.

Подальша еволюція даної БТС припускає її інтелектуалізацію: «усвідомлення інформації» комп'ютером через верифікований банк вирішених завдань паралельно з усвідомленням інформації лікарем (рис. 3.5).

Розглянута БТС діагностики легеневих патологій відповідає основним вимогам до БТС:

- неінвазивність;
- безпека та екологічність (на відміну від рентгенодіагностики);
- об'єктивність.

ОСНОВИ СИНТЕЗУ БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХАМИ ЛЮДИНИ ЯК ЦІЛЕСПРЯМОВАНИХ

У розділі 3.2 розглянуто концептуальні основи та технологію синтезу БТС керування рухами. Показано, що методи програмної електростимуляції м'язів і біологічного зворотного зв'язку (БЗЗ) є основою синтезу сучасних БТС керування рухами.

Розкрито фізіологічні передумови синтезу БТС. Дано поняття «електроміографічний образ» руху, зорових та слухових формалізованих «інформаційних образів» руху. Фізіологічно обґрунтовано доцільність використання «електроміографічних образів» для формування програм електростимуляції м'язів, а також доцільність використання формалізованих зорових і слухових образів як звертання до природних резервів організму для відновлення і корекції рухів.

Наведено принципи формування/тренування рухів, що запускають і стимулюють резерви організму на підтримку гомеостазу рухової системи.

Розглянуто еволюцію синтезу БТС. Описано принцип дії таких систем, їх структурно-функціональні схеми. Обґрунтована доцільність використання адаптивного підходу.

Описано інформаційно-структурну модель організації біологічно адекватної БТС і сформульовано принципи біологічно адекватного керування рухами.

Біологічно адекватну БТС керування рухами розглянуто як цілеспрямовану систему інтелектуального «образного» керування. Підкреслено, що здатність до адаптації — необхідна властивість інтелектуального керування.

Рух, рухова активність — навряд чи не головний чинник, що сприяє формуванню здорового способу життя людини. Порушення рухових функцій, втрата

рухової активності, навіть часткова, не кажучи вже про повну (абсолютну), призводять до втрати не лише фізичного здоров'я, а й психічного та соціального. Повернення до здорового стану через забезпечення рухової активності є важливою соціальною проблемою. Завдання допомоги інвалідам, дорослим і дітям з відновлення порушених рухових функцій не перестає бути актуальним.

Завдання відновлення рухової активності виникає також після перебування людини у невагомості, коли через дефіцит гравітаційного навантаження на опорно-руховий апарат розвивається атрофія м'язів. Особливо страждають рухи ходьби (ходіння). Тут також виникає проблема відновлення рухового стереотипу рухів ходьби, наприклад космонавтів після тривалого перебування в невагомості.

Робота сучасних фізіотерапевтичних апаратів, які використовуються у комплексі реабілітаційних заходів, спрямованих на відновлення рухових функцій, базується на ряді методів, головними з яких є методи програмної електростимуляції м'язів і біологічного зворотного зв'язку. Розробка апаратів, в основу яких покладено метод програмної електростимуляції м'язів, та їх практичне застосування у комплексі реабілітаційних заходів, спрямованих на відновлення рухових функцій, розпочалася в Інституті кібернетики НАН України ще в 60-х роках минулого століття під керівництвом професора Л.С. Алєєва.

Розроблені тут апарати програмної електростимуляції м'язів типу «Міотон» і «Міокор», були випущені серійно (у 60—90-х рр. минулого століття) і застосовувались у багатьох клініках, санаторіях та оздоровницях колишнього СРСР для відновлення рухових функцій, пошкоджених внаслідок тяжких захворювань центральної і периферичної нервової системи, а саме наслідків порушень мозкового кровообігу у вигляді геміплегій і геміпарезу, ушкоджень периферичної нервової системи, невритів, лицьового парезу, дитячого церебрального паралічу (ДЦП) тощо (рис. 3.7).

Поряд з електростимуляцією метод біологічного (електроміографічного) зворотного зв'язку привертає все більшу увагу реабілітологів Європи, США, Канади. Кожний з підходів має свої переваги залежно від ступеня порушення рухових функцій і етапу реабілітації. Наприклад, NeuroGym — технологія (Канада), що використовує БЗЗ, у своєму реабілітаційному арсеналі має не тільки метод електроміографічного (ЕМГ) зворотного зв'язку, а й оригінальний метод так званого балансового біологічного зворотного зв'язку. Ця технологія відмінно зарекомендувала себе у лікуванні церебрального паралічу, ушкоджень периферичної нервової системи, лицьового парезу, інсульту тощо, а також для спеціального тренування м'язів спортсменів.

ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ РУХІВ ЛЮДИНИ

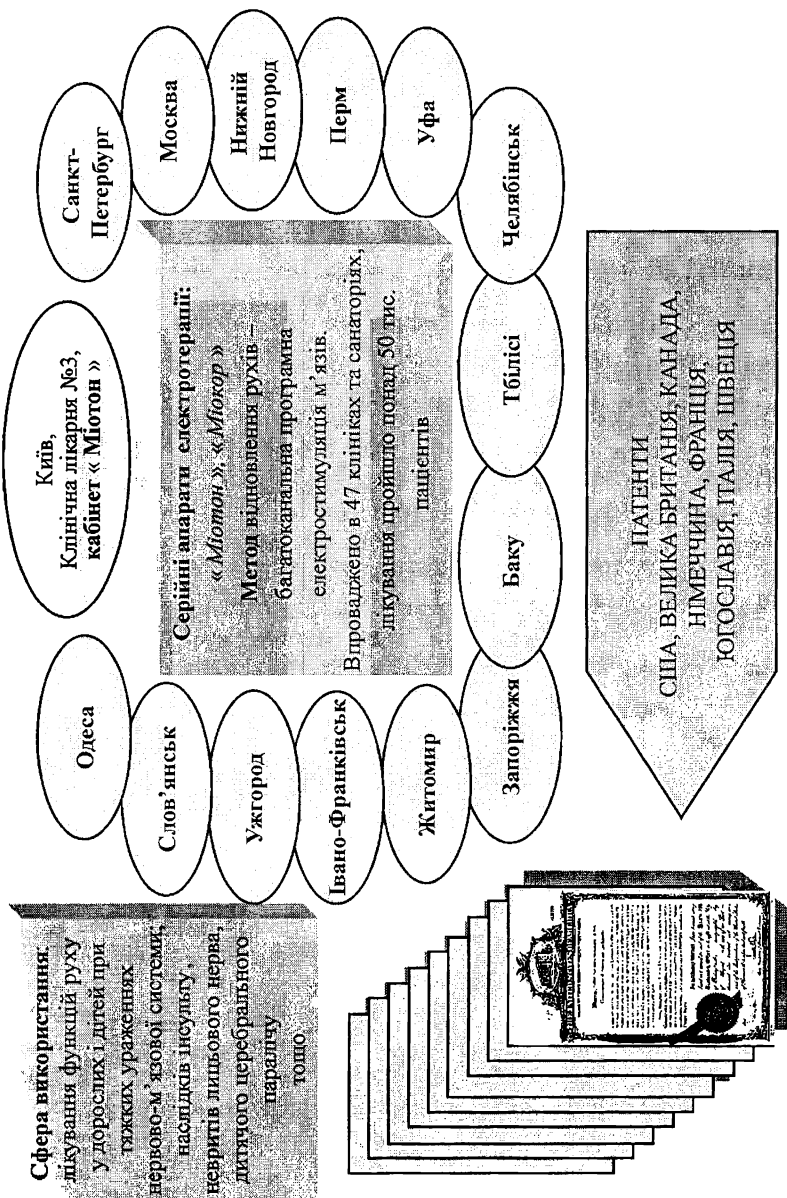


Рис. 3.7. Впровадження БТС керування рухами — апаратів типу «Міотон» і «Міокор»

Голландська фірма «Enraf-Nonius» — європейський лідер з виробництва фізіотерапевтичного устаткування — випускає ряд апаратів для відновлення рухових функцій. Це 1-, 2- і 4-канальні апарати електростимуляції і діагностики «Endomed 481», «Endomed 482», «Endomed 484», а також 2-канальний апарат багатоцільового біологічного зворотного зв'язку (за тиском і ЕМГ) та електротерапії «Міомед 932».

У результаті використання методів програмної електростимуляції м'язів і біологічного зворотного зв'язку збільшуються рухливість, сила м'язів, обсяг рухів, повертається здатність керувати рухами.

3.2.1. Фізіологічні передумови синтезу

Головна кінцева мета реабілітаційного процесу — відновлення рухових функцій — нерозривно пов'язана з адекватною стану рухових функцій мобілізацією резервів організму на відновлення рухів за допомогою персонального тренування. Адекватність як індивідуальний критерій оптимального формування рухів і мобілізації резервів на різних етапах реабілітації виходить з поняття гомеостазу рухової системи, його індивідуальності та індивідуальності порушень гомеостазу при патології рухів. Концепція гомеостазу рухової системи є головною передумовою синтезу БТС керування рухами.

Гомеостаз рухової системи. Концепція гомеостазу, висунута вперше понад 100 років тому Клодом Бернаром, оформилася в сучасну теорію гомеостазу як науку про відносну динамічну сталість внутрішнього середовища і стійкість основних фізіологічних функцій організму. В сучасному розумінні гомеостаз означає як сам регульований стан, так і регульовальні механізми, що його підтримують. Гомеостаз — одна з найважливіших проблем медицини і проблема сучасної патології.

Сталість внутрішнього середовища організму є необхідна умова його незалежного існування. Поняття «гомеостаз» — основна посилка, як уже зазначалося, для визначення таких категорій, як самоорганізація, саморегуляція, адаптація, стабільність та ін., перелік яких необхідний для синтезу конкретних БТС керування, у тому числі БТС, призначених для формування рухів у разі патології рухових функцій, відновлення рухових функцій, тобто відновлення рухового гомеостазу.

Рухова функція людини — одна з найбільш складних і розвинених, що сформувалася в результаті тривалого філогенезу.

Рухові команди, які формуються в корі та інших рухових центрах головного мозку людини на основі аферентної інформації від зовнішнього середовища, проходячи до виконавчих механізмів — м'язів, багаторазово переробляються на різних рівнях нервової системи, перетворюючись із «загального завдання руху» на конкретні команди.

Рухова діяльність складається з певної послідовності дій, що здійснюються за допомогою мимовільних (постуральних) і довільних рухів, обумовлених роботою м'язів. Основним завданням вивчення підтримки системного гомеостазу виконання рухового акту є пошук інформативних параметрів координаційної структури рухів і встановлення загальних закономірностей як центральної регуляції, так і діяльності м'язової периферії та сенсорної корекції рухів. Відносно моторної функції ідеї гомеостазу легко просліджуються в індивідуальній стандартності біомеханічного рисунка (зображення) виконання таких рухових навичок, як ходьба, біг, почерк, мова, жести і безліч інших, що зберігаються роками і дають можливість пізнати людину лише за характерними для неї особливостями рухів. Це дає підставу вважати, що довільно керовані рухи здійснюються за загальним принципом — гомеостазу.

Проблема гомеостазу рухових функцій є однією з найскладніших. Регуляцію рухів і пози вивчали з багатьох точок зору. Це і центральні механізми регуляції, і властивості мотонейронів та м'язів як виконавців рухових актів, це і питання сенсорної іннервації м'язів та сухожилів, і механізми, що забезпечують гомеостаз руху як результат роботи широко розгалуженої ієрархічно організованої системи кілець регуляції, починаючи від елементарного циклу скорочення м'язового волокна і до регуляції цілісного складно координованого акту локомоції.

Активність мотонейронів як відображення функціонування нейронних механізмів керування рухом є кінцевою ланкою в ланцюзі переробки інформації системи керування рухом. Вона визначає порядок залучення в роботу окремих м'язів, м'язових груп, скорочення яких забезпечують у нормі виконання координованих цілеспрямованих рухів. Особливість просторово-часової організації активності мотонейронів визначає структуру виконуваного руху.

Відповідно до сформованих уявлень центральними механізмами виокремлюється тип руху, точніше його змістовна частина, а його конкретне виконання — біомеханічна структура — реалізується спільними механізмами, що працюють в умовах постійної зміни стану ієрархічних ланок, які приводять до зміни довжини м'язів, швидкості скорочення, величини опорних реакцій.



Рис. 3.8. Інформаційно-структурна модель гомеостазу рухових функцій як проблеми

Сучасні знання про побудову рухового акту дають можливість представити інформаційно-структурну модель проблеми гомеостазу рухових функцій у цілому і шляхів її вирішення (рис. 3.8).

Більшість довільних рухів виконується за рахунок комплексного збудження групи м'язів. Сила і тривалість скорочення кожного м'яза залежать від частоти і тривалості імпульсації, яка надходить до м'язових волокон через міоневральні синапси. Параметри імпульсації, що надходить до м'язів, перетворюються на цілком конкретну детерміновану функцію — їх скорочення чи розслаблення. Будь-який довільний рух можна представити як функцію, що враховує ступінь збудження. В онтогенезі під час становлення рухових функцій організму важливу роль відіграють зворотні зв'язки від напружених м'язових груп на різні ієрархічні рівні нервової системи. Ці зв'язки в остаточному підсумку дають можливість виробляти програму, що керує послідовністю і частотою тих нейронів, аксони яких йдуть до м'язових груп, тобто виробляти індивідуальний руховий стереотип. Останній у разі патології пору-

шується. Провідні шляхи утворені як еферентними, так і аферентними нервовими волокнами.

При виборі адресних керуючих впливів ідеї гомеостазу рухової системи можуть бути доповнені поглядом М.А. Бернштейна на суть вправи і тренування, що складають адресний керуючий вплив, а саме вправа і тренування «...ніяк не зводяться до незліченних повторень... Вправа є не повторюваний рух, а його побудова. Різниця полягає в тому, що правильно виконана вправа повторює раз за разом не часів, що використовується для вирішення рухового завдання, а повторює процес вирішення цього завдання, раз по разу поліпшуючи і змінюючи засоби».

«Електроміографічний образ» руху в навчанні та самонавчанні рухам. В основі поняття «електроміографічного образу руху» лежить той факт, що всі рухи (навіть найпростіші) реалізуються групами м'язів. Сукупність часових, просторових і амплітудних електроміографічних характеристик м'язів, що скорочуються та залучаються до руху, дістала назву біоелектричного або електроміографічного образу руху.

Для виділення «електроміографічного образу» проводиться поточна оцінка електричної активності всіх тих м'язів, які беруть участь у цьому русі. При цьому параметри ЕМГ різних м'язів (що тягнуть, стабілізують та антагоністів) враховуються з певними ваговими коефіцієнтами. В результаті формується «матриця руху», яка є необхідним елементом у побудові програми керування в «нав'язуванні» реципієнту того чи іншого руху за методом програмної багатоканальної електростимуляції м'язів (розділ 3.2.2).

Через те що м'язи в живому організмі діють не ізольовано, має місце певна координація скорочення різних м'язів. Саме цю сукупність ЕМГ часто називають «електроміографічним образом», або ЕМГ-картиною якогось руху (рис. 3.9). Кожному конкретному руху відповідає деякий просторово-часовий образ, що відображає ступінь і послідовність включення м'язів, які беруть участь у його виконанні. Іншими словами, просторово-часовий руховий образ є функцією дії окремих м'язів.

На процес виконання рухів істотно впливають умови, за яких вони відбуваються. Якщо під час виконання конкретного руху змінити зовнішні умови (наприклад, положення частин тіла людини), то руховий образ відібере реакцію як на саму зміну умов (перехідний процес), так і на результат цієї зміни через деякий час (сталий процес). Отже, тому самому руху людини за нових зовнішніх умов буде відповідати новий руховий образ, створений

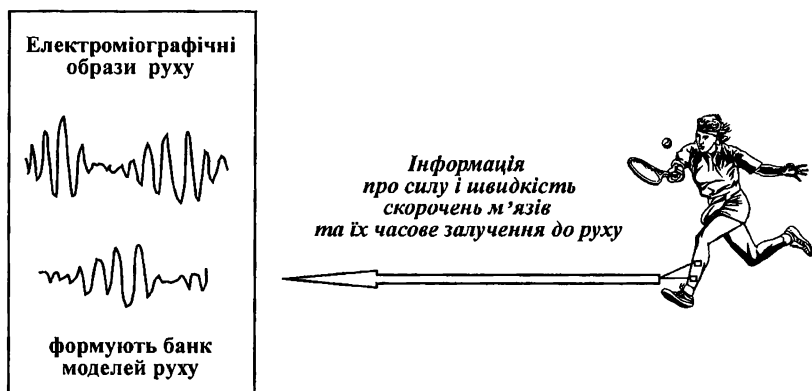


Рис. 3.9. Електроміографічний образ руху

з їх урахуванням. Тому на практиці надзвичайно важко багаторазово з відповідною точністю повторити відносно складний рух. Дуже важким є й одержання конкретних величин складових рухового образу, тому що для цього треба виміряти силу і швидкість скорочення всіх м'язів, що беруть участь у русі в кожен момент часу.

«Електроміографічний образ», що являє собою електричний аналог руху, може бути одержано шляхом одночасного зняття електроміограм м'язів, які беруть участь у русі. Хоч одночасне відведення електроміограм усіх м'язів, що беруть участь у даному русі, також наштовхується на певні технічні труднощі (наприклад, пов'язані із взаємним впливом електроміограм у каналах відведення), одержати «електроміографічний образ» руху все-таки можливо.

Коли ми керуємо рухами, наші прагнення зводяться до того, щоб реакцію м'яза на керуючий вплив наблизити до природного. Успіх вирішення цієї проблеми визначається виконанням багатьох завдань, серед яких можна виділити такі:

- формування алгоритму руху, що нав'язується за допомогою електростимуляції, близького до природного;
- вибір місця відведення і подачі командних сигналів;
- вибір параметрів стимулюючого сигналу.

Успішне формування алгоритму руху, рухових програм пов'язане насамперед із питанням вибору тих місць відведення командних сигналів, які забезпечують одержання інформації, що найповніше відображає структуру довільного руху.

Відповідно до сучасних уявлень, керування рухами людини здійснюється багаторівневою ієрархічно організованою системою з великим числом послідовних програм і рівнобіжних ланок. Тому для одержання інформації про майбутній рух треба мати дані про події, що відбуваються на кожному з рівнів формування рухових команд. Можна припустити доцільність відведення рухових команд від рухового нерва, оскільки отримані тут сигнали вже пройшли всі етапи формування. Однак можливості використання нейрограми як джерела керуючих сигналів обмежені такими обставинами. По-перше, сумарна електрична активність периферичного нерва становить інтерференцію аферентних і еферентних імпульсів. Поділ же рухових команд і сигналів зворотного зв'язку призводить до значних ускладнень пристрою для обробки керуючих сигналів. По-друге, у більшості випадків сумарна електрична активність нервового стовбура містить еферентні команди, адресовані не одному, а декільком м'язам.

Найдоступнішим як за відведенням, так і за виділенням корисної інформації про рух виявилось відведення рухових команд безпосередньо від м'язів, що обумовлено такими обставинами:

- знімається команда, що має доволі точну адресу;
- знімається команда, що пройшла через усі рівні її формування;
- величина сигналів, що відводяться від м'яза, більша за амплітуду нейрограми.

Найзручнішим для завдань біоелектричного керування є відведення інтерференційної електроміограми поверхневими електродами. Така ЕМГ дає можливість вивчати участь м'язів у різних рухових актах, послідовність їхнього включення, рівень збудження, співвідношення активності м'язів у різні періоди формування рухових навичок.

Алгоритм руху, або як ще прийнято називати «рухова програма», формується на основі корисної інформації про рух, яку одержують з біоелектричної активності керуючих м'язів, тобто з електроміограми, на знанні тих співвідношень, що зв'язують параметри біоелектричних сигналів з механограмою.

Одним з найінформативніших параметрів вважається інтегрована електроміограма. Між нею і механограмою існують певні та добре вивчені залежності ізометричного й ізотонічного режимів роботи. Для більшості м'язів людини з коротким сухожиллям у певному діапазоні зусиль і швидкостей скорочень ці залежності лінійні. Найбільші відхилення від лінійної залежності спостерігалися при напругах, близьких до максимальних. Для м'язів з

довгим сухожиллям і відносно малим перетином лінійне відхилення може порушуватися вже у разі сил, що становлять 50—70 % максимальних. При стомленні лінійний характер співвідношень зберігається і змінюється лише коефіцієнт пропорційності. Поряд із цим для визначеного діапазону рівнів стимулюючого сигналу зберігається лінійна залежність між амплітудою стимулу і механічною відповіддю м'яза. Нелінійність спостерігається в області, близькій до порога (вона займає приблизно 20 %), і в області насичення, коли подальше зростання інтенсивності подразнення не призводить до збільшення відповідної реакції. Нелінійність настає в середньому, коли поріг подразнення збільшується у 3 рази.

Наведені вище уявлення про зв'язок параметрів біоелектричної активності м'яза, що скорочується, з його механограмою (силою та швидкістю скорочень), з одного боку, і зв'язок рівня зовнішнього електричного впливу на м'яз з механограмою — з іншого, дають підставу, по-перше, вважати інтегровану ЕМГ своєрідним «електроміографічним образом» сили скорочення м'яза, а по-друге, використовувати цей «електроміографічний образ» для формування програм керування рівнем і розподілом за часом стимулюючого сигналу, а отже, й рівнем і послідовністю примусових скорочень м'язів.

Формалізований «інформаційний образ» руху, зоровий і слуховий, в усвідомленому тренуванні довільних рухів. Процес самонавчання довільним рухам, самонавчання формуванню нового стереотипу руху замість порушеного патологією пов'язаний з методом біокерування, або біологічного зворотного зв'язку. Біологічний зворотний зв'язок і подібні методики саморегуляції виділилися в самостійну галузь досліджень до початку 70-х років минулого століття. З тих пір метод БЗЗ затвердився в експериментальній і клінічній медицині.

БЗЗ являє собою комплекс процедур, під час проведення яких людині за допомогою зовнішнього зворотного зв'язку, переважно на базі комп'ютерної техніки, подається інформація про поточний стан керованої фізіологічної функції, що допомагає розвинути навички самоконтролю, навчитися саморегуляції і згодом дає можливість змінити цю функцію мимовільно.

Популярність методу пов'язана не тільки з можливістю ефективної корекції найрізноманітніших функціональних і поведінкових розладів, а й зі зверненням цього принципу лікування до природних резервів організму, його потенційних можливостей.

Основними елементами БЗЗ є:

- безупинний моніторинг фізіологічних показників за допомогою комп'ютерної (чи іншої) техніки в реальному масштабі часу;
- пред'явлення об'єкту, яким керують, фізіологічних показників у вигляді сенсорних стимулів (зорових, слухових, тактильних), що містять інформацію про зміни регульованої функції;
- спонукання людини, яка тренується, до зміни функції за допомогою інструкцій та вибору стратегії саморегуляції.

Таким чином, БЗЗ — одна з форм біокерування (у нашій літературі часто використовується термін «адаптивне біокерування»).

Високий ступінь адекватності біокерування зі зворотним зв'язком визначається не тільки можливостями звернення до локальних специфічних процесів (ЕКГ, ЕМГ, шкірно-гальванічна реакція, викликаний потенціал тощо), а й активною участю суб'єкта в проведенні лікувальних і тренувальних сеансів. Основним механізмом реалізації біоефектів адаптивного керування зі зворотним зв'язком є рефлекторні асоціації між сигналом зворотного зв'язку і станом контрольованих функцій. Так, біокерування зі зворотним зв'язком використовується для відновлення рухових функцій при дитячому церебральному паралічі, патології прикусу в дітей, церебральних постінсультних паралічах дорослих.

У спортивній практиці корекція рухових функцій потребує точної функціональної діагностики біоритмологічної структури рухових актів спортсменів, обґрунтування схеми поетапної корекції навичок (після порівняння з еталонами). Оскільки ефекти адаптивного регулювання мають індивідуальний характер, що пов'язано з індивідуальними здатностями пластичності рухових функцій, потрібні спеціальні діагностичні тести, що дають змогу обґрунтувати точну програму корекції рухової навички. Методи електронного контролю біоелектричної активності м'язів дають можливість швидко діагностувати помилкові елементи рухів, а також коректувати їх.

З медичної практики відновлення рухових функцій відомо, що після захворювань нервової системи формують у хворого стійкий руховий дефект. Якесь частина рухового досвіду людини виявляється втраченою. Він може відновитися сам по собі, але частіше цей процес потребує спрямованого сприяння, оскільки бажаним кінцевим результатом є відновлення функції, а не компенсація її спонтанним нераціональним рухом. Реабілітація рухових функцій ускладнюється відсутністю чітких уявлень про комплекс па-

параметрів і критеріїв, які необхідні й достатні для оцінки порушених функцій. У руховій сфері це визначається насамперед складністю самої системи керування рухом, її багаторівневою ієрархічною організацією, а отже, й різноманіттям причин її збудження, інтер- та інтраіндивідуальними варіантами просторово-часової структури руху в нормі і в разі патології.

Існує чимало об'єктивних причин, що ускладнюють перехід реабілітації з рівня удосконалювання індивідуальної майстерності фахівців, які навчають рухам, на рівень функціонального моніторингу. Саме тому шойно була висловлена ідея біологічного зворотного зв'язку, її першими взяли на озброєння фахівці, котрі займаються рухами.

Перш ніж вона стане доволіно керованою, функцію треба відчувати за її прямими чи непрямыми ознаками. У разі керування рухами за допомогою БЗЗ пацієнт «відчуває» рух за формалізованим зоровим, звуковим чи тактильним «образом руху».

Забезпечуючи безупинний контроль «зацікавленої» функції, БЗЗ надає пацієнту можливість прицільно звернути увагу на об'єкт модифікації, точніше оцінити успіх при виконанні конкретного завдання. Для хворих такий контроль на фоні загальної мотивації до видужання слугує достатнім підкріпленням у процесі навчання керуванню порушеної рухової функції.

Достоїнства БЗЗ, головним з яких є звернення до природних резервів організму, дають можливість використовувати цей метод як доповнення до існуючого методу реабілітації, що ґрунтується на програмній електростимуляції м'язів.

Можливості реабілітації дотепер обмежувалися традиційною тріадою: лікувальна фізкультура, фізіотерапія і медикаментозна корекція. Провідну роль при цьому надавали лікувальній фізкультурі як методу навчання руху в реальному предметному світі. Ефективність лікувальної фізкультури пов'язана насамперед з можливістю активного залучення самого хворого в процес лікування, градуального ускладнення рухових навичок, що відпрацьовуються. Роль методиста при цьому полягає у формуванні рухового завдання, спостереженні за його виконанням, корекції та доведення результату до свідомості хворого. Успіх такого навчання багато в чому залежить від досвіду і знань фахівця. У цьому зв'язку метод БЗЗ можна розглядати як інструмент, що розширює можливості реабілітолога. За методом БЗЗ хворому надається об'єктивна інформація про ступінь відмінності його руху (або окремого параметра руху) від заданого.

Крім того, достоїнством БЗЗ є й те, що БЗЗ — це і засіб тренування (формування навички руху), і інструмент діагностики, що дає змогу оцінити і контролювати довільний рух від його сприйняття до реалізації.

Як керовані сигнали у процесі навчання можуть бути використані:

- кутове переміщення (у суглобах з обмеженим зміненням рухом);
- різниця кутових переміщень;
- електроміограма із «зацікавлених» м'язових груп;
- поверхнева температура паретичної кінцівки.

Що ширшим є спектр завдань, які використовуються для тренування руху, то більше формується функціональних зв'язків і структур-патернів руху. Таким чином, роль втрачених структур у системі керування рухом починають відігравати нові функціональні утворення. Ширшими стають асоціативні зв'язки, зростає роль взаємодій між півкулями. Слід зазначити, що роль цих взаємодій є значна і при самопрограмуванні рухів за методом взаємостимуляції, що детальніше буде розглянуто у розділі 3.2.5.

При ураженні центральних рухових механізмів виконання руху функціонально-динамічною групою й одночасна свідома спроба виконання дії ведуть до появи потоку імпульсів до елементів кінестетичного аналізатора, що не постраждали. Щоразу ніби створюється активна умовна модель руху, яка сприяє формуванню нових систем умовнорефлекторних комплексів. У створенні останніх значну допомогу може надати біологічний зворотний зв'язок. Якщо програмна електростимуляція м'язів забезпечує надходження у вищі відділи ЦНС пропріоцептивної аферентації, то біологічний зворотний зв'язок, включаючи інші види аналізаторів, наприклад зоровий, сприяє надходженню в ЦНС не тільки пропріоцептивної, а й результативної аферентації, що характерно для природних рухів.

Функціональні властивості рухових одиниць і м'язів. Використання біокерування в поєднанні з програмною стимуляцією дозволяє ще й для тренування різних типів волокон — швидких і повільних, таких, що стомлюються, і таких, що не стомлюються. Проаналізуємо властивості рухових одиниць і м'язів як виконавців довільних і «викликаних» електростимуляцією рухів.

Відомо, що з функціональної точки зору рухові одиниці поділяються на два основних типи — повільні та швидкі. Повільні рухові одиниці містять повільний мотонейрон, що іннервує

м'язові волокна, швидкі рухові одиниці — відповідно швидкий мотонейрон і швидкі м'язові волокна. Для повільних мотонейронів характерна висока збудливість, низький поріг включення в імпульсивну активність, відносно низька частота імпульсації, висока витривалість, нестомлюваність. Швидкі мотонейрони характеризуються нижчою збудливістю, високим порогом включення в імпульсну активність. Вони використовуються тільки у разі необхідності виконання відносно великих за силою статичних і динамічних м'язових скорочень, а також швидкісних напруг з високим градієнтом сили. Фізіологічним розходженням між м'язовими волокнами швидкого і повільного типу є різниця в силі та швидкості скорочень, а також ступені стомлюваності (чи витривалості).

У разі довільних скорочень насамперед залучаються повільні рухові одиниці, що не стомлюються. Лише тоді, коли виникає необхідність виконання відносно великих за силою статичних і динамічних скорочень, а також швидкісних напруг з високим градієнтом сили, залучаються швидкі рухові одиниці, що «стомлюються», з товстими і могутніми швидкими м'язовими волокнами й у великій кількості. Таким чином, у разі довільних скорочень послідовність рекрутування (залучення) рухових одиниць відбувається згідно із «законом розмірності», коли меншому мотонейрону з вищим вхідним опором для збудження необхідний менший, порівняно з великим мотонейроном, струм деполяризації. Відбувається це тому, що під час довільного скорочення мотонейрон активується синаптичним іонним струмом, який безпосередньо входить у клітину і має той же ефект, що й внутрішньоклітинна стимуляція.

У разі «викликаних» впливом електростимуляції скорочень м'язів послідовність рекрутування мотонейронів і рухових одиниць визначається не «законом розмірності», а залежить від збудження аксона або м'язових волокон. Коли м'язи скорочуються під впливом електростимуляції, рухові одиниці активуються струмом, що прикладається позаклітинно до нервових закінчень, і більші клітини з нижчим вхідним опором аксона більш збудливі порівняно з малими. Крім того, м'язові волокна великих рухових одиниць розташовані поверховіше, вони товстіші та збудливіші для позаклітинного струму. В результаті під час як прямої електростимуляції, так і через нерв насамперед залучаються великі рухові одиниці, які більше стомлюються, а ті, що не стомлюються, як високопорогові для позаклітинного струму практично не працюють.

У підсумку в разі довільних і «викликаних» впливом електростимуляції скорочень м'язів працюють різні рухові одиниці (що стомлюються і що не стомлюються) і в різній кількості. Тому логічно припустити, що використання методу біокерування для формування у пацієнта довільних рухів у поєднанні з методом програмної електростимуляції м'язів для формування «викликаних» рухів буде сприяти зниженню стомлюваності м'язів.

3.2.2. Принципи формування рухів за допомогою біотехнічних систем

Виходячи з наведених вище фізіологічних передумов синтезу біотехнічних систем керування рухами розглянемо принципи формування рухів за допомогою таких систем, принципи організації біологічно адекватного цілеспрямованого процесу відновлення рухової активності людини і тренування рухів у нормі, у разі патології та після перебування в невагомості.

Ідеї гомеостазу щодо моторної функції приводять до розуміння того, що руховий досвід людини є не що інше, як сформована в онтогенезі становлення рухових функцій здатність організму забезпечити підтримку системного гомеостазу виконання руху, причому ця здатність індивідуальна. Патологія порушує її внаслідок випадання структурних елементів і/чи регулювальних систем, а разом з нею і здатністю виконати рух. У зв'язку з цим дуже важливим є вирішення питання вибору керуючих впливів. Останні мають бути такими, що «щадять» організм людини, оптимально запускають і стимулюють резерви внутрішніх регулювальних систем організму через комбіновану роботу внутрішніх механізмів і керуючих впливів до роботи тільки керуючих впливів, коли вичерпані всі резерви внутрішніх механізмів.

Отже, *принципами формування і тренування рухів*, що запускають і стимулюють резерви організму на підтримку гомеостазу рухової системи, відновлення і корекцію рухів, на збільшення сили і витривалості м'язів, гармонізацію рухів є такі:

- біологічно адекватний запуск і стимуляція зворотних зв'язків, що беруть участь у побудові руху;
- навчання і самонавчання рухам, зовнішнє програмування і власне (безпосереднє пацієнтом) програмування рухів;
- пріоритетність режиму тренування, зміна режиму тренування й ускладнення тренувальних завдань;
- тренування швидких і повільних волокон м'язів;

- збіг у часі електричної активації м'язів з їхньою природною напругою в процесі локомоції: для корекції патологічного рухового стереотипу людини і закріплення фізіологічних патернів рухів, що моделюються під час сеансів багатоканальної програмної електростимуляції м'язів, слід забезпечувати точну часову відповідність програм штучного (за допомогою електростимуляції) і природного (спроба довільного зусилля) збудження м'язів у рухових актах людини;

- еволюційно-адекватний зовнішній вплив: для моделювання виробленої в процесі еволюції просторово-часової організації м'язової активності треба забезпечити динамічну побудову зовнішнього впливу на нейромоторний апарат пацієнта.

3.2.3. Еволюція синтезу біотехнічних систем програмного керування рухами

На прикладі еволюції розвитку цих БТС розглянемо синтез різних типів БТС керування: відкритих, замкнених (зі зворотними зв'язками), адаптивних. У клінічній практиці для відновлення порушених чи втрачених рухових функцій використовується ряд поколінь БТС керування рухами, дія яких базується на методі багатоканальної програмної електростимуляції м'язів (БПЕС):

«Міотон» — відкриті системи;

«Міостимул» та «Акорд-мультиміостимул» — замкнені, зі зворотними зв'язками, що мають елементи адаптивності;

«Біоміотон», «Біоформ» та «Тренар» — біологічно адекватні БТС, тобто адекватні стану об'єкта керування. Тут біологічна адекватність виступає критерієм організації структури БТС. Виконання умов біологічної адекватності передбачає можливість гнучкої зміни структури БТС керування рухами відповідно до стану рухових функцій. Детально ці БТС керування рухами будуть розглянуті у розділах 3.2.4 та 3.2.5.

При деяких захворюваннях нервової системи, особливо таких, що супроводжуються порушеннями рухових функцій людини, невід'ємною частиною загального комплексу заходів, спрямованих на відновлення рухових функцій, є застосування електростимуляційної терапії. Однак традиційні методи стимуляції за допомогою безпрограмних генераторів електричних імпульсів з фіксованими параметрами, зміна яких у допустимих для даного стимулятора межах здійснюється оператором, далеко не завжди задовольняють завданням реабілітації хворих з руховими порушеннями. Щоб відновлювати не тільки силу уражених м'язів, а й

втрачену рухову навичку, треба одночасно стимулювати кілька м'язів за певною програмою. Навіть до найпростіших рухів залучаються кілька м'язів, що працюють у витриманих часових співвідношеннях. Тому виникає необхідність у багатоканальних електростимуляторах з певною програмою послідовного включення каналів і тривалості їхньої роботи.

Важливим етапом у розвитку електростимуляційної терапії м'язів було використання «електроміографічного образу» у ролі впливів, які керують роботою електростимулятора (див. розділ 3.2.1). Поняття «електроміографічний образ» руху було покладено в основу методу програмного багатоканального біоелектричного керування рухами (ПББЕК), який застосовано у відкритих БТС керування рухами типу «Міотон» (60—90-ті роки минулого століття), «Міокор» (90-ті роки минулого століття), адаптивних типу «Міостимул» (80-ті роки минулого століття), а також застосовано поряд з методом БЗЗ у новому поколінні біологічно адекватних БТС типу «Біоміотон» (2000 р.), «Біоформ» (2003 р.) та «Тренар» (2005 р.).

Принцип дії апарату «Міотон» показано на рис. 3.10. Сигнали, що відводяться під час виконання руху від тих чи інших м'язів донора за допомогою поверхневих на шкірних електродів, після певних перетворень керують амплітудою стимулюючих сигналів, що потім підсилюються і подаються на ідентичні м'язи реципієнта. Коли пристрій «Міотон» застосовують як програму керування роботою м'язів реципієнта, використовується та послідовність включення працюючих м'язів донора і тих змін його м'язових зусиль, яка спостерігається під час виконання необхідного природного руху. Реципієнт за відповідного підбору величини збуджувальних сигналів практично повторює рухи донора.

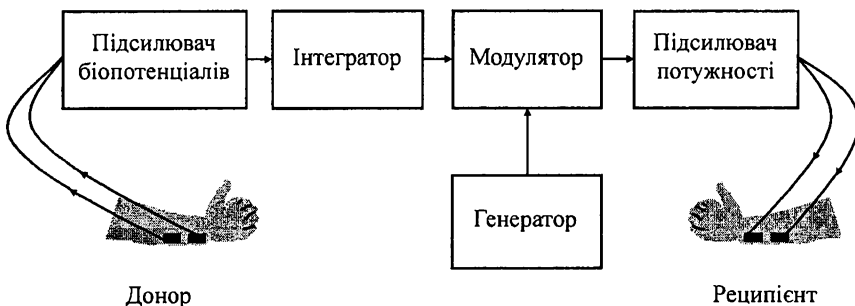


Рис. 3.10. Принцип дії відкритої системи керування. Апарат «Міотон» (один канал)

Оскільки сигнал від донора може бути заздалегідь записаний у блоці пам'яті, то з'являється можливість багаторазово повторювати записаний алгоритм руху або робити попередній «монтаж» з метою поновлення певних рухів і тим самим формувати банк рухових програм. Завдяки наявності в пристрої «Міотон» декількох каналів і застосуванню в них як керуючих впливів перетвореної активності м'язів, що задають програму рухів, електростимуляції піддаються відразу кілька м'язів людини (реципієнта), рухами якого керують у такій послідовності, в якій вони скорочуються в природних умовах. Це дає змогу нав'язувати реципієнту ряд основних рухів і підвищувати ефективність реабілітації при порушеннях рухових функцій, зв'язаних із захворюваннями центральної і периферичної нервової системи. За структурою та функціональними характеристиками «Міотон» можна класифікувати як відкриту систему безупинного довільного біоелектричного керування: роль зворотного зв'язку в ній фактично виконує оператор.

Введення зворотних зв'язків у БТС керування рухами дало можливість перейти до нового класу БТС типу «Міостимул», що реалізує принципи адаптивного керування. У цьому випадку параметри стимулюючого сигналу автоматично змінюються залежно від функціонального стану м'язів, які стимулюються. Відомо, що адаптивний підхід корисний за таких ситуацій:

- в умовах значної початкової невизначеності, коли брак апріорної інформації треба заповнити в процесі роботи системи за рахунок використання поточної інформації;
- у системах керування об'єктами з дрейфуючими характеристиками.

Обидві ситуації мають місце, коли керування рухами здійснюється за допомогою БТС.

Адаптивний підхід у побудові систем керування руховими функціями виправданий внаслідок таких умов, що мають місце при керуванні рухами на основі електростимуляції м'язів:

- параметри ідентичних м'язів у різних людей і параметри різних м'язів у тієї самої людини мають істотний розкид;
- параметри м'язів у процесі стимуляції зазнають істотних змін.

Основним критерієм якості керування має бути біологічно-адекватне збудження нервово-м'язових груп. При реабілітації рухових функцій важливо не стільки домагатися виконання повного руху (особливо на початкових етапах реабілітації), скільки одержати пропріоцептивну аферентацію для формування нового

підстроюється керуючий вплив, є поріг збудження м'язів, що стимулюються. Незважаючи на те що електроміографічна картина не може дати повної характеристики самих рухів, оскільки вона відбиває лише м'язовий компонент руху без врахування інерційних і реактивних сил, використання «викликаної електроміограми» має декілька зручностей: непотрібні додаткові датчики, оскільки сигнал викликаної електроміограми вдається зареєструвати за допомогою тих же електродів, якими здійснюється електростимуляція; викликана електроміограма, відбиваючи ступінь збудження м'яза, характеризує не тільки рух, що виконується, а й функціональний стан м'яза під час стимуляції.

Відомо, що коли сила м'яза збільшується, амплітуда і частота інтерференційної електроміограми теж зростають, і навпаки — зі зменшенням зусилля м'яза амплітуда і частота електроміограми зменшуються. При втомленні м'язів за умов постійного навантаження як для статичної, так і для динамічної роботи амплітуда електроміограми збільшується, а частота зменшується, причому що більшою є сила скорочення м'яза, то значнішим зменшення частоти.

За структурою і технічними характеристиками «Міостимул» — це замкнена, зі зворотними зв'язками система керування рухами людини.

Іншим прикладом адаптивного коректору рухів є створений фахівцями науково-медичної фірми «Статокін» (Москва) комп'ютерний комплекс «Акорд-мультиміостимул» — адаптивний коректор рухів, призначений для нормалізації біомеханіки ходьби за допомогою багатоканальної програмної електростимуляції м'язів.

Із практики реабілітації відомо, що хибні програми реалізації рухового акту, що закріпились у хворих на дитячий церебральний параліч і деякі інші захворювання, множинні патологічні синергії та синкінезії, які часто виявляються у разі відносно негрубої вираженості парезів у їх неприхованому невралгічному розумінні, створюють реальну передумову перебудови неправильно сформованих програм керування рухами. Для досягнення лікувального ефекту треба задіяти зовнішній контур регуляції, прикладений до тих чи інших аферентних входів пацієнта. У цьому плані багатоканальна програмна електростимуляція м'язів (БПЕС), є високоефективним методом корекції патологічного рухового стереотипу людини і слугує для закріплення фізіологічних патернів рухів, що моделюються під час сеансів БПЕС.

Клінічна і нейрофізіологічна сутність методу БПЕС полягає в точній часовій відповідності програм штучного (за допомогою

електростимуляції) і природного (спроба довільного зусилля) збудження м'язів у рухових актах людини. Крім відновлення порушеної біомеханіки ходьби за допомогою БПЕС вирішується також завдання нормалізації роботи локомоторних центрів на усіх вертикальних рівнях регуляції рухової активності. У зв'язку з тим, що в процесі БПЕС активація м'яза за допомогою електричного подразнення здійснюється саме в той момент подвійного циклу кроку, коли даний м'яз природним порядком — не раніше і не пізніше — має включатися у виконання цієї циклічної рухової дії, досягається максимальна перебудова нейродинаміки пацієнта.

Відомо, що тільки у фази збудження м'язів локомоторні центри стають сприйнятливими до аферентних сигналів і доступними для корекції своєї діяльності. В інші фази кроку ці центри загальмовані і практично не піддаються корекції.

Реабілітація хворих на ДЦП методами БПЕС вдало відповідає концепції про двояке походження дефіциту м'язової функції (ДМФ) при ряді патологічних станів і про позитивний вплив БПЕС на обидві складові ДМФ. Насправді у хворих на ДЦП наявний і ДМФ, що має органічний (абсолютний) характер унаслідок поразки нервово-м'язових структур, і функціональний (відносний) ДМФ, спричинений зміною функціонування м'язів унаслідок порушення біомеханічних умов їхньої діяльності. Найчастіше буває дуже складно визначити справжнє співвідношення обох складових ДМФ у хворих на ДЦП із різко вираженим патологічним руховим стереотипом.

Наведені вище принципи динамічної побудови зовнішнього впливу на нейромоторний апарат пацієнта вигідно відрізняють БПЕС від інших стимуляційних методів реабілітаційної терапії. Вплив традиційної стимуляційної техніки (в умовах нерухомого положення пацієнта) на нервово-м'язову систему базується виятково на принципі використання силових характеристик електричного струму. Зазначений вплив, безумовно, корисний, тому що поліпшує метаболізм у м'язовій тканині, сприяє збільшенню м'язової маси й оптимальному здійсненню скорочувальної діяльності м'яза та його наступного розслаблення, тобто лікувальний ефект реалізується переважно на рівні периферичного нейромоторного апарата.

На відміну від традиційної електростимуляції спокою відновлювальне лікування хворих з руховими порушеннями або гармонізація рухів у здорових людей за допомогою комп'ютерних комплексів БПЕС моделюють сформовану в процесі еволюції прос-

торово-часову організацію м'язової активності. Дана особливість є передумовою формування і закріплення фізіологічних патернів рухів на вищих рівнях ЦНС — у стовбурних і півкульних мозкових структурах керування руховою діяльністю й обумовлює стійкість досягнутих перебудов.

У створеному комп'ютерному комплексі «Акорд-мультиміостимул» — адаптивному коректорі рухів — висока часова точність електричної активації м'язів, що збігається з їхньою природною напругою в процесі локомоції, досягається завдяки прив'язці фаз м'язової активності, що моделюється, до значень суглобних кутів, що рееструються. Відомо, що в класичній біомеханіці існує досить чітка залежність рівня активності того чи іншого м'яза під час ходіння та бігу від величини кутів в основних суглобах нижньої кінцівки — тазостегновому, колінному, гомілковостопному.

По завершенні діагностичного етапу настроювання програми керування каналами електростимулятора комунікаційний кабель зв'язку з персональним комп'ютером відключається і від'єднується, і пацієнт автономно проводить сеанс лікування за програмами, що адаптуються під темп ходьби, реалізованими за допомогою портативного мікропроцесорного пристрою, який носять на поясі, з автономним живленням від батарей акумуляторного типу. Отримані індивідуальні параметри стимуляції пацієнта зберігаються в пам'яті комп'ютера у вигляді файлу. У пацієнтів, які самостійно пересуваються, і у здорових синхронізація фаз м'язової стимуляції досягається завдяки поточному аналізу значень одного чи декількох суглобних кутів з побудовою (композицією) і збереженням у базі даних гоніометричних профілів подвійного крокового циклу.

Пацієнтів, яким самостійне пересування недоступне, також можна лікувати із застосуванням описаної технології: вони роблять крок на місці опори, відтворюють циклічну м'язову активність на велотренажері або використовують методику віброstimуляції опорних зон стопи як синхронізуючий вплив для керування роботою каналів електростимуляції.

3.2.4. Технологія синтезу біологічно адекватної системи керування рухами

Сучасний етап розробки апаратів для відновлення і тренування рухів характеризується синтезом біологічно адекватних БТС керування рухами.

Інформаційно-структурна модель організації біологічно адекватної БТС керування складається з таких етапів (рис. 3.12):

- формулювання мети;
- вибір методу керування;
- виділення і характеристика об'єкта керування; цей крок передбачає на основі аналізу літературних даних, експериментальних і модельних досліджень виявлення властивостей і характеристик об'єкта керування, виділення контуру біологічної системи, у функціонування якої може втрутитися БТС керування, реалізуючи гомеостазис щодо поставленої мети;



Рис. 3.12. Інформаційно-структурна модель організації біологічно адекватного керування

- визначення ступеня адекватності БТС керування; цей крок передбачає порівняльний аналіз властивостей і характеристик виділеного контуру біосистеми за природного керування та керування за допомогою БТС;

- встановлення принципів і критеріїв біологічно адекватного, керування, відповідно до яких проводять:

- обґрунтування вибору керуючих сигналів, їх речовинної, інформаційної та енергетичної компонент;

- визначення способу, топології та регламенту керуючих сигналів;

- обрання координат, якими керують (параметрів, характеристики об'єкта керування), у тому числі для контурів зворотного зв'язку;

- уточнення обраного методу керування.

На рис. 3.13 представлено інформаційно-структурну модель принципів і критеріїв, сформульованих стосовно біологічно адекватного керування рухами. В даному випадку обраний метод керування — програмна електростимуляція м'язів.

Слід зазначити, що наведені принципи інваріантні щодо об'єкта керування. Наведені критерії, які забезпечують виконання відповідних принципів, проблемно-орієнтовані на керування рухами, зв'язані з метою, об'єктом керування. Показово, що вербальне встановлення критеріїв сприяло уточненню методу. Так, критерії «мінімізація стомлення м'язів» і «комплексність аферентної інформації» привели до усвідомлення необхідності використання в БТС керування рухами не тільки методу програмної електростимуляції м'язів, а й методу біологічного зворотного зв'язку, що сприяє встановленню руху у взаємозв'язку із зоровим, слуховим і тактильним аналізаторами. Саме використання двох методів та їхнього поєднання дало можливість синтезувати біологічно адекватну БТС керування рухами, структура якої може гнучко змінюватися, забезпечуючи формування рухів пацієнта, адекватне стану його рухових функцій і етапу реабілітації. Зазначена технологія була реалізована в терапевтичних апаратах «Біоміотон» (6 каналів), «Біоформ» (4 канали), а також в апараті персонального тренування рухів «Тренар» (2 канали).

Зупинимось детальніше на цих розробках.

Апарат «Біоміотон» працює в трьох режимах:

1. «Програмна електростимуляція» (примусові скорочення м'язів).

2. «Активна електростимуляція» (електростимуляція з біологічним зворотним зв'язком — довільно-примусові скорочення м'язів).

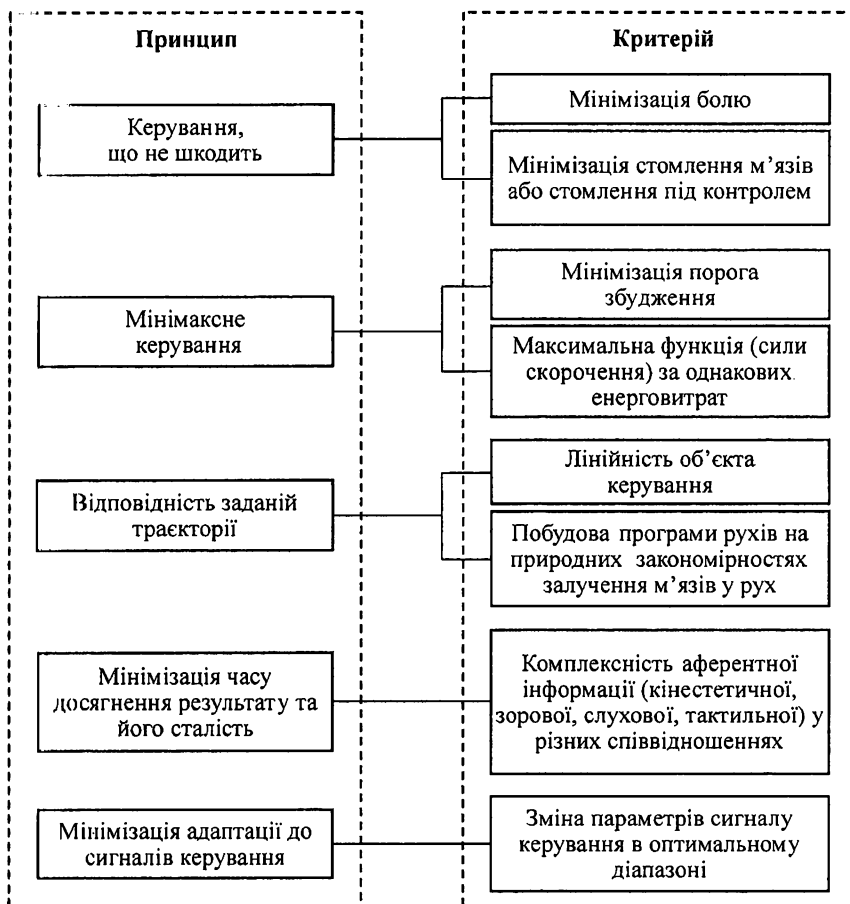


Рис. 3.13. Інформаційно-структурна модель принципів і критеріїв біологічно ідеального керування рухами

3. «Активний» (режим біологічного зворотного зв'язку — допільні скорочення м'язів).

Перший режим (рис. 3.14) використовується для лікування хворих, у яких рухові функції втрачені частково або цілком. Примусове скорочення-розслаблення паралізованих м'язів пацієнта відбувається під впливом електростимуляції за програмою, що надіється або датчиком циклічних програм по 6 незалежних каналах, або здоровими м'язами іншої людини-донора, або здоровими м'язами самого пацієнта, функціонально не навантаженими під

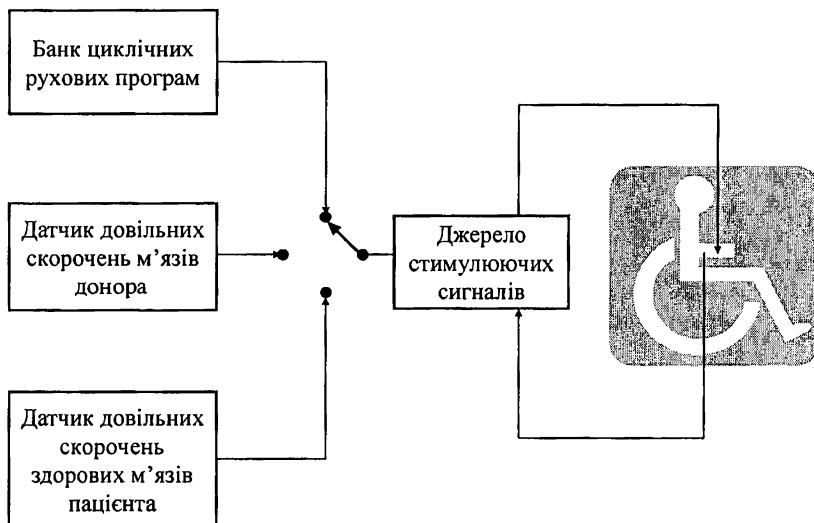


Рис. 3.14. Структурно-функціональна схема апарата «Біоміотон» у режимі «програмна електростимуляція» (примусові скорочення м'язів пацієнта)

час електростимуляції. Щоб одержати штучно синтезовані програми, які наближаються до природних, треба забезпечити свободу змін тривалості «посилок» і «пауз» імпульсів стимуляції в кожному каналі багатоканальної системи і свободу сполучень (поєднань) різних тривалостей «посилок» і «пауз» у каналі і між каналами. Тривалість «посилки» імпульсів визначає тривалість активної фази скорочення м'яза, а тривалість «паузи» — її пасивне розслаблення. Тільки досить гнучка структура рухової програми може забезпечити складні кореляційні відносини між моментами залучення м'язів, що стимулюються, у виконання певного руху.

Другий режим (рис. 3.15) використовується для лікування хворих, у яких сигнал, що надходить від мозку до м'язів, занадто слабкий, щоб скоротити останні, але достатній, щоб бути вловленим електроміографічним детектором. Примусове скорочення-розслаблення паралізованих м'язів відбувається під впливом електростимуляції, що запускається ЕМГ-сигналом, який виникає в результаті активної спроби пацієнта виконати довільний рух. Тренування пацієнта спрямоване на збільшення рівня цього сигналу, що посиляється від мозку до м'язів, в умовах моніторингу рівня цього сигналу по каналу зорового зворотного зв'язку. Внесок довільного і примусового скорочення м'язів у формування руху регулюється

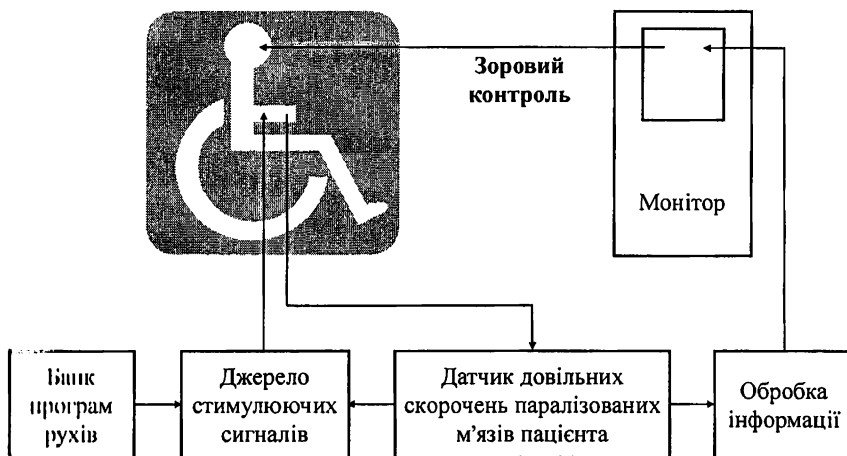


Рис. 3.15. Структурно-функціональна схема біологічно адекватної системи керування рухами у режимі «активна електростимуляція»

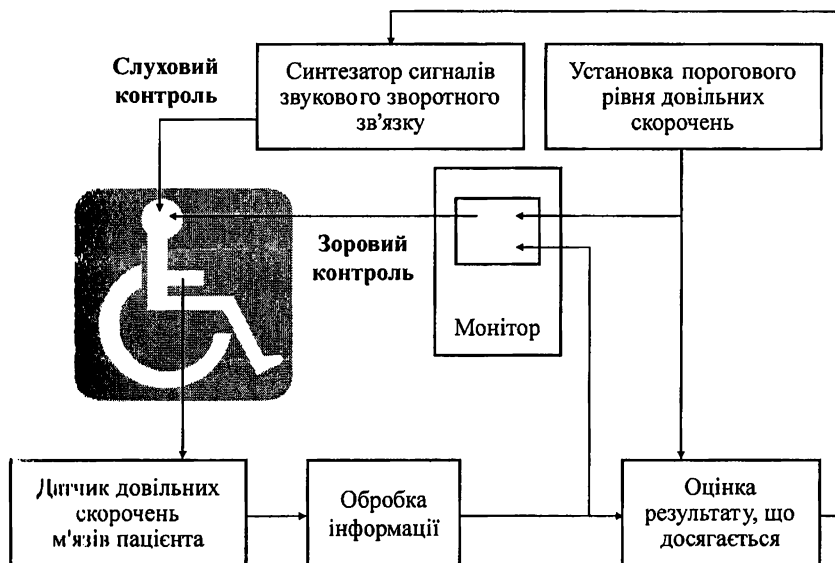


Рис. 3.16. Структурно-функціональна схема біологічно адекватної системи керування рухами в активному режимі

оператором або пацієнтом залежно від стану рухових функцій за допомогою зміни чутливості електроміографічного детектора.

Третій режим (рис. 3.16) використовується для лікування хворих, у яких не цілком втрачені рухові функції й які здатні довільно скорочувати свої м'язи. У цьому режимі оператор або пацієнт встановлює цільову функцію — поріг довільних скорочень, рівень якого залежить від стану рухових функцій і відображається на моніторі. Пацієнт довільно скорочує-розслаблює м'язи, візуально контролюючи рівень довільних скорочень, порівнює поточний рівень із встановленим порогом за допомогою зорового і слухового зворотних зв'язків. По досягненні поточного рівня довільних скорочень встановленого порога подається звуковий сигнал, що інформує пацієнта про успішність виконання цільової функції. Тренування пацієнта спрямоване на наближення рівня довільних скорочень-розслаблень м'язів до норми. Забезпечуючи безупинний контроль цільової функції руху, біологічний зворотний зв'язок надає пацієнту можливість точніше оцінити успіх при виконанні конкретного завдання. Ефективність методу забезпечує можливість активної участі самого пацієнта в процесі лікування і поетапного ускладнення рухових навичок, що відпрацьовуються.

В усіх БТС керування рухами системоутворювальним фактором виступають такі цілі:

- формування рухів у людини з порушеними руховими функціями як поточна мета керування;
- відновлення порушених чи втрачених рухових функцій як кінцева мета керування.

Таким чином, у структуру біотехнічної системи «Біоміотон» входять функціональні блоки, що забезпечують формування рухів пацієнта на основі як довільних скорочень м'язів за допомогою біологічного зворотного зв'язку, так і «викликаних» скорочень за допомогою програмної електростимуляції м'язів (рис. 3.17).

Використання двох методів та їх поєднання дало можливість синтезувати біологічно адекватну БТС керування рухами, структура якої може гнучко змінюватися, забезпечуючи оптимальне формування рухів пацієнта, адекватне стану його рухових функцій і етапу реабілітації. Внесок довільних і викликаних скорочень м'язів у формування руху має визначатися етапом реабілітації і регулюватися безпосередньо пацієнтом або оператором залежно від стану рухових функцій пацієнта.

Поєднання двох методів дає змогу здійснювати багатоцільове тренування рухів, використовуючи різні режими тренування для:

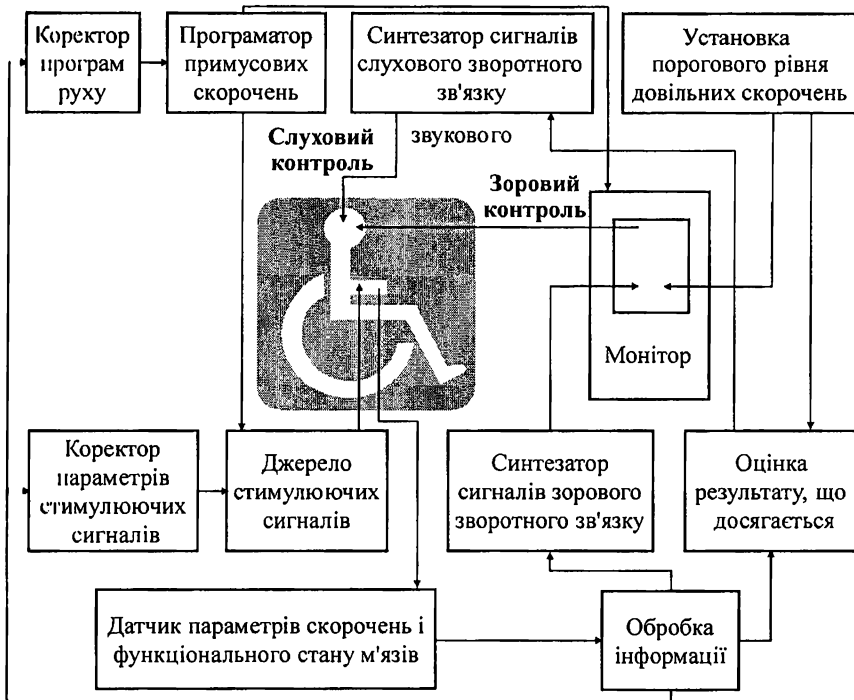


Рис. 3.17. Структурно-функціональна модель біологічно адекватного формування тренування рухів з метою їх відновлення

- відновлення рухових функцій, порушених в результаті тяжких захворювань нервово-м'язової системи (наслідків інсульту, ДЦП, неврити лицьового нерва та ін.), травм і т. д.;

- тренування м'язів за дефіциту навантажень, в умовах гіпокінезії і гіподинамії (наприклад, у разі тривалого перебування на лікарняному ліжку);

- цілеспрямованого тренування спортсменів і практично здорових людей, які прагнуть підтримати тонус і витривалість м'язів.

Технологію багатоцільового біологічно адекватного тренування рухів з розширеними режимами тренування реалізовано апаратами «Біоформ» і «Тренар». Як і в апараті «Біоміотон», основу підходів до формування/тренування рухів в апаратах «Біоформ» і «Тренар» становлять:

- метод програмної електростимуляції м'язів, який дає змогу використовувати пацієнту певні, обумовлені метою тренування, рухи за

штучно синтезованими моделями (програмами), що імітують нормальні природні довільні рухи, або за моделями, побудованими на «електроміографічних образах» природних довільних рухів;

- метод біотренування за допомогою біологічних зворотних зв'язків (зорових і слухових) з використанням «інформаційного образу руху» — для тренування довільних рухів;

- метод порогової (тригерної) електростимуляції, коли процес нав'язування пацієнту вимушених рухів запускається спробою пацієнта довільно скоротити м'язи, які беруть участь у виконанні рухів, що тренуються, і подоланням певного порога довільних скорочень м'язів.

Структурно-функціональну схему апаратів «Біоформ» і «Тренар» показано на рис. 3.18. Апарати «Біоформ» і «Тренар» забезпечують формування і тренування рухів у режимах:

- «Програматор—Реципієнт» — за штучно синтезованими програмами, що імітує довільні скорочення м'язів;

- «Донор—Реципієнт» — за програмами, побудованими на «електроміографічних образах» довільних скорочень м'язів здорової людини;

- «Взаємостимуляція», «Аутоstimуляція», «Пам'ять» — за програмами «електроміографічних образів» довільних скорочень власних здорових м'язів;

- «Порогова електростимуляція» і «Біотренування» — в умовах візуального і слухового моніторингу рухів, що тренуються.

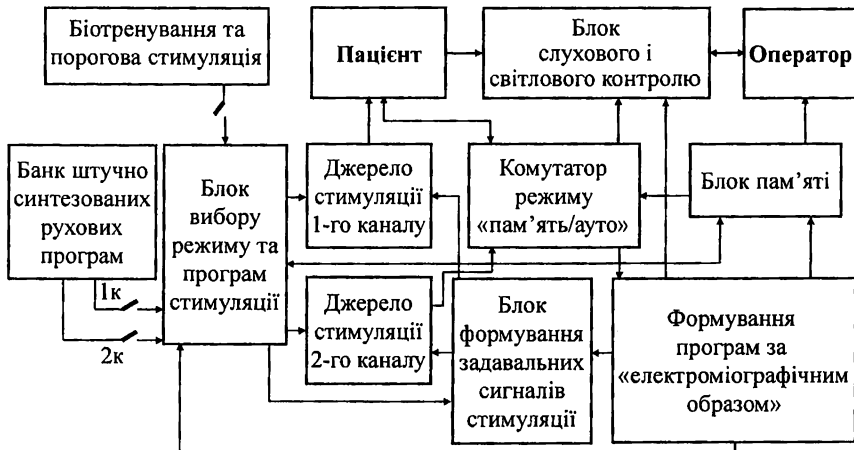


Рис. 3.18. Загальна структурно-функціональна схема апаратів «Біоформ» і «Тренар» (два канали)

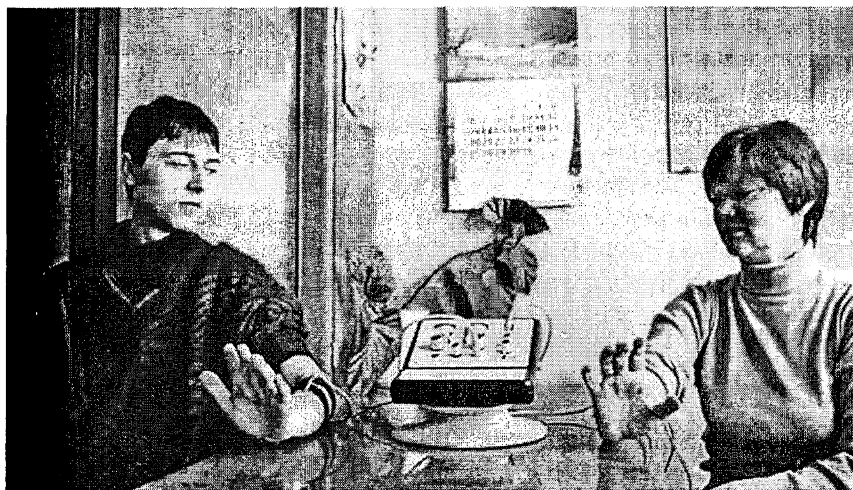


Рис. 3.19. Тренування рухів за допомогою апарата «Тренар». Програма рухів пацієнту (праворуч) надходить від інструктора



Рис. 3.20. Самостійне тренування рухів за допомогою апарата «Тренар». Програма рухів надходить від власних здорових м'язів пацієнта

Технічні характеристики апаратів «Біоформ» і «Тренар» представлено відповідно у табл. 3.1 і 3.2.

Слід зазначити, що апарат «Тренар» за своїми відмінними технічними характеристиками (автономне живлення, малі габарити і маса, різноманітні режими тренування рухів) є прикладом апарата персонального надання тренувальних послуг, який дає змогу людині з вадами рухових функцій продовжити курс лікування в домашніх умовах, що дешевше, ніж у стаціонарі.

Комбіноване використання методів програмної стимуляції та біологічного зворотного зв'язку за електроміограмою відкрило нові можливості в реабілітації завдяки координуючій ролі рухового, зорового і слухового аналізаторів у навчанні кори головного мозку здійснювати керування рухами. «Біоформ» і «Тренар» надають різні режими тренувань, побудовані на різних методах, дають можливість лікарю індивідуально підходити до лікування. Це відкриває унікальні можливості в реабілітації рухових функцій і тренуванні рухових навичок. Технологія тренувань за допомогою апаратів «Біоформ» і «Тренар», що активно залучає пацієнта у тренувальний процес, спрямована на відновлення реципрокних відносин, які є основою нормального виконання кожного природного рухового акта. Останні є також могутнім інструментом виховання нового рухового стереотипу, що враховує індивідуальні особливості пацієнта. Позитивним моментом описаної технології є те, що, наприклад, у режимі «взаємостимуляція» пацієнт може

Таблиця 3.1. Основні технічні характеристики апарата «Біоформ»

Параметр	Норма
Кількість каналів у режимах «Програматор»	4
«Донор», «Взаємостимуляція», «Аутостимуляція», «Пам'ять», «Порогова стимуляція», «Біотренування»	2
Стимулюючий сигнал	5
синусоїдальний, кГц	25; 50
максимальна амплітуда, мА	4
Кількість типів рухових програм	10, 20, 40, 60
Тривалість одного циклу програми, с	50 Гц; 220 В
Живлення	30
Максимальна споживана потужність, ВА	370×170×220
Габаритні розміри, мм	7,0
Маса, кг	

уникати монотонних тренувань, самостійно гнучко перестроювати ритм та інтенсивність рухів, поступово ускладнюючи завдання.

Головними критеріями, що визначають властивості біологічно адекватних БТС керування рухами та її структурних елементів, є такі:

- комплексність пропріоцептивної і результативної аферентики, що досягається реалізацією в БТС методів програмної електростимуляції, біологічного зворотного зв'язку і цілеспрямованого на досягнення ситуаційної і кінцевої мети поєднання обох методів;

- зміна режиму тренування, ускладнення тренувальних завдань, тренування швидких і повільних волокон м'язів, що досягається різними режимами тренувань, побудованими на різних методах активації резервів організму виконувати системний руховий гомеостаз;

Таблиця 3.2. Основні технічні характеристики апарата персонального тренування рухів «Тренар»

Параметр	Норма
Кількість каналів	2
Стимулюючий сигнал	Радіоімпульсний
Параметри імпульсів:	
частота, Гц	5 ÷ 200
скважність	6
заповнення: синусоїда, Гц	5000
меандр, Гц	5000
Максимальна амплітуда сигналу, мА	50,0
Програматор:	
кількість типів рухових програм	3
діапазон тривалості одного циклу програми, с	6—30
співвідношення тривалості «активна фаза стимуляції — пауза»	1:2
Живлення	Автономне з підзарядкою
Максимальна споживана потужність не більше, ВА	1,5
Тип конструкційного виконання	Переносний, з автономним живленням
Корпус	Пластмасовий, з металевими фальшпанелями
Розміщення органів індикації, контролю та керування	Всі на передній панелі
Габаритні розміри, мм	60×205×235
Маса, кг	1,8

- максимізація функції (сили скорочення) за однакових енерговитрат, мінімізація болю, стомлення, адаптації, що досягається оптимізацією параметрів стимулюючого сигналу (частоти та амплітуди імпульсів стимуляції);
- синтез рухових програм (моделей рухів), наближених до природних, що досягається регламентацією посилок-пауз стимулюючого сигналу, побудованою на природних закономірностях залучення м'язів у рух, або програм, побудованих на «електроміографічних образах» природних довільних рухів.

Наведені критерії біологічно адекватної організації процесу відновлення рухової активності і тренування рухів, що запускають і стимулюють резерви організму на підтримку гомеостазу рухової системи, відновлення і корекцію рухів, збільшення сили та витривалості м'язів, були покладені в основу інформаційної технології цілеспрямованого «образного» керування рухами людини, розглянутої в 3.2.5.

Завершуючи цей розділ зазначимо, що неодмінною умовою подальшого розвитку технології синтезу БТС керування рухами людини є розробка структури і функціонального наповнення банку знань з метою оптимізації «маршруту» лікування пацієнта. Функціональне призначення банку знань — допомогти лікарю визначити:

- метод формування рухів: програмна електростимуляція (примусове скорочення м'язів), активна електростимуляція — електростимуляція з біологічним зворотним зв'язком (довільно-примусове скорочення м'язів) або біокерування (довільне скорочення м'язів під контролем біологічного зворотного зв'язку);
- модель руху — програму послідовності залучення м'язів у виконання необхідного руху;
- топологію та регламент сигналів керування, координати керування;
- адекватно-оптимальні параметри стимулюючих сигналів — амплітуду, частоту, тривалість імпульсів залежно від функціонального стану м'язів і етапу реабілітації.

Зрозуміло, що оптимізація «маршруту» лікування спирається на діагностику стану рухових функцій пацієнта. Банк знань таких БТС покликаний інтегрувати медично верифікований продукт для підтримки системного гомеостазу рухових функцій людини.

Варто звернути увагу на те, що банк знань будь-якої біотехнічної системи утворюється детермінованим комп'ютерним банком знань і евристичним, на основі медичних знань лікаря. Лікар може втручатися у виконання комп'ютерного алгоритму об-

робки інформації на будь-якому етапі з метою зміни остаточного висновку. Крім того, лікар регламентує вид і часову послідовність впливів на об'єкт дослідження і керування. При цьому в міру накопичення досвіду інтуїтивне мислення лікаря має переходити в банк знань.

3.2.5. Біотехнічні системи керування рухами як цілеспрямовані. «Образне» керування рухами

Зупинимося на поняттях «система», «біологічна система», «цілеспрямована система».

Система — множина елементів, які знаходяться у відносинах і зв'язках один з одним, що утворюють певну цілісність, єдність.

Біологічна система — складна система, яка має ряд специфічних особливостей, що характеризують життя і відрізняють її від неживих систем здатністю рости, розмножуватися, реагувати на зовнішні впливи і змінюватися. Вони можуть сприймати, зберігати і переробляти інформацію, формувати складні керуючі реакції. Однією з головних властивостей біологічної системи є структурна і функціональна складність. Біологічній системі властиві динамічність структурно-функціональної організації і динамічність взаємодії із середовищем.

Поняття *цілеспрямованої системи* як системи, мета функціонування якої (кінцева і/чи ситуаційна) є системоутворювальним фактором структурно-функціональної організації її елементів (підсистем), може бути цілком віднесене до біологічної системи. У будь-якій біологічній системі структура і функція являють собою єдине ціле, причому функціональний ефект біосистеми досягається за рахунок її внутрішнього структурування. Єдність структури і функції біосистеми формується в процесі взаємодії із середовищем і є проявом адекватності біосистеми середовищу.

Ієрархічно вищою *метою* будь-якої біосистеми є самозбереження, тобто *збереження життя*. Окремими проявами самозбереження біосистем є адаптація і гомеостаз (див. 3.2.1). Гомеостаз як єдність протилежностей — сталості та мінливості — являє собою адаптаційну властивість організму пристосовуватися до умов навколишнього середовища. Самозбереження біосистеми як мети означає її здатність підтримувати і зберігати свій стаціонарний нерівноважний стан поза залежністю від умов зовнішнього середовища.

Ще в 30-ті роки минулого століття академік П.К. Анохін розробив теорію *функціональної системи*, згідно з якою біосистема

розглядається як цілеспрямована. Фундаментальним є положення П.К. Анохіна про роль результату як чинника, що утворює функціональну систему. Як він справедливо зазначає, усі визначення систем є неповними через відсутність зв'язку роботи системи з необхідним кінцевим результатом. Якщо І.П. Павлов, висунувши принцип динамічного зрівноважування організму із середовищем, кінцевою природною метою вважав виживання, що досягається організмом, який живе в цьому середовищі і пристосовується до нього, то теорія функціональної системи П.К. Анохіна розкриває, як організм може досягти цієї кінцевої мети, які механізми мають для цього діяти. Одним із основних механізмів, за П.К. Анохіним, є аферентний синтез: біосистема сама на основі внутрішніх процесів ухвалює рішення про те, який результат потрібен у даний момент її пристосувальної діяльності (ситуаційна мета), що вимагає замикання зворотного зв'язку. У визначенні *функціональної системи* П.К. Анохін прямо називає мету, що розуміється як «конкретний результат діяльності»..., її «системоутворювальний фактор». «... системою можна назвати тільки такий комплекс компонентів, що вибірково втягнуті, у яких взаємодія і взаємозв'язок набувають характеру взаємосприяння компонентів для одержання фіксованого корисного результату». Наявність результату системи як визначального фактора для формування функціональної системи і наявність специфічної будови структурних апаратів, що дають можливість негайної мобілізації об'єднання їх у функціональну систему, вказує на те, що системи організму завжди функціональні. Це означає, що функціональний принцип вибіркової мобілізації структур є домінуючим. Структурні утворення, що складають функціональні системи, мають винятково рухливу спроможність мобілізуватися. Саме ця властивість систем і дає їм можливість бути пластичними, раптово змінювати свою архітектоніку в пошуках запрограмованого корисного результату.

Розуміння біосистеми як цілеспрямованої, роль аферентного синтезу у досягненні кінцевого результату і функціонального принципу вибіркової мобілізації структур біосистеми, раптової зміни її архітектоніки для досягнення корисного результату — все це треба враховувати при синтезі біотехнічної системи керування як цілеспрямованої.

Слід зазначити, що функція керування рухами — одна з найзагальніших функцій діяльності мозку. Регуляцію рухових актів можна розглядати як цілеспрямовану діяльність — виконання координованих цілеспрямованих рухів.

Зупинимось ще на такому понятті, як «інтелектуалізація керування». Під керуванням звичайно розуміють функцію організованих систем різної природи (біологічних, соціальних, технічних), що забезпечують збереження їхньої певної структури, підтримку режиму діяльності, реалізацію їхніх програм.

Проблема інтелектуалізації керуючих впливів випливає з аналізу того, наскільки гнучко вони можуть адаптуватися для розв'язання широкого класу задач зі штучної підтримки внутрішньосистемного і системно-середовищного гомеостазу тією чи іншою фізіологічною системою. Керуючі впливи можна вважати інтелектуальними, якщо вони можуть гнучко змінювати свою структуру, режим діяльності за різних видів взаємодії (речовина, енергія та інформація) з організмом людини, його фізіологічними системами.

Здатність до адаптації — необхідна властивість інтелектуально керування. Для забезпечення адаптаційних властивостей треба, щоб керуючий вплив мав безліч зв'язків з об'єктом керування і розмаїтість робочих режимів керування, що дасть змогу стимулювати внутрішні резерви організму адекватно його стану.

Ідеї гомеостазу рухової системи, його індивідуальності й індивідуальності порушення у разі рухової патології, ідеї індивідуальної мобілізації внутрішніх резервів організму, що залежить від глибини патології та етапу реабілітації за допомогою керуючих впливів, було покладено в основу розробки індивідуально спрямованої технології формування рухів. Ця технологія реалізована БТС керування рухами «Біоформ» і «Тренар».

При формуванні-тренуванні рухів в умовах патології рухових функцій за допомогою БТС керування рухами ставлять собі за мету:

- виділити структурні і/чи функціональні порушення рухової системи, тобто виділити відсутні ланки підтримки її гомеостазу;
- розробити керуючі впливи (методи, алгоритми керуючих сигналів і засоби), що усувають порушення внутрішньосистемного гомеостазу рухових функцій або замінюють відсутні ланки підтримки гомеостазу;
- розробити керуючі впливи, що мобілізують внутрішні резерви з підтримки рухового гомеостазу.

У розділі 3.1.1 зазначалося, що БТС як система формується кінцевою метою її функціонування, тобто кінцева мета функціонування БТС є її системоутворювальним фактором. У певних випадках для досягнення кінцевої мети необхідне поетапне досягнення

ситуаційної мети — єдність ситуаційної та кінцевої мети. У цьому разі ситуаційна мета є системоутворювальним фактором структури БТС на своєму етапі функціонування. Таким чином, у БТС відновлення рухів доцільно передбачати можливість гнучкої зміни її структури відповідно до стану рухових функцій, що й забезпечує біологічну адекватність керування та єдність його ситуаційної і кінцевої мети, а саме:

- забезпечення режиму формування руху в людини з порушеними руховими функціями, адекватного стану рухової системи — ситуаційна мета;
- відновлення порушених або втрачених рухових функцій — кінцева мета.

Беручи до уваги єдність ситуаційної і кінцевої мети, формування/тренування рухів, що виконуються на базі БТС, доцільно здійснювати за допомогою різних методів і режимів, обумовлених ситуаційною метою на різних етапах реабілітації (рис. 3.21):

- *програмної електростимуляції м'язів*, що дає змогу нав'язувати пацієнту певні, обумовлені ситуаційною метою тренування, рухи за моделями (програмами) штучно синтезованими, які імітують природні довільні рухи (режим «Програматор—Реципієнт»), чи за моделями, побудованими на «електроміографічних образах» довільних рухів (режими «Донор—Реципієнт», «Взаємостимуляція», «Автостимуляція—Пам'ять»), — на першому етапі. На цьому етапі ресурсами керування виступають внутрішні резерви (ВР) організму та енергетично інформаційне керування (ЕІК) — програмна електростимуляція з використанням «електроміографічного образу» руху;

- *порогової електростимуляції*, за якої процес нав'язування пацієнту змусених рухів запускається його спробою довільно скоротити м'язи, що беруть участь у виконанні рухів, які тренуються, і подоланням певного порога (ситуаційна мета) довільних скорочень м'язів, який встановлюється оператором або пацієнтом (режим «Порогова електростимуляція») — на другому етапі. На цьому етапі композицію ресурсів керування складають ВР і ЕІК зі зсувом, обумовленим порогом електростимуляції;

- *біотренування за допомогою біологічних зворотних зв'язків* (зорових і слухових) з використанням «інформаційного образу руху» (ситуаційна мета) для тренування довільних рухів (режим «Біотренування») — на третьому етапі. На цьому етапі композицію ресурсів керування складають ВР і інформаційне керування (ІК) — зоровий і слуховий образи руху.

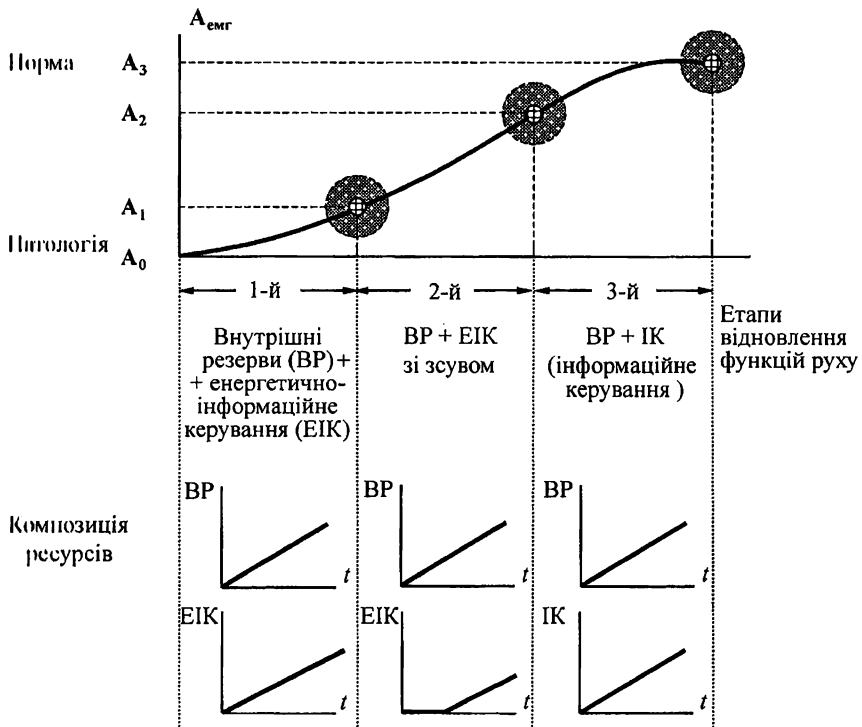


Рис. 3.21. Біологічно адекватне формування рухів за допомогою БТС:

$A_{\text{емг}}$ — амплітуда електроміограми. Інші позначення у тексті

Етапи цілеспрямованого відновлення рухових функцій із зазначенням ситуаційної мети, засобів і результатів керування подображені в табл. 3.3.

Таким чином, різні режими формування і тренування рухів забезпечують адекватність керуючих впливів стану рухової системи, дають змогу індивідуально на кожному етапі реабілітації організувати процес формування—тренування рухів (ситуаційна мета) аж до повного відновлення рухів (кінцева мета), поетапно мобілізуючи резерви організму на відновлення рухів залежно від етапу рухових функцій пацієнта на кожному етапі реабілітації. Системоутворювальним фактором структурно-функціональної організації біологічно адекватної системи керування рухами є єдність ситуаційної і кінцевої мети функціонування БТС. З цього погляду такі системи є цілеспрямованими на підтримку рухового гомеостазу у разі патології рухових функцій і на його відновлення.

Т а б л и ц я 3.3. Цілеспрямоване відновлення рухових функцій на кожному етапі реабілітації

Показник цілеспрямованості	Етап реабілітації		
	Перший	Другий	Третій
Ситуаційна мета	Запуск і стимуляція резервів власних регулювальних систем з підтримки гомеостазу рухової системи — формування вимушених скорочень м'язів	Збільшення вкладу власних регулювальних систем порівняно із зовнішніми керуючими впливами з підтримки гомеостазу — тренування довільно-вимушених скорочень м'язів	Тренування (розширення) резервів власних регулювальних систем з підтримки гомеостазу — тренування довільних скорочень м'язів
Засоби	Зовнішні керуючі впливи у режимах: «Програматор—Реципієнт», «Донор—Реципієнт», «Взаємостимуляція»	Комбіновані: зовнішні керуючі впливи і власні регулювальні системи у режимах: «Порогова електростимуляція», «Аутоstimуляція—Пам'ять»	Власні регулювальні системи у режимі «Біотренування» за допомогою БЗЗ з використанням зорових та слухових «інформаційних образів» руху
Результати	Встановлення зв'язку — між виконавцями команд (м'язами) та моторною зоною кори: пропріоцептивна аферентація	Збільшення вкладу довільних скорочень м'язів порівняно з вимушеними при виконанні заданого руху: результативна аферентація	Наближення довільних скорочень м'язів до норми

З іншого погляду, БТС керування рухами «Біоформ» і «Тренар» є прикладом реалізації інформаційної технології сприйняття, обробки і передачі знань про рухову діяльність людини, поданих у вигляді образу руху, та формування динамічного образу рухів людини для стимулювання її рухової активності. Так, в основу технології покладено ідею сприйняття образів рухів моторною зоною кори головного мозку за рахунок комбінованої активності надходження інформації про ступінь скорочення м'язів, що виконують рух, по каналах зворотних зв'язків, а саме:

- активації надходження пропріоцептивної інформації у вигляді «електроміографічних образів» руху на основі методу пропріоцептивної електростимуляції м'язів;
- активації надходження результативної інформації у вигляді формалізованих зорових та слухових образів ступеня скорочень м'язів за методом біокерування (БЗЗ).

(Лід зазначити, що біологічний зворотний зв'язок — це усвідомлений зворотний зв'язок. БЗЗ завжди припускає (передбачає) мету, цілеспрямованість, включення свідомості на виконання завдання).

Наведена інформаційна технологія забезпечує можливість стимулювання рухової активності людини шляхом виконання програм на основі:

- «електроміографічного» образу власних здорових рухів (режим *«Взаємостимуляція»*);
- електроміографічних образів здорових рухів іншої людини (режим *«Донор—Реципієнт»*);
- гнучко синтезованих програм (режим *«Програмактор»*);
- копіювання електроміографічних образів довільних скорочень здорових м'язів (режими *«Копія»* та *«Аутокопія»*);
- прицільного тренування довільно-вимушених рухів з появою найменших ознак довільних скорочень м'язів за методом порогової стимуляції. Тренування націлене на збільшення амплітуди довільних рухів з метою наближення їх до здорових — режим *«Порогова стимуляція»*;
- прицільного тренування довільних рухів, підтримання тонусу та витривалості рухів за методом біокерування, використовуючи біологічний зворотний зв'язок (зоровий та слуховий) — режим *«Біотренування»*.

Технологія формування інформаційних образів рухів (електроміографічних, формалізованих зорових і слухових) і активації сприйняття їх моторною зоною кори відкрила нові можливості у реабілітації та тренуванні рухових функцій людини завдяки координаційній ролі рухового, зорового та слухового аналізаторів у інтеграції моторної зони кори здійснювати рухи. Таку технологію можна використовувати не тільки для відновлення рухових функцій у дорослих і дітей, порушених внаслідок тяжких захворювань нервово-м'язової системи, травм тощо, а й для підтримки тонусу і витривалості м'язів практично здорових людей і спортсменів, тренування м'язів в умовах дефіциту навантажень, релаксації м'язів.

- активації надходження пропріоцептивної інформації у вигляді «електроміографічних образів» руху на основі методу програмної електростимуляції м'язів;
- активації надходження результативної інформації у вигляді формалізованих зорових та слухових образів ступеня скорочень м'язів за методом біокерування (БЗЗ).

Слід зазначити, що біологічний зворотний зв'язок — це усвідомлений зворотний зв'язок. БЗЗ завжди припускає (передбачає) мету, цілеспрямованість, включення свідомості на виконання завдання.

Наведена інформаційна технологія забезпечує можливість стимулювання рухової активності людини шляхом виконання програм на основі:

- «електроміографічного» образу власних здорових рухів (режим *«Взаємостимуляція»*);
- електроміографічних образів здорових рухів іншої людини (режим *«Донор—Реципієнт»*);
- штучно синтезованих програм (режим *«Програматор»*);
- копіювання електроміографічних образів довільних скорочень здорових м'язів (режими *«Копія»* та *«Аутокопія»*);
- прицільного тренування довільно-вимушених рухів з появою найменших ознак довільних скорочень м'язів за методом порогової стимуляції. Тренування націлене на збільшення амплітуди довільних рухів з метою наближення їх до здорових — режим *«Порогова стимуляція»*;
- прицільного тренування довільних рухів, підтримання тону та витривалості рухів за методом біокерування, використовуючи біологічний зворотний зв'язок (зоровий та слуховий) — режим *«Біотренування»*.

Технологія формування інформаційних образів рухів (електроміографічних, формалізованих зорових і слухових) і активації сприйняття їх моторною зоною кори відкрила нові можливості у реабілітації та тренуванні рухових функцій людини завдяки координаційній ролі рухового, зорового та слухового аналізаторів у навчанні моторної зони кори здійснювати рухи. Таку технологію можна використовувати не тільки для відновлення рухових функцій у дорослих і дітей, порушених внаслідок тяжких захворювань нервово-м'язової системи, травм тощо, а й для підтримки тону та витривалості м'язів практично здорових людей і спортсменів, тренування м'язів в умовах дефіциту навантажень, релаксації м'язів.

7. (Основним завданням підприємки гомеостазу виконання руху є пошук інформативних параметрів координаційної структури рухів і вибір керуючих впливів залежно від стану руху-них функцій на момент керування.

8. Згідно з принципом біологічної адекватності керування руху-чани людини слід передавати можливість гнучкої зміни струк-тури БТС відповідно до стану рухових функцій, що забезпечує імітацію ситуаційної і кінцевої цілей керування.

9. Лосатнення ситуаційної мети керування руховими функціями здійснюється за допомогою різних методів і режимів тренування:

- програмної електростимуляції м'язів, що дає можливість нав'язувати пацієнту певні, обумовлені ситуаційною метою тре-нування, рухи за моделями, основою яких є «електроміографічний образ»;
- порогової електростимуляції, за якої процес нав'язування пацієнту вимушених рухів запускається його спробою довільно скоротити м'язи;
- біокерування, що дає змогу тренувати ловильні рухи за до-помогою біологічних зворотних зв'язків (зорових і слухових) з мікросистемним «інформативним образом» руху;

5. Головними критеріями, що визначають властивості біо-логічно адекватної БТС керування рухами і її структурних еле-ментів, є такі:

- комплексність пропріоцептивної і регуляторної аферентації, що досягається реалізацією в БТС методів програмної електрич-ної стимуляції, біологічного зворотного зв'язку і цілеспрямованого на до-сягнення ситуаційної і кінцевої мети поводіння обох методів;
- зміна режиму тренування, ускладнення тренувальних зав-дань, тренування швидких і повільних волокон м'язів, що дося-гається різними режимами тренувань, побудованими на різних методах активації резервів організму виконувати системний ру-ховий гомеостаз;

- максимізація функцій (сили скорочення) за однаковим співвідношенням, мінімізація болю, стомлення, адаптації, що дося-гається оптимізацією параметрів стимулюючого сигналу (частоти і амплітуди імпульсів стимуляції);

- синтез рухових програм (моделей рухів), наблизжених до природних, що досягається реалізацією пошук-пауз стиму-люючого сигналу, побудованою на природних закономірностях кінучення м'язів у рух, або програм на основі «електроміогра-фічних образів» природних ловильних рухів.

Особливого значення у реабілітації і тренуванні рухів набуває режим «Взаємостимуляція». Самопрограмування рухів за цим режимом сприяє відновленню функцій рухового аналізатора задавати команди для виконання руху, тобто наважати нові нейрони рухового аналізатора ініціювати рух і керувати рухами за програмою, які задає сам пацієнт, рпунувати нейронні ансамблі з відно-

На відміну від звичайної програмної стимуляції, побудованої на штучно синтезованих програмах або на програмах, що задають здорові м'язи іншої людини, при взаємостимуляції функції рухового аналізатора відновлюються за рахунок не тільки кінестетичного зворотного зв'язку, а й перекресних впливів головного мозку. При взаємостимуляції, коли пацієнту під час тренувань пред'являють формалізовані зорові і слухові образи рухів, здорових і тих, що тренуються, алгоритм відновлення порушених рухових функцій такий: ініціалізація і виконання до-вільного здорового руху — виконання вимушеного (під впливом електростимуляції) руху, що тренується, — надходження інформації про виконаний рух в уражені структури головно-ного мозку по каналах зворотних зв'язків у кінестетичний, зоровий і слуховий аналізатори. При цьому пацієнт має можливість порівняти здорові рухи з тими, що тренуються.

Слід зазначити, що інтелектуальну інформаційну технологію сприйняття, обробки і передачі знань про рухову діяльність людини, поданих у вигляді образу руху, можна використати також як майбутній компонент образного комп'ютера. На закінчення зробимо ряд висновків щодо методології і технології синтезу біотехнічних систем керування рухами.

1. Вдправними теоретичними посилюками синтезу біотехнічних систем керування рухами є:

- розуміння призначення БТС як засобу, що виконує роль відсутньої ланки у формуванні гомеостазу рухової системи у разі цієї чи іншої патології рухової функції і в остаточному підсумку як засобу відновлення гомеостазу — стійкого відновлення функції руху;
- розуміння оптимізації «маршруту» лікування (відновлення рухових функцій) як багатокритеріальної оптимізації формування рухів, що має бути адекватною стану рухових функцій пацієнта на різних етапах реабілітації. При цьому поняття адекватності як індивідуального критерію оптимізації формування рухів на різних етапах реабілітації виходить з поняття гомеостазу рухової системи, його індивідуальності та індивідуальності порушення у разі рухової патології.

2. Основним завданням підтримки гомеостазу виконання рухового акту є пошук інформативних параметрів координаційної структури рухів і вибір керуючих впливів залежно від стану рухових функцій на момент керування.

3. Згідно з принципом біологічної адекватності керування рухами людини слід передбачати можливість гнучкої зміни структури БТС відповідно до стану рухових функцій, що забезпечує єдність ситуаційної і кінцевої цілей керування.

4. Досягнення ситуаційної мети керування руховими функціями здійснюються за допомогою різних методів і режимів тренування:

- програмної електростимуляції м'язів, що дає можливість нав'язувати пацієнту певні, обумовлені ситуаційною метою тренування, рухи за моделями, основою яких є «електроміографічний образ»;

- порогової електростимуляції, за якої процес нав'язування пацієнту вимушених рухів запускається його спробою довільно скоротити м'язи;

- біокерування, що дає змогу тренувати довільні рухи за допомогою біологічних зворотних зв'язків (зорових і слухових) з використанням «інформаційних образів» руху;

5. Головними критеріями, що визначають властивості біологічно адекватної БТС керування рухами і її структурних елементів, є такі:

- комплексність пропріоцептивної і результативної аферентації, що досягається реалізацією в БТС методів програмної електростимуляції, біологічного зворотного зв'язку і цілеспрямованого на досягнення ситуаційної і кінцевої мети поєднання обох методів;

- зміна режиму тренування, ускладнення тренувальних завдань, тренування швидких і повільних волокон м'язів, що досягається різними режимами тренувань, побудованими на різних методах активації резервів організму виконувати системний руховий гомеостаз;

- максимізація функції (сили скорочення) за однакових енерговитрат, мінімізація болю, стомлення, адаптації, що досягається оптимізацією параметрів стимулюючого сигналу (частоти та амплітуди імпульсів стимуляції);

- синтез рухових програм (моделей рухів), наближених до природних, що досягається регламентацією посилок-пауз стимулюючого сигналу, побудованою на природних закономірностях залучення м'язів у рух, або програм на основі «електроміографічних образів» природних довільних рухів.

6. Основою інформаційної технології цілеспрямованого «образного» керування рухами людини є біологічно адекватна організація процесу формування рухової активності та тренування рухів, що запускає і стимулює резерви організму на підтримку гомеостазу рухової системи, відновлення і корекцію рухів, на збільшення сили і витривалості м'язів.

7. Цілеспрямованість відновлення рухових функцій (ситуаційна мета, засоби, результати) на кожному етапі реабілітації за рахунок ситуаційної організації зовнішнього керування є ознакою інтелектуального керування. Саме ситуаційна організація керування, яка біологічно адекватно адаптує структуру зовнішнього керування під об'єкт, відрізняє інтелектуальне керування від керування взагалі.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення біотехнічної системи та перелічіть її ключові властивості.
 2. Які головні системоутворювальні чинники БТС? Наведіть класифікацію БТС.
 3. У чому полягає головний принцип функціонування БТС?
 4. Які головні вимоги ставлять до БТС?
 5. У чому полягає усвідомлення тріади «дані — інформація — знання»?
 6. Які базові методи сучасних БТС керування рухами Ви знаєте?
 7. Розкрийте суть методу програмної електростимуляції м'язів. Назвіть головні переваги методу.
 8. Яка БТС може бути названа «інтелектуальною»? Наведіть приклад.
 9. Назвіть теоретичні посилки синтезу БТС керування рухами.
 10. Що таке «електроміографічний образ» руху? Чому «електроміографічний образ» можна використовувати для формування програм керування?
 11. Що таке біологічний зворотний зв'язок? Назвіть головні переваги керування рухами за методом біологічного зворотного зв'язку.
 12. Які головні принципи синтезу БТС керування рухами Ви знаєте?
 13. Назвіть базові властивості біологічно адекватної БТС керування рухами.
-

ЧАСТИНА 4

Організація інформаційного поля знань біологічної та медичної спрямованості

БІОЕКОМЕДИЦИНА: ЦІЛЕСПРЯМОВАНИЙ СИНТЕЗ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПОЛЯ ЗНАТЬ БІОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНИ

У цьому розділі розглянуто новий міждисциплінарний науковий напрям — біоекомедину, а саме:

- конструювання та обґрунтування інформаційно-структурної моделі біоекомедини;
- визначення та основні поняття біоекомедини;
- відкритий перелік завдань з даної проблеми;
- базовий метод біоекомедини;
- архітектуру комп'ютерно-інформаційного простору біоекомедини, що об'єднує предметно-проблемно-орієнтовані на здоров'я людини інформаційні поля знань біології, екології та медицини.

Розглянуто єдиний погляд на формування, підтримку та розвиток здоров'я людини, що полягає у забезпеченні системно-середовищного гомеостазу людини та екосередовищ, які її оточують.

4.1.1. Інформаційно-структурна модель біоекомедини

Згідно з визначенням інформаційно-структурної моделі (ІСМ) (розділ 1.2) остання потребує вербального опису виокремлених структурних блоків біоекомедини як проблеми. Перш за все дамо визначення біоекомедини. **Біоекомедина** — це міждисциплінарна галузь науки і практичної діяльності, що цілеспрямовано синтезує інформаційні знання біології, екології та медицини і генерує нові знання, спрямовані на досягнення та розширення зони здоров'я, а також на формування гармонійно розвиненої особистості.



Рис. 4.1. Інформаційно-структурна модель біоеко медицини

Базуючись на цьому визначенні, ІСМ біоеко медицини як проблеми потребує опису таких блоків (рис. 4.1):

- інформаційне поле знань предметних галузей;
- інформаційно-технологічна база дослідження.

Перший блок підрозділяється на три предметні галузі, що складають необхідні знання міждисциплінарного дослідження біоеко медицини: біологія людини, екологія та медицина. Критерієм виокремлення знань у цих предметних галузях є критерій відповідності знань глобальній меті досліджень біоеко медицини, а саме:

- здоров'я людини у різних екосередовищах з позиції фізичного, психічного і соціального статусів;
- залежність здоров'я від триєдності взаємовпливу основних чинників: генетичного, екологічного та способу життя;
- формування, підтримка та розвиток здоров'я людини у єдиному внутрішньосистемному (людина) та системно-середовищному (людина + оточуюче середовище) інформаційному просторі.

Згідно із зазначеним критерієм у предметній галузі *біологія людини* необхідними є знання (рис. 4.1) про властивості органів і систем організму людини, принципи та закономірності внутрішньосистемного функціонування органів і фізіологічних систем організму в нормі. Поряд із наведеними знаннями необхідні також знання про внутрішньосистемну динаміку структурно-функціональної організації мозку не тільки як органа керування фізіологічними системами організму, а й як об'єкта пізнання процесів мислення.

Екологія як наука вивчає закономірності формування і функціонування біологічних систем у їх взаємодії з оточуючим середовищем. У комплексі екологічних проблем здоров'я людини є центральним системоформувальним фактором, що об'єднує різні дослідження, мета яких — вивчення закономірностей впливу різних зовнішніх дій на організм людини. У наш час дуже актуальним є питання про екологічну обумовленість стану здоров'я населення. Для його вирішення треба навчитися об'єктивно оцінювати не тільки здоров'я людини, а й «здоров'я» середовища. Необхідно навчитися кількісно оцінювати вплив оточуючого середовища на здоров'я людини. При цьому зазначимо, що оточуюче середовище є різноманітним, нестабільним та багатофакторним.

Для біоеко медицини як проблеми з цієї предметної галузі потрібні знання про еконорму як системно-середовищний гомеостаз взаємодії людини з різними оточуючими середовищами — природним (довкілля), соціальним, інформаційним та духовним (рис. 4.1). Не менш важливими є знання про методи та способи діагностики функціонального стану людини в умовах екстремальних середовищ, його граничних можливостей пристосування до них, а також знання про методи та засоби підтримки систем-

но-середовищного гомеостазу організму людини у різних екстремальних екосередовищах.

Логічно пов'язаними з останнім є знання про методи «лікування хвороб» різних екосередовищ, які оточують людину. Під поняттям «лікування хвороб» маємо на увазі створення, якщо можливо, такого екосередовища (природного, соціального, інформаційного, духовного), яке б не шкодило здоров'ю людини та сприяло розкриттю усіх його потенційних можливостей: фізичних, духовних, інтелектуальних.

З предметної галузі *медицина* (рис. 4.1) доцільно розглянути традиційні знання про властивості, принципи і закономірності функціонування органів і систем організму за різних видів патології; патологічні відхилення структурно-функціональної організації нервової системи та її вищого відділу — мозку та виявлення цих відхилень. Не менш важливі також знання про методи, способи та критерії діагностики стану органів і фізіологічних систем організму людини усіх ієрархічних рівнів організації, про алгоритми вибору профілактико-лікувально-реабілітаційних заходів. Усі медичні знання стосуються питання повернення патологічно змінених функцій організму до нормального функціонування. Поряд із завданням повернення до здоров'я все більшої актуальності набуває завдання формування, підтримки та розширення зони здоров'я практично здорової людини — здоров'я здорових. Тому логічно виокремлення блоку знань про алгоритми вибору еволюційно-адекватних керуючих дій з метою формування, підтримки та розширення зони здоров'я.

Другий блок — блок інформаційно-технологічної бази дослідження (рис. 4.1) підрозділяється на такі підблоки: інформаційні технології одержання знань; біотехнічні системи діагностики, прогнозування і керування та інформаційні системи. Перший підблок підрозділяється на:

- технологію усвідомлення даних — одержання інформації;
- технологію усвідомлення інформації — одержання знання.

Зазначимо, що такий поділ першого підблоку співзвучний головній ідеї інформаційних технологій, а саме усвідомлення триади «дані — інформація — знання» (розділ 1.1).

Підблок «Інформаційні системи», в свою чергу, підрозділяється на (рис. 4.1):

- інформаційно-довідкові системи;
- інформаційно-аналітичні системи (діагностичні, прогнозуючі, керуючі та слідкуючі, що працюють у різних часових зрізах: неперервне стеження за станом об'єкта дослідження та дискретно-неперервне);

- інформаційно-консультативні системи;
- експертні та поліалгоритмічні експертні системи діагностики, прогнозування і керування.

Виокремлення біотехнічних систем діагностики, прогнозування та керування (рис. 4.1) як окремого блоку інформаційних систем (бо інколи біотехнічну систему можна розглядати як вид інформаційної системи) обумовлено її безпосереднім зв'язком з пацієнтом (здоровим чи хворим) на відміну від інформаційної системи, що може бути пов'язана з пацієнтом як безпосередньо, так і опосередковано. Крім того, інформаційні системи мають справу також з інформаційним полем знань про оточуючі людину екосередовища.

Виокремлення блоку інформаційно-технологічної бази дослідження з його складовими передбачає полегшення та упорядкування роботи з великими потоками інформації у такій багатоаспектній галузі знань, як біоеко медицина. Призначення цього блоку — збирання, зберігання та аналіз інформаційного поля знань предметних галузей біологія людини, екологія і медицина, а також трансформування цих знань для вирішення завдань біоеко медицини.

Аксіоматика біоеко медицини. Розглянемо деякі визначення, що становлять сутність біоеко медицини з точки зору об'єкта, предмета та завдань дослідження. Це потрібне для того, щоб:

- представити біоеко медицину як упорядковану систему знань;
- сформулювати узагальнення, що дають змогу знайти зв'язок між інформаційними полями знань предметних галузей біологія, екологія і медицина;
- допомогти трансформувати знання вказаних предметних галузей у нову визначену систему знань міждисциплінарного дослідження біоеко медицини.

Перш за все визначимо об'єкт, предмет та метод біоеко медицини.

Об'єктом біоеко медицини є комплексна система: людина + оточуючі її екосередовища — природне (довкілля), соціальне, інтелектуальне, духовне.

Предмет біоеко медицини — процеси, методи і способи формування гармонійно розвиненої особистості в різних екосередовищах, а також методи і способи формування комфортних для людини екосередовищ.

Базовим *методом* біоеко медицини є інформаційні технології — різноманітність програмно-технічних способів, методів, моделей і алгоритмів, тобто інформаційний продукт, що дає змогу вирішувати різні науково-технічні завдання.

Формуючи завдання будемо додержуватися такої точки зору — вони мають відображати те, що вивчає біоеко медицина. Такими завданнями є:

- діагностика стану об'єкта біоеко медицини: відбір інформативних (суттєвих) знань, які досягнуті в предметних галузях біологія людини, екологія людини і медицина, що необхідні для достатньо повного дослідження конкретного об'єкта біоеко медицини залежно від його властивостей, характеристики стану і взаємодії складових об'єкта (людина + оточуюче екосередовище) між собою;
- прогнозування стану об'єкта біоеко медицини в різних умовах взаємодії його складових між собою. Під різними умовами взаємодії розуміємо одночасну зміну стану людини і оточуючого середовища або зміну стану людини відносно незмінного оточуючого середовища;
- визначення еконорми здоров'я людини як триєдності фізичного, психічного і соціального статусів в умовах змінних екосередовищ;
- вироблення (синтез) керуючих дій, що спрямовані на підтримку здоров'я об'єкта біоеко медицини та впливають на здоров'я людини безпосередньо і опосередковано через «здоров'я екосередовищ»;
- розробка методів і способів інформаційних технологій, які трансформують поле знань предметних галузей біологія, екологія, медицина у поле знань біоеко медицини.

Зазначимо, що наведений перелік завдань є відкритим, а кожне з них, у свою чергу, підрозділяється на ряд підзавдань відповідно до багатоаспектності проблеми біоеко медицини.

Визначення деяких понять, що характерні для біоеко медицини.

Еконорма здоров'я людини — це такий стан, коли основні показники життєдіяльності людини при взаємодії з оточуючим середовищем не виходять за межі фізіологічної норми (фізичне здоров'я), за межі адекватної інтелектуальної, емоційної та свідомо-вольової взаємодії з оточуючим екосередовищем (психічне здоров'я) та адекватної поведінки особистості в оточуючих екосередовищах (соціальне здоров'я).

Здоров'я екосередовищ — такий стан екосередовищ (довкілля, соціального, інтелектуального, духовного), що не шкодить здоров'ю людини, його фізичному, психічному і соціальному статусам та сприяє розкриттю усіх його потенційних можливостей — фізичних, духовних та інтелектуальних.

Екстремальне екосередовище — стан екосередовища, що спричиняє такі порушення еконорми, які призводять до різних патологічних станів організму та особистості аж до летального кінця.

Згідно з даним визначенням не кожний ступінь «хвороби» екосередовища можна віднести до екстремального, а лише той, який викликає хвороби організму та особистості. Слід відрізнити поняття «хвороба екосередовищ» від поняття «аномалія екосередовищ». Остання в результаті еволюційного формування адаптаційної здатності людини, яка мешкає у такому екосередовищі, може й не призводити до порушення системно-середовищного гомеостазу людини — навколишнє середовище. В цьому випадку дію аномального середовища можна віднести до еволюційно-адекватної для людини даної місцевості дії.

Принципи єдності інформаційного простору біоеко медицини. Головна ідея біоеко медицини як єдиного інформаційного простору — об'єднання інформаційного поля знань предметних галузей біологія, екологія і медицина на основі використання останніх досягнень в інформаційних технологіях, які, в свою чергу, спираються на досягнення кібернетики, інформатики та телекомунікацій. Формулювання принципів спрямоване на розкриття головної ідеї біоеко медицини.

Принцип узагальнення інформаційного поля знань. Загальна картина інформаційного поля взаємопов'язаних потоків знань, що динамічно змінюються, предметних галузей біологія, екологія і медицина є функція конкретного завдання міждисциплінарного дослідження біоеко медицини, що розв'язується.

Принцип системності дослідження. З метою оптимізації вирішення завдань біоеко медицини необхідно розглядати об'єкт як цілісну систему, виявляючи різноманіття типів зв'язків у ній та зводити їх в єдину теоретичну картину.

Слід зазначити взаємозв'язок принципу системності дослідження з принципом узагальнення інформаційного поля знань. Системність націлює дослідника на всебічне внутрішньосистемне дослідження взаємозв'язаного функціонування фізіологічних систем організму, з одного боку, та системно-середовищну взаємодію людини з навколишніми екосередовищами — з іншого, що дає можливість виокремити у цих взаємодіях загальні та специфічні закономірності впливу екосередовищ на здоров'я людини як триєдності фізичного, психічного та соціального статусів. Системний підхід підказує досліднику, який вирішує конкретне завдання, що має бути включене в загальну картину інформаційного поля знань з предметних галузей біологія, екологія та медицина.

Принцип гомеостазу на різних рівнях організації біоекосистем. Для гармонійного еволюційно-адекватного функціонування комплексного об'єкта біоекології «людина + екосередовище» треба підтримувати динамічну рівновагу системно-середовищної взаємодії в умовах екосередовища, що змінюються, онто- та філогенезу. Отже, дотримання цього принципу як атрибута системності переслідує мету формування гармонії біоекосистемного об'єкта.

Принцип адекватної системно-середовищної взаємодії. Для забезпечення адекватно оптимального функціонування об'єкта біоекології у всебічній різноманітності його станів з точки зору як здоров'я людини — її фізичного, психічного та соціального статусів, так і стану екосередовища, у тому числі екстремальних, з якими людина взаємодіє, необхідна індивідуально-об'єктна адаптація системно-середовищної взаємодії, тобто внутрішньосистемна адаптація конкретного комплексного об'єкта функціонування «людина + екосередовище».

Під внутрішньосистемною адаптацією такого комплексного об'єкта будемо розуміти не тільки взаємну адаптацію людина — екосередовище, а також пристосування тільки людини до екосередовища або тільки екосередовища до людини. При цьому індивідуально-об'єктна адаптація може здійснюватися за рахунок як еволюційних механізмів пристосування, так і привнесених зовні керуючих дій.

Поняття «адекватна оптимальність системно-середовищної взаємодії» означає урівноваження людини з середовищем найкращим чином, оскільки слово *оптимальний* (від лат. *optimus*), або найкращий, відображає риси інтуїтивного розуміння розумності, вигідності, справедливості, усталеності, доцільності і т. п. як риси оптимальності; а *адекватний* (від лат. *adaequatus*) — рівний, цілком відповідний. У цьому випадку адекватність виступає критерієм оптимальності, причому мається на увазі взаємна адекватність: системно-середовищна взаємодія людина + екосередовище оптимальна тоді, коли здоров'я людини, її фізичні, духовні, інтелектуальні та соціальні потреби відповідають екосередовищам, а екосередовища «відповідають» потребам людини. Виокремлення критерію адекватності серед інших критеріїв оптимізації системно-середовищної взаємодії дає можливість використовувати важливу властивість організму — адаптацію як здатність пристосовуватися до умов середовища, що змінюється, набути в результаті довготривалої еволюції та онтогенезу.

Принцип адекватної оптимальності системно-середовищної взаємодії дає змогу зрозуміти, що при формуванні, підтримці та

розвитку здоров'я людини треба розраховувати не тільки на її можливості пристосовуватися до умов оточуючих екосередовищ, а й на перетворення екосередовищ в інтересах здоров'я людини, її фізичних, духовних, інтелектуальних і соціальних потреб. Отже, дотримання принципу адекватної оптимальності системно-середовищної взаємодії — необхідна умова виконання принципу гомеостазу на різних рівнях організації біоекосистем.

Принцип еволюційної компенсації. Для забезпечення індивідуально-об'єктної адаптації пріоритетними є еволюційно-адекватні керуючі дії. При цьому еволюційна адекватність визначається конкретним об'єктом біоекологічної медицини.

Принцип гуманізації. Для забезпечення комфортного функціонування людини в оточуючих екосередовищах незалежно від стану її фізичного, психічного і соціального статусів необхідно формувати такі екосередовища, які адекватні можливостям особистості, задовольняють її фізичні, духовні, інтелектуальні та соціальні потреби і сприяють розкриттю її потенціальних можливостей.

Принцип етики та естетики взаємодії людини з екосередовищами. З метою формування, підтримки і розвитку здоров'я як альтернативи нескінченному лікуванню хвороб людини і екосередовищ треба виховувати усвідомлено дбайливе ставлення людини до екосередовищ та усвідомлено дбайливе формування екосередовищ, пам'ятаючи про те, що головна заповідь медицини «Не зашкодь» стосується людини не тільки безпосередньо, а й опосередковано, через екосередовища, що її оточують.

Принцип інтелектуалізації інформаційного простору біоекологічної медицини. З метою оптимізації процесу вирішення завдань біоекологічної медицини в єдиному інформаційному полі знань предметних галузей біологія, екологія і медицина слід використовувати найновітніші інформаційні технології, в тому числі методи, алгоритми, математичні, інформаційні та вербальні моделі, апаратно-програмні засоби, в результаті чого виробляється інформаційний продукт, потужність інформаційної інтелектуалізації якого визначається здатністю дослідника формувати його та одержувати нові знання, у тому числі й ті, що виходять за межі поставленого завдання. При цьому здатність генерувати нові знання та узагальнювати їх залежить від інтелектуальної компоненти дослідника: логічного, асоціативного, алгоритмічного мислення.

4.1.2. Комп'ютерно-інформаційний простір біоекомединици

Для вирішення завдань біоекомединици необхідна інформаційна інтеграція знань з предметних галузей біологія, екологія і медицина — побудова інформаційного простору біоекомединици. Цей простір — єдине поле знань зазначених предметних галузей, що предметно орієнтовані на формування, підтримку, розвиток та відновлення здоров'я людини, яка функціонує у різних середовищах. Створення і функціонування такого простору передбачає наявність високоорганізованої інформаційної інфраструктури, що поряд із традиційними (телекомунікаційні та комп'ютерні мережі, інформаційні системи) містить і нетрадиційні елементи — корпоративні ієрархічні мережі взаємодіючих інформаційно-аналітичних базових вузлів різного рівня ієрархії та предметного призначення.

Сьогодні, як ніколи раніше, людина все більше розуміє, що формування, підтримка та розвиток її здоров'я залежить від єдиного поля знань різних предметних галузей. Об'єднання знань предметних галузей біології, екології і медицини як найзначущих для здоров'я людини є першим внеском у формування здорового суспільства майбутнього.

Мета комп'ютерно-інформаційного простору біоекомединици — інтеграція знань предметних галузей біологія, екологія, медицина завдяки новим комунікаційним та інформаційним технологіям для вироблення адекватно-оптимальних діагностико-профілактико-реабілітаційних заходів, спрямованих на забезпечення творчої діяльності людини у різних, у тому числі специфічних та екстремальних екосередовищах. Водночас комп'ютерно-інформаційний простір біоекомединици сам по собі є штучно створеним середовищем для користувача. Тому він має задовольняти вимозі комфортності стосовно користувача, тобто має виконуватися принцип гуманізації (підрозділ 4.1.1).

Розглянемо завдання такого простору, що базуються на загальних завданнях біоекомединици як міждисциплінарного дослідження. Перш за все це:

- розробка критеріїв структуризації знань з предметних галузей біологія, екологія, медицина для вирішення завдань біоекомединици: діагностика стану об'єкта дослідження біоекомединици, прогнозування його стану в різних умовах взаємодії людини з навколишнім середовищем, вироблення адекватно-оптимальних керуючих дій, спрямованих на підтримку здоров'я людини у

різних екосередовищах і на «здоров'я» екосередовищ. Сучасне розуміння хвороби має виходити з поняття цілісності організму людини і порушення діалектичної єдності організму та середовища. Еволюційною особливістю реакції організму є насамперед реакція пристосування;

- розробка структурно-функціональної організації інформаційно-довідкових, інформаційно-аналітичних, інформаційно-консультаційних та керуючих систем, що проблемно орієнтовані на формування, підтримку, розвиток і відновлення здоров'я людини, з одного боку, та на «здоров'я» екосередовищ — з іншого;

- стандартизація біологічної, екологічної та медичної термінології для інтеграції знань при вирішенні завдань біоеко медицини.

Конструктивним кроком на шляху створення комп'ютерно-інформаційного простору біоеко медицини є формування спеціальної програми «Інформаційні технології та системи — Людині», яка має бути підпорядкована планетарній проблемі «Гармонія людини».

Особливістю структурних одиниць корпоративної ієрархічної мережі комп'ютерного інформаційного простору біоеко медицини — інформаційно-довідкових, інформаційно-аналітичних, інформаційно-консультаційних і керуючих систем є організація інтеграції знань, а саме те, що інтеграція знань у цих системах — не просто сума знань предметних галузей, а об'єднання знань на основі *логіко-вербального алгоритму*, тобто на основі функціонального алгоритму. Інакше кажучи, завдання біоеко медицини, що вирішується, є алгоритмоутворювальним фактором інформаційного поля знань. З цієї точки зору структурні одиниці включають експертні медичні системи і біотехнічні системи діагностики та керування.

Структурні одиниці комп'ютерно-інформаційного простору біоеко медицини. Розглянемо перш за все *інформаційно-довідкові системи (ІДС) біоеко медицини*. Це двоповерхова автоматизована система, що містить цільово-об'єктно-орієнтовані відомості з предметних галузей біології, екології, медицини. Перший рівень — базовий — це системи, банк знань яких формується на основі відомостей з предметних галузей. Отже, мають існувати ІДС «Біологія», ІДС «Екологія», ІДС «Медицина». Банки знань таких систем динамічно розвиваються та поповнюються відповідно до розвитку цих наук. Другий рівень — об'єктно-орієнтований під завдання міждисциплінарного (біоеко медицина) дослідження — це системи, у банк знань яких з базових інформаційно-довідкових систем усіх трьох предметних галузей заносяться відомості,

які цікавлять дослідника відповідно до завдання, що вирішується. По суті, ІДС цього рівня — це банки даних інформаційно-аналітичних систем другого рівня (вони розглядаються нижче), тобто рівня завдань біоєкології. Отже, кількість ІДС другого рівня — це функція числа завдань, що вирішені або вирішуються, у той час як кількість базових ІДС (перший рівень) регламентована числом предметних галузей міждисциплінарного дослідження. Різниця банків знань ІДС першого та другого рівнів: кожна ІДС першого рівня містить відомості однієї предметної галузі (біологія, екологія, медицина), а другого — міжпредметні відомості, системноутворювальним фактором яких є завдання.

Інформаційно-аналітична система (ІАС) біоєкології — дворівнева цільово-об'єктно-орієнтована автоматизована система, банк знань якої на першому рівні містить специфічний банк даних з відповідної предметної галузі (біологія, екологія, медицина) у вигляді переліку завдань із підзавданнями та відповідними інформативними показниками (дерево завдань), банк методів і моделей вирішення цих завдань та банк вирішених завдань; на другому рівні — банк даних (ІДС другого рівня), банк методів та моделей вирішення конкретного завдання біоєкології. ІАС першого рівня — базові; ІАС другого рівня — об'єктно-орієнтовані під завдання біоєкології. Банки знань базових ІАС динамічно розвиваються та поповнюються відповідно до накопичення вирішених завдань у кожній предметній галузі. Банки знань ІАС другого рівня, як уже зазначалося, формуються під конкретне завдання біоєкології.

Інформаційно-консультативні системи (ІКС) біоєкології являють собою особливий клас ІАС. Можна вважати, що ІКС створюють третій рівень інформаційних систем, який формується з ІАС другого рівня. Принципом відбору ІАС на третій рівень є адекватна оптимальність вирішення конкретного завдання. Під адекватною оптимальністю у даному випадку будемо розуміти, наприклад, час вирішення завдання, його вартість, фактор ризику, процент досягнення позитивного ефекту, час закріплення досягнутого результату та інші, які є пріоритетними критеріями для користувача. Отже, третій рівень інформаційних систем — ІКС — це критеріально орієнтовані ІАС вирішених завдань, що призначені для користувача фізичного або юридичного. Банки знань ІКС — це редуковані до потреб користувача банки знань ІАС другого рівня, що включають лише банки вирішених завдань з їх критеріальною оцінкою.

Архітектура інформаційного простору біоєкології — це корпоративна ієрархічна мережа, яка об'єднує предметно-проблемно-

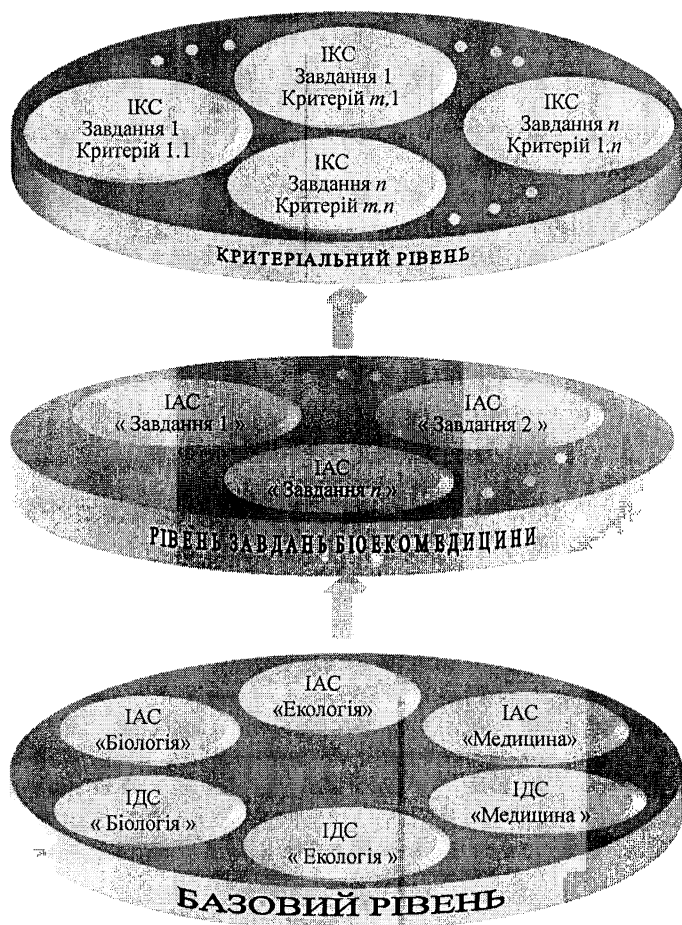


Рис. 4.2. Архітектура інформаційного простору біоеко медицини

орієнтовані на здоров'я людини інформаційні поля знань предметних галузей біології, екології та медицини, що має принаймні три рівня ієрархії (рис. 4.2):

- перший рівень — рівень базових ІДС та ІАС;
- другий рівень — рівень об'єктно-орієнтованих під завдання біоеко медицини ІАС;
- третій рівень — рівень ІКС, тобто критеріально орієнтовані ІАСи.

Для оптимізації досягнення глобальної мети біоекомедини — забезпечення системно-середовищного гомеостазу функціонування комплексної системи «людина + екосередовища» цей простір має виконувати такі функції:

- інтегрувати поле знань згідно з предметом біоекомедини — на першому рівні;
- генерувати об'єктно орієнтовану під завдання біоекомедини інформацію — на другому рівні;
- генерувати об'єктно орієнтовану під завдання біоекомедини інформацію, що оптимізована за критерієм або критеріями — на третьому.

Таким чином, архітектура інформаційного простору біоекомедини охоплює три рівня:

- базовий — перший рівень;
- завдання біоекомедини — другий рівень;
- критеріальний — третій рівень.

Сформулюємо деякі **принципи функціонування людини в комп'ютерному інформаційному просторі** як штучно створеному екосередовищі. Зазначимо, що інформаційно несучою компонентою оцінки ефективності інформаційного простору біоекомедини, з одного боку, і базовим фактором, що визначає рівень і якість цього простору — з іншого, є людина. В зв'язку з цим можна вважати правомірним такі принципи.

Принцип ефективності роботи людини в інформаційному просторі: для активного включення людини в інформаційний потік біоекомедини, керування ним і формування його людині треба підвищувати свій персональний інформаційний ресурс.

Принцип комфортності роботи людини в інформаційному просторі: для сумісності інтелекту людини з «інтелектом» інформаційного середовища треба, конструюючи простір, використовувати інтелектуальні інформаційні технології високого рівня або функціонального призначення типу «бачу і розумію бачене», «чую і розумію почуте», «сприймаю знання, накопичую їх і використовую для вирішення завдань та прийняття рішень».

Принцип динамічності і системності роботи людини в інформаційному просторі: у процесі вирішення завдань біоекомедини людині треба постійно формувати і модифікувати ІАСи, причому системність дослідження досягається за рахунок адекватно-оптимальної повноти наповнення банків знань інформаційних систем усіх рівнів.

ЄДИНИЙ МЕДИКО-ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПРОСТІР

У даному розділі єдиний медичний інформаційний простір (ЄМІП) подано як єдину мережу взаємодіючих комп'ютеризованих госпітальних установ зі своїми локальними інформаційними системами, інформаційно-аналітичними медичними центрами різного рівня ієрархії. Саме такий єдиний інформаційний медичний простір дасть можливість ефективно використовувати інтелектуальний ресурс медицини і забезпечити доступність якісної медичної допомоги кожному пацієнту незалежно від його місця проживання. У ракурсі такого розуміння структури та призначення єдиного інформаційного медичного простору у даному розділі розглянуто:

- архітектуру такого простору;
- структуру та наповнення госпітальних інформаційних систем;
- визначення і завдання телемедицини та віртуального консилиуму як вищого рівня функціонування телемедицини.

4.2.1. Архітектура єдиного медико-інформаційного простору

Здоров'я окремої особи і здоров'я нації є першочерговим завданням держави. Його виконання чималою мірою залежить від широти охоплення населення медичною допомогою та її якості. У медичному обслуговуванні громадян сьогодні явно простежується ситуація, коли кількість госпітальних закладів та їх якісний склад (кваліфікація персоналу, наявність спеці-

ального устаткування) залежать від інфраструктури регіону. У великих містах працює чимало спеціалізованих медичних центрів, клінік, де зосереджені висококваліфіковані кадри. Водночас цього не можна сказати про районні центри і селища. Провідні медичні заклади оснащені сучасним устаткуванням, в них освоєні найновітніші методи діагностики та лікування.

Певна річ, пацієнти, які потрапляють до спеціалізованих центрів, отримують справді кваліфіковану медичну допомогу. Однак дуже часто такої допомоги потребує і населення, яке не може скористатися послугами спеціалізованих центрів, оскільки сучасна технологія медичної допомоги України не забезпечує такої можливості. І саме інформатизація медичної галузі, використання комп'ютерно-телекомунікаційних технологій дадуть змогу застосувати такі форми медичної допомоги, коли послуги спеціалізованих центрів стануть доступними для всіх мешканців.

Незважаючи на те, що в окремих госпітальних закладах створюються медичні інформаційні системи діагностики та лікування (експертні, інформаційно-довідкові, біотехнічні, автоматизовані робочі місця лікарів), якісна медична допомога доходить далеко не до всіх пацієнтів. Потрібна єдина мережа взаємодіючих комп'ютеризованих госпітальних закладів зі своїми локальними інформаційними системами, інформаційно-аналітичними медичними центрами різного рівня ієрархії, тобто єдиний медико-інформаційний простір. Саме він дасть можливість ефективно використовувати інтелектуальний ресурс медицини і забезпечити якісну медичну допомогу кожному пацієнту у будь-якому регіоні країни.

Мета і функціональне призначення ЄМІП. *Єдиний медико-інформаційний простір* — це сукупність взаємопов'язаних локальних інформаційних систем госпітальних закладів (лікарні, поліклініки, реанімаційні центри, амбулаторії, санаторії та ін.) з їх інтелектуальним і апаратно-технічним ресурсом, що містять бази даних діагностико-профілактико-лікувально-реабілітаційних заходів, які є в арсеналі цього лікувального закладу, а також систем адміністративно-управлінських органів охорони здоров'я різного рівня ієрархії.

Глобальна мета ЄМІП — поліпшення здоров'я нації. **Призначення** такого простору полягає в забезпеченні: задоволення потреби кожного громадянина України в медичному обслуговуванні; можливості безпосереднього активного доступу до медичної інформації будь-якого користувача — від медсестри і лікаря до працівників адміністративно-управлінського апарату різного

рівня ієрархії — для швидкого та ефективного керування всіма процесами у цьому просторі.

Структура ЄМІП. Розглянемо, що являє собою єдиний медико-інформаційний простір, його архітектура. Згідно з визначенням ЄМІП його структура має принаймні три рівня ієрархії.

Перший, найнижчий, рівень — це сукупність (єдина мережа) госпітальних інформаційних систем (ГІС) поліклінік, лікарень, реабілітаційних центрів тощо, які безпосередньо пов'язані з пацієнтом і вирішують завдання профілактико-лікувально-реабілітаційного характеру. Це рівень базової інформації, що циркулює у госпітальному закладі, на базі якого створюється ГІС як об'єднання в єдину мережу інформаційно-аналітичних, інформаційно-довідкових систем, інформаційних систем телеконсультацій та базових вузлів ГІС. *Базовий інформаційний вузол ГІС* — це розширений банк знань, який містить різноякісну інформацію довідкового, аналітичного та консультативного характеру, що надходить із різних автоматизованих систем ГІС відповідно до структури та спеціалізації госпітального закладу.

Другий рівень — це мережа інформаційних вузлів (інформаційно-аналітичні комплекси) адміністративно-територіальних одиниць України. *Базовий інформаційний вузол цього рівня* — це розширений банк знань, який містить інформацію, орієнтовану за певним критерієм її інтеграції (наприклад, за нозологією), яка надходить завдяки телекомунікаційним зв'язкам з базових вузлів госпітальних закладів даної адміністративно-територіальної одиниці.

Третій рівень — це мережа базових інформаційних вузлів (інформаційно-аналітичні комплекси) державного рівня. *Базовий вузол цього рівня* — це, власне, національний інтегрований банк знань, що містить цільовоорієнтовану інформацію, яка надходить із відповідних базових вузлів другого рівня. Третій рівень можна розглядати як сукупний інформаційний ресурс України в галузі охорони здоров'я. Його потенційний ресурс: кадровий склад (кількісний і якісний), матеріальна база (кількість госпітальних закладів та койко-місць певного профілю, побутове забезпечення тощо), статистичні дані (із захворюваності, смертності, народжуваності). Базові вузли державного рівня можуть створюватися або на базі провідних спеціалізованих клінік України, або у Міністерстві охорони здоров'я. У першому випадку Міністерство охорони здоров'я повинно мати центральний сервер, за допомогою якого здійснюється зв'язок з державними базовими вузлами.

Отже, архітектура єдиного медико-інформаційного простору — це ієрархічна мережа, що об'єднує вертикальним двостороннім ко-

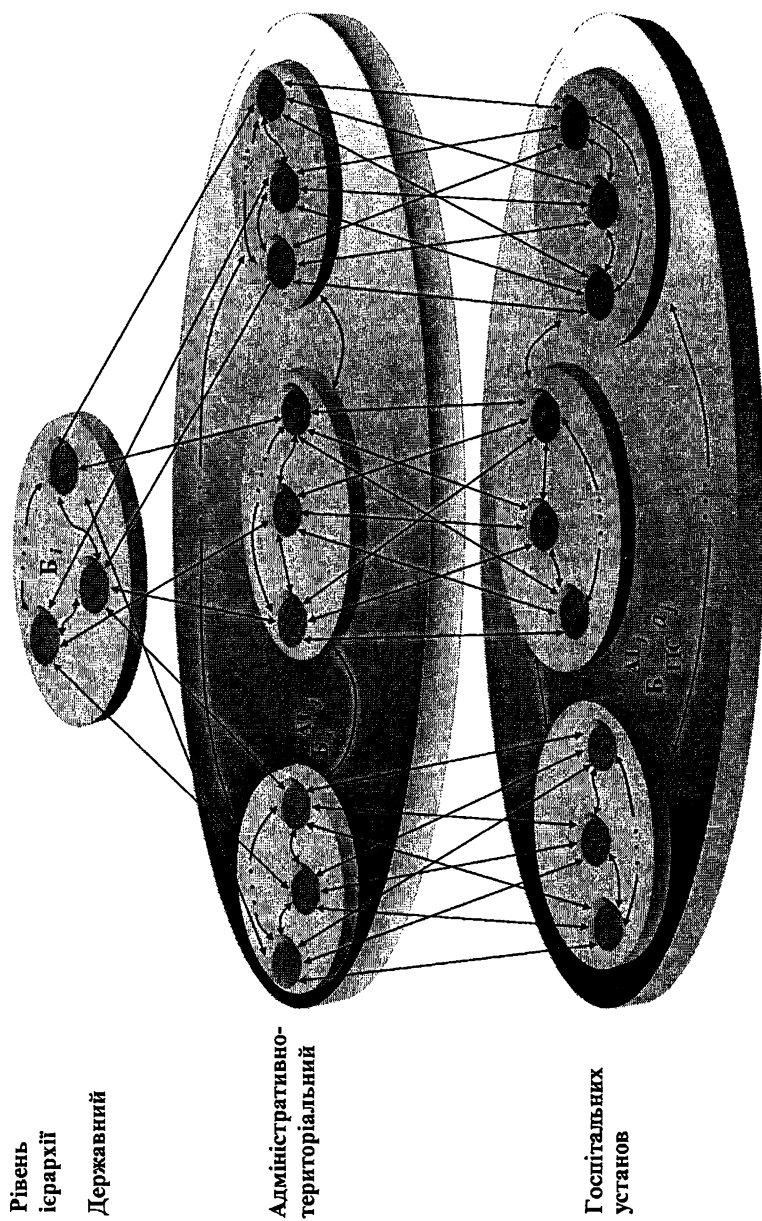


Рис. 4.3. Архітектура єдиного медико-інформаційного простору.
Пояснення в тексті

мунікаційним зв'язком госпітальні інформаційні системи — їхні базові інформаційні вузли — з базовими інформаційними вузлами вищих рівнів ієрархії (адміністративно-територіальним, державним) та горизонтальним зв'язком на кожному рівні ієрархії. Архітектуру такого простору показано на рис. 4.3. Тут введені такі позначення:

B_i — базовий інформаційний вузол на державному рівні i -ї цільовоорієнтованої інформації, де $i = I, II, \dots, N$, а N — кількість цілей орієнтації. Так, для нозологічного критерію як вид цілей виступає, наприклад, кардіологія, онкологія, ендокринологія тощо. Тоді i — це вид патології;

AT_j — j -й адміністративно-територіальний регіон, де $j = 1, 2, \dots, k$, а k — кількість адміністративно-територіальних регіонів. Кожен такий регіон містить також N видів базових вузлів з цільовоорієнтованою інформацією;

$B_i^{AT_j}$ — базовий інформаційний вузол i -ї цільовоорієнтованої інформації j -го адміністративно-територіального регіону. Тоді на адміністративно-територіальному рівні ієрархії загальна кількість базових інформаційних вузлів становить $N \times k$;

$B_{ГІС}$ — базовий інформаційний вузол госпітального закладу;

$B_{ГІС_{\alpha_j}}^{AT_j}$ — базовий інформаційний вузол α_j -го госпітального закладу j -ї адміністративно-територіальної одиниці, де α_j — кількість госпітальних закладів j -ї одиниці. Наприклад, у 1-й адміністративно-територіальній одиниці є l_1 госпітальних закладів (тоді $\alpha_1 = 1, 2, \dots, l_1$); у 2-й — l_2 госпітальних закладів ($\alpha_2 = 1, 2, \dots, l_2$); у k -й — l_k госпітальних закладів ($\alpha_k = 1, 2, \dots, l_k$).

Тоді кількість базових інформаційних вузлів на нижньому рівні ієрархії — рівні госпітальних установ становитиме:

$$\sum_{\alpha_j=l_1}^{l_k} \alpha_j = l_1 + l_2 + \dots + l_k.$$

Отже, базовим елементом єдиного медико-інформаційного простору є госпітальна інформаційна система. Саме ГІС зі своєю інформаційною структурою і телекомунікаційним середовищем є основою охорони здоров'я.

Реалізація розглянутої архітектури ЄМІП дасть змогу підтримувати високий рівень кооперації госпітальних закладів, обмінюватися досвідом і знаннями щодо найновітніших методів діагностики та лікування, а також сприятиме раціональній координації роботи усіх госпітальних закладів з боку адміністративно-управлінського апарату.

4.2.2. Госпітальні інформаційні системи

Для запобігання можливим стратегічним помилкам та прискорення процесу інформатизації охорони здоров'я необхідно розробити типову ГІС, архітектура та інфраструктура якої мають бути інваріантними у межах профілю госпітального закладу. Розробка типової ГІС як базового елемента медичного простору є необхідним кроком, відправною точкою на шляху створення такого простору. Впровадження ГІС у систему охорони здоров'я підвищує ефективність надання медичної допомоги в окремому госпітальному закладі, поліпшує якість та об'єктивність діагностики і оптимізує лікувально-профілактичні заходи. У розвинених країнах ГІС функціонують десятки років. Вони забезпечують управління персоналом, фінансовим і матеріально-технічним забезпеченням, зокрема медикаментами, медичним інструментом та апаратурою.

Отже, *локальна мережа ГІС* — це мережа, що об'єднує інформаційно-довідкові, інформаційно-аналітичні системи профільних відділень госпітального закладу, зв'язує їх з його базовим вузлом і забезпечує доступ до ГІС інших госпітальних закладів, базовими інформаційними вузлами різної ієрархії, а також до Інтернету. Інваріантність інфраструктури ГІС забезпечується типовими медичними інформаційними системами (МІС) як її структурними одиницями.

Розподіл МІС на класи. Доцільно поділити усі види МІС на два класи за критерієм їх зв'язку з пацієнтом:

I — МІС, що безпосередньо пов'язані з пацієнтом;

II — МІС, що опосередковано пов'язані з пацієнтом.

МІС I класу за своїм функціональним призначенням поділяються на п'ять різноякісних підкласів.

I.1. Інформаційно-аналітична система (ІАС) профілактики, формування та збереження здоров'я (здоров'я здорових).

I.2. ІАС діагностики і лікування патологічних станів різних функцій, органів та фізіологічних систем організму.

I.3. ІАС діагностики і лікування хронічних патологічних станів фізіологічних функцій, органів та систем організму.

I.4. ІАС реабілітації функцій, органів і систем (відновне лікування).

I.5. Інформаційна система телекомунікацій (ІСТК).

Об'єднання у ГІС різноякісних підкласів МІС I класу повністю або частково залежить від профілю та підпорядкування госпітального закладу. Так, усі п'ять підкласів необхідні, наприклад,

якщо ГІС створюються у центрах геронтологічного профілю. ГІСи лікарень будь-якого профілю та підпорядкування повинні містити принаймні другий та четвертий підкласи; санаторіїв та центрів здоров'я — перший та четвертий підкласи. ГІСи санаторіїв лікувального типу та спеціалізовані заклади для лікування хронічних патологічних станів (у тому числі й у період загострення) повинні, мабуть, мати другий, третій та четвертий підкласи.

МІС II класу за функціональним призначення підрозділяються на такі підкласи.

- II. 1. Інформаційно-довідкова система (ІДС) «Аптека».
- II. 2. ІДС «Кров».
- II. 3. ІДС «Побут».
- II. 4. ІДС «Архів».
- II. 5. ІДС «Кадри».

Розподіл МІС на класи і виокремлення підкласів має на меті спрощення (оптимізацію) алгоритму пошуку необхідної інформації.

Розглянемо цілі виокремлених підкласів МІС у кожному класі. Узагальнені цілі підкласів МІС I класу:

- I.1. Розширення зони здоров'я.
- I.2. Виведення фізіологічних систем організму або організму в цілому з патологічного стану.
- I.3. Підтримка фізіологічних функцій у межах життєдіяльності організму або наближення їх до норми.
- I.4. Приведення фізіологічних функцій до норми і підтримання їх у межах норми.
- I.5. Обмін консультаціями по телекомунікаційних каналах зв'язку з метою здійснення діагностико-профілактико-лікувально-реабілітаційних заходів.

Узагальнені цілі підкласів МІС II класу зрозумілі з назв ІДС.

Структурна організація ГІС — це архітектура телекомунікацій між інформаційними системами і структура банку знань кожної інформаційної системи. При цьому структура банку знань кожної ІАС I класу включає банк знань, який містить банк даних, банк методів, банк моделей і банк вирішених завдань. Внутрішньосистемна організація банків знань інформаційних систем I класу інваріантна профілю і підпорядкуванню госпітального закладу. ІДС II класу також включають банк знань, який залежно від виду ІДС може містити банк даних і банк вирішених завдань (ІДС «Аптека» та ІДС «Кров») або тільки банк даних (ІДС «Побут», ІДС «Архів» та ІДС «Кадри»). Як правило, ГІС містить інформаційні системи обох класів.

Розглянемо структурну організацію ГІС типової районної лікарні міста. Лікарня такого рівня має декілька профільних відділень (неврологічне, кардіологічне, терапевтичне тощо), які обслуговуються фізіотерапевтичним відділенням зі своїми кабінетами (електротерапія, масаж, рефлексотерапія, грязелікування, водолікування тощо), відділенням функціональної діагностики зі своїми кабінетами та лабораторіями біохімічних аналізів, відділенням реанімації, приймальним, аптекою і господарською частиною.

Аптека і господарська частина потребують розробки МІС II класу. Всі інші профільні відділення і відділення, що їх обслуговують, — МІС I класу.

Розглянемо потік інформації у госпітальній інформаційній системі окремого госпітального закладу (рис. 4.4). ІАСи «Діагностика», «Фізіотерапія», «Реанімація», «Приймальня» I класу та ІДСи «Аптека», «Побут», «Кров», якщо вони є, II класу об'єднані двостороннім зв'язком з ІАСами профільних відділень — ІАСами «Кардіологія», «Травматологія» тощо як інформаційними системами, що їх обслуговують. Кожна ІАС профільного відділення, в свою чергу, зв'язана з ІДС «Архів». Крім того, ІАСи профільних відділень об'єднані двостороннім телекомунікаційним зв'язком з базовим вузлом даного госпітального закладу. Завданням базового вузла ГІС є не тільки збирання і зберігання інформації, що надходить із ІАС і ІДС I та II класів, а й виокремлення різноякісної інформації (наприклад, за нозологією) для передачі по телекомунікаційних каналах зв'язку у відповідні базові вузли адміністративно-територіального рівня ієрархії. Базовий вузол ГІС має також виконувати роль своєрідного посередника при телеконсультаціях. Щодо інформаційної системи телеконсультацій, то вона є частиною інфраструктури базового вузла ГІС. Причому безпосередньо структура ІСТК може мати різний ступінь складності залежно від її функціонального призначення: від надання консультації по телефонних каналах зв'язку до приймання і передачі відеозображень у завданнях телемедицини.

Функціональне наповнення структурних одиниць ГІС (банків банку знань) залежить від класу і підкласу МІС, а також від того, чи є дана система інформаційно-аналітичною чи інформаційно-довідковою. Функціональна залежність виявляється саме через обсяг і характер інформації, а також через її статичність або динамічність.

Розглянемо функціональне наповнення банку знань інформаційно-аналітичної системи. Банк даних профільних ІАС містить такі дані: історію хвороби пацієнтів (надходять із поліклінік

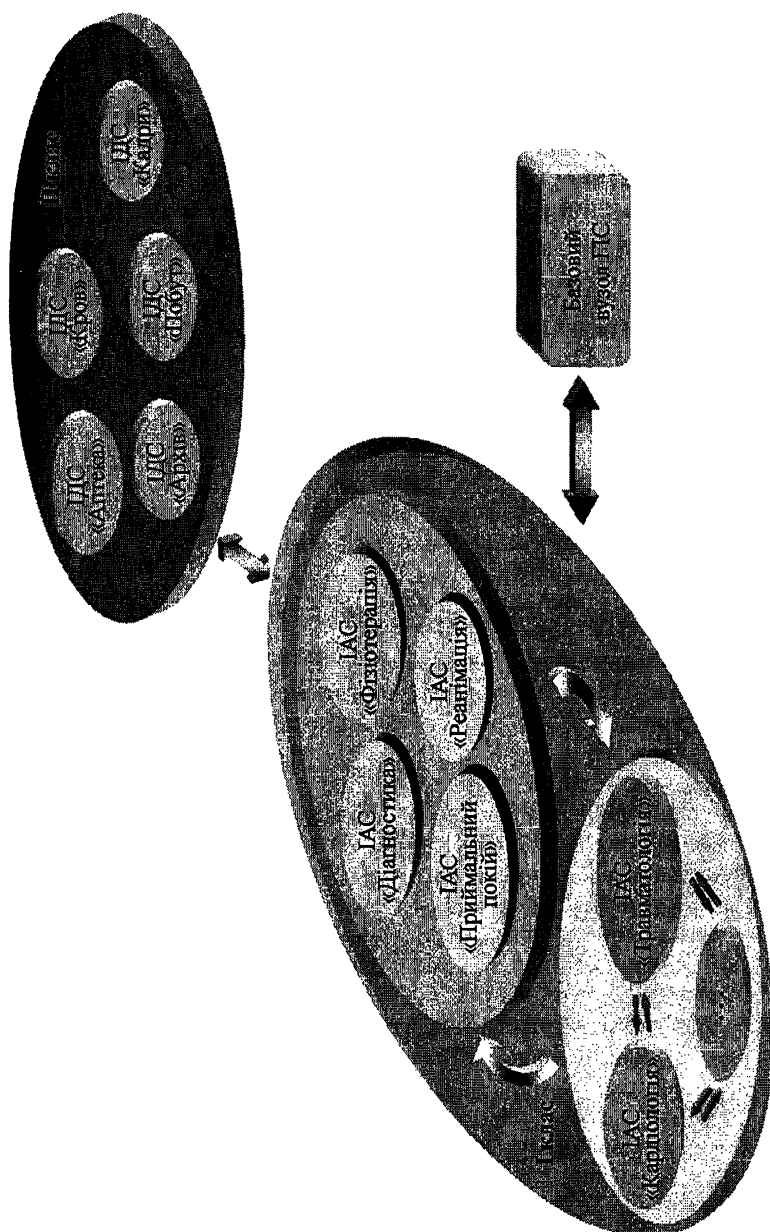


Рис. 4.4. Потік інформації в ГІС

або заповнюються на місці); про переміщення пацієнтів у профільному відділенні або відділеннях; про призначення додаткових методів обстеження, лабораторних аналізів і методів керування (профілактики, лікування або реабілітації) медикаментозних і немедикаментозних, а також хірургічного втручання. Ці дані є первинним джерелом інформації, яка за необхідності може транслюватися по телекомунікаційних каналах консультантам профільних відділень усередині госпітального закладу, а також інших госпітальних закладів.

Зазначимо, що банк методів профільних ІАС є відкритим, тобто він обмінюється відомостями з банками методів інших госпітальних закладів, профільних клінік, НДІ медичного профілю, інших наукових закладів, які розробляють методи та засоби діагностики, профілактики, лікування й реабілітації.

Банк моделей профільних ІАС також є відкритим. Моделями у даному разі виступають як вербальні алгоритми вирішення медичного завдання, так і складні математичні моделі динаміки (прогнозування) функціонального стану пацієнта, його органів і систем; алгебраїчні вирази кількісної оцінки окремих параметрів стану, ефективності лікувального і реабілітаційного процесів; математичні моделі діагностики.

Джерелом наповнення відкритого банку вирішених завдань є досвід як лікарів місцевого госпітального закладу, так і інших госпітальних закладів, профільних клінік, центрів реабілітації і здоров'я та ін. Досвід лікарів у даному випадку — це вербальний алгоритм (медичні вказівки) діагностичних, лікувальних, профілактичних і реабілітаційних заходів з оцінкою їх ефективності. Банк розв'язаних задач, по суті, править за підказку медику при розв'язуванні аналогічної задачі.

Профільна інформаційно-аналітична система, яка містить вищезгадані банки знань, може бути названа інтелектуальною. Основою інтелектуалізації банку знань профільних ІАС є саме наявність в ньому банку розв'язаних задач. Узагальнення досвіду лікаря в банку розв'язаних задач співзвучно поняттю *експертна система* як інтелектуальна. До елементів інтелектуалізації профільних ІАС належать також:

- експертні програми медичних призначень, тобто програми підказки лікарю під час прийняття рішення щодо діагностичних та профілактично-реабілітаційних заходів;
- використання інтелектуальних інформаційних технологій при наповненні банків банку знань;
- використання технології подолання мовного бар'єра при обміні інформацією між ГІСами.

Перелік елементів інтелектуалізації профільних ІАС поповнюється відповідно до розробки нових інформаційних технологій в медицині.

Охарактеризуємо у загальному вигляді функціональне наповнення банку знань інформаційно-довідкових систем, тобто наповнення банку даних. Банк даних таких систем містить відносно сталу інформацію:

- кількість койко-місць у відповідному профільному відділенні, наявність обладнання, його кількісні та якісні (технічні) характеристики, ступінь амортизації, вартість койко-дня у кожному профільному відділенні тощо (ІДС «Побут»);

- кадровий склад відділень (ІДС «Кадри»);

- наявність медикаментозних, у тому числі імунобіологічних, препаратів у відділеннях та госпітальному закладі в цілому (ІДС «Аптека»);

- наявність крові та її компонентів у даному госпітальному закладі (ІДС «Кров»);

- історії хвороб хворих, які виписані, по кожному профільному відділенню (ІДС «Архів»).

Банки даних ІДС «Аптека», «Кров» та «Побут» містять також змінну інформацію:

- кількість пацієнтів у кожному відділенні та госпітальному закладі в цілому, кількість вільних койко-місць у кожному відділенні, необхідне побутове забезпечення пацієнтів: кількість та номенклатура (ІДС «Побут»);

- необхідні медикаментозні, у тому числі імунобіологічні, препарати та кров по відділеннях і госпітальному закладі в цілому (ІДС «Аптека» і «Кров»).

Зазначимо, що наведене функціональне наповнення банку даних інформаційно-довідкових систем є відкритим.

Деякі **принципи** стосовно проблеми конструювання госпітальних інформаційних систем.

Принцип єдності структурної організації: архітектура кожної госпітальної інформаційної системи має бути інваріантна (побудована однотипно) щодо виду госпітального закладу.

Принцип стандартизації функціонального наповнення: будь-яка інформація, що надходить у банк знань медичної інформаційної системи, має бути стандартизована щодо історії хвороби, формалізації протоколів, програмних продуктів, оцінки соціальної шкідливості захворювань, ключових слів пошуку потрібної інформації тощо.

Принцип конфіденційності інформації: для його забезпечення необхідні заходи захисту передачі інформації про стан здоров'я пацієнта телекомунікаційними каналами зв'язку.

Саме розробка типової ГІС, удосконалення її архітектури та інфраструктури дасть змогу уникнути нестиковки мережевої взаємодії.

4.2.3. Телемедицина та віртуальний консиліум

Ще раз підкреслимо, що головною метою створення єдиного медико-інформаційного простору є поліпшення надання медичної допомоги незалежно від того, де знаходиться пацієнт. Вирішення цього завдання багато в чому залежить від можливостей своєчасної та адресної доставки пацієнту висококваліфікованих медичних послуг. Таку можливість останнім часом пов'язують з використанням телекомунікацій і комп'ютерних технологій у поєднанні з досвідом фахівців-медиків для надання медичної допомоги, тобто з телемедициною і як з вищим рівнем її функціонування — віртуальним консиліумом. Прообразами віртуального консиліуму можна вважати поняття колективного розуму як колективної творчості нового знання, що було запроваджено академіком В.М. Глушковым у 60-х роках ХХ ст., консиліум лікарів, що використовується у медицині як спосіб оптимізації прийняття рішень, і поняття телемедичної системи як зв'язок, якого не вистачає між домом та госпіталем, що було запроваджено Р.Г. Марком у 1974 р. З плином часу зміст поняття *телемедицина* зазнав певної еволюції. Найпоширеніша його інтерпретація до недавнього часу пов'язувалася з аудіовізуальним (телевізійним) спілкуванням між лікарем і пацієнтом (або лікарями).

Медичний віртуальний консиліум — це надання консультативної допомоги по телеканалах зв'язку:

- безпосередньо медиками-експертами за допомогою прямого контакту між колегами;
- з використанням інформаційно-консультативних систем вирішених конкретних медичних завдань, результати яких представлені мовою та образами, що зручні для сприйняття користувачем.

Останнє можна розглядати як новий шлях синтезу знань і доступу до них, тобто як свого роду *віртуальний центр знань* (ВЦЗ). Призначення ВЦЗ — допомогти користувачу при вирішенні конкретного завдання чи певного кола завдань. У такому розумінні ВЦЗ виступає як інформаційний агент, що надає користувачу необхідну інформацію: консультації, інформаційну підтримку вирішення певних завдань або проблем.

Можна погодитися з думкою, що телемедицина — це нова інформаційна технологія у медицині. Якщо *медицина* — це система наукових поглядів і практична діяльність, спрямовані на збереження та зміцнення здоров'я людей, запобігання хворобам та їх лікування, то *телемедицина* — це використання телекомунікацій і комп'ютерних технологій у поєднанні з досвідом фахівців-медиків для надання медичної допомоги на відстані. У такому контексті телемедицина поза єдиним медико-інформаційним простором існувати не може. Вона як спосіб передачі інформації (медичних знань) допомагає у «павутинні» ЄМІП надавати інформаційну допомогу (консультацію, підтримку для прийняття рішення) лікареві чи безпосередньо пацієнтові навіть у найвіддаленіших районах країни.

Отже, *телемедицина* — це медичні знання, отримані через будь-які канали зв'язку, в тому числі телекомунікаційні, з метою здійснення діагностико-профілактико-лікувально-реабілітаційних заходів. Таке тлумачення дає змогу розглядати телемедицину як біотехнічну систему, що включає: пацієнта; лікаря, котрий безпосередньо спілкується з пацієнтом; лікаря-консультанта, який опосередковано спілкується з пацієнтом по каналах зв'язку; технологічну систему (з персональним комп'ютером), що забезпечує двосторонній інформаційний зв'язок як необхідну умову створення єдиного алгоритму функціонування: пацієнт — лікар — технологічна система — лікар-консультант або пацієнт — технологічна систем — лікар-консультант.

Ефективність функціонування телемедицини, тобто її технологія, залежить від того, наскільки успішно будуть розв'язані суто технічні проблеми, з одного боку, і проблеми, пов'язані з людським фактором, — з іншого. Проблеми технічного плану — це створення систем передачі, збереження та відображення інформаційного продукту (даних, знань) з найменшими втратами (технологічними) і затратами (економічними). Слід зазначити, що онлайнова інформація, яка стосується здоров'я, користується великим попитом. Запровадження критеріїв якості веб-узлів, що надають інформацію на медичну тематику, і контроль за їх дотриманням будуть сприяти довірі користувачів та зростанню числа веб-ресурсів у галузі охорони здоров'я.

Друге коло проблем стосується людини і впливає з вимог ефективності єдиного алгоритму функціонування телемедицини як біотехнічної системи. Йдеться передусім про необхідність розуміння переданої інформації, бо тільки ставши зрозумілою, вона перетворюється на знання. Саме інтелектуальні інформаційні

технології дають можливість одержати нові знання у процесі віртуального консиліуму. Проблема розуміння, у свою чергу, висуває такі питання, як стандартизація, уніфікація, створення інтелектуального інтерфейса, а також забезпечення психологічної сумісності лікаря і консультанта.

Джерелом переданої інформації — медичних знань — можуть бути висококваліфіковані фахівці чи проблемно-орієнтовані інформаційно-аналітичні та інформаційно-довідкові системи, зосереджені в базових вузлах госпітальних інформаційних систем провідних клінік і центрів. У майбутньому виняткову роль можуть відіграти поліалгоритмічні експертні системи — проблемно орієнтовані комп'ютерні довідники з «інтегральним інтелектом», тобто з комп'ютерним колективним розумом, призначеним, наприклад, для визначення діагнозу, застосування лікарських й інших методів терапії та інші довідники.

Підкреслимо ще раз, що телемедицина має влитися у єдиний медико-інформаційний простір зі своїми специфічними завданнями, головними з яких є надання консультативної допомоги з діагностики та лікування, довідково-інформаційне обслуговування і навчання. Отже, в архітектурі такого простору слід відвести місце інфраструктурі, що вирішує специфічні завдання телемедицини, у тому числі завдання віртуального консиліуму як вищого рівня телемедицини. Складовою частиною цієї інфраструктури можуть виступати базові вузли госпітальних інформаційних систем, створених у спеціалізованих медичних центрах чи у спеціалізованих клініках, куди стікається лікувальний досвід висококваліфікованих фахівців з діагностики та лікування. Йдеться про так звані консультаційні базові вузли, з'єднані двостороннім зв'язком з усіма госпітальними закладами. А в майбутньому кваліфікована медична допомога має бути наближена до будь-якого місця, де вона потрібна в даний момент, незалежно від його віддаленості від госпітального закладу.

Отже, інфраструктура, що вирішує завдання телемедицини, є невід'ємною частиною архітектури єдиного медико-інформаційного простору. Телемедицина зі своїми новітніми технологіями передачі медичних знань, включаючи аудіо-, відеозображення, кольорове мобільне відеозображення, через мережеве середовище ЄМІП сприяє поліпшенню якості медичної допомоги шляхом імітації прямого контакту між колегами з консультації та між лікарем та пацієнтом.

Проблема створення єдиного медико-інформаційного простору, що містить інфраструктуру телемедицини як невід'ємну його частину, пов'язана з:

- розробкою нормативних баз: технічної, медичної та законодавчої;
- створенням предметно орієнтованих банків знань для наповнення ІАС, ІДС, ІСТК госпітальних інформаційних систем;
- наявністю мережі телекомунікацій, що забезпечує зв'язок між постачальником і споживачем медичної інформації;
- підготовкою кадрів, які забезпечують професійну і технічну підтримку ЄМІП;
- стандартизацією медичної інформації і документації та узгодженням з міжнародними стандартами; створенням медичних електронних карт на кожного мешканця країни, що виконують також функцію медичного моніторингу населення;
- розробкою сумісного програмно-апаратного забезпечення накопичення, аналізу, дистанційної передачі медичної інформації, захисту її від перекручування та несанкціонованого доступу та ін.

Отже, *єдиний медико-інформаційний простір* — це *колективний інтелект*, який відкриває нові можливості діагностики та лікування захворювань в умовах територіальної роздрібненості лікувально-оздоровчих структур. Він покликаний зробити максимально доступним для якнайширшого використання досвід висококваліфікованих фахівців-медиків.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення біоекомединици, її об'єкта, предмета та методу.
 2. У чому полягає глобальна мета досліджень біоекомединици?
 3. Яка мета комп'ютерно-інформаційного простору біоекомединици?
 4. Які основні структурні одиниці цього простору?
 5. Скільки рівнів ієрархії має архітектура інформаційного простору біоекомединици?
 6. Які мета і функціональне призначення єдиного медико-інформаційного простору (ЄМІП)?
 7. Що являє собою структура ЄМІП?
 8. Що являє собою локальна мережа госпітальної інформаційної системи (ГІС)?
 9. Що є критерієм розподілу медичних інформаційних систем на класи?
 10. Охарактеризуйте функціональне наповнення структурних одиниць ГІС.
 11. Що таке телемедицина?
-

СЛОВНИК ОСНОВНИХ ТЕРМІНІВ

Адаптація — процес пристосування функціонування організму до умов середовища, що змінюються.

Адаптивний алгоритм керування — алгоритм, який здатний в процесі функціонування змінювати свою структуру і параметри залежно від інформації, що надходить.

Алгоритм програмного керування — алгоритм керування, що не пов'язаний з необхідністю використання поточної інформації про стан керованого показника, тобто відсутній зворотний зв'язок.

Архітектура інформаційного простору біоеко медицини — корпоративна ієрархічна мережа, яка об'єднує предметно-проблемно-орієнтовані на здоров'я людини інформаційні поля знань предметних галузей біології, екології і медицини, що має принаймні три рівні ієрархії.

Банк знань — банк даних, банк методів, банк моделей і банк вирішених завдань.

Біоеко медицина — міждисциплінарна галузь науки та практичної діяльності, яка цілеспрямовано синтезує інформаційні відомості біології, екології та медицини і генерує нові знання, спрямовані на досягнення та розширення зони здоров'я людини, а також формування гармонійно розвиненої особистості.

Біологічна кібернетика — науковий напрям кібернетики, що вивчає загальні закони отримання, зберігання, перетворення та передачі інформації в біологічних системах керування.

Біологічна та медична інформатика — науковий напрям, що вивчає складність та організацію процесу дослідження біологічних і медичних систем за допомогою алгоритмізації усвідомлених дій дослідника, фіксації його логіко-евристичних міркувань, шлях вирішення завдань.

Біотехнічна система — комплексна система, що містить об'єкт дослідження, діагностики і /або керування; дослідника або лікаря та технічну підсистему, у тому числі комп'ютер, об'єднаних єдиним алгоритмом функціонування.

Верифікація моделі — порівняння характеристик моделі та реального об'єкта за однакових умов з метою визначення вірогідності моделі та меж її застосування.

Гепатичний глікозний баланс — глікогенна функція печінки, яка являє собою різницю між глікогеносинтезуючою та глікогенолізуючою здатністю.

Гістограма (стовбчаста діаграма) — один із видів графічного зображення статистичного розподілу будь-якої величини за кількісною ознакою.

Диференціальне рівняння — рівняння, що містить похідні невідомої функції або декілька невідомих функцій.

Еко норма здоров'я людини — такий стан, коли основні показники життєдіяльності людини при взаємодії з оточуючим середовищем не виходять за межі фізіологічної норми (фізичне здоров'я), за межі адекватної інтелектуальної, емоційної та свідомо-вольової взаємодії з оточуючим екосередовищем (психічне здоров'я) та за межі адекватної поведінки особистості в оточуючих екосередовищах (соціальне здоров'я).

Екстремальне екосередовище — стан екосередовища, що спричиняє такі порушення еко норми, які викликають різні патологічні стани організму та особистості аж до летального кінця.

Єдиний медико-інформаційний простір — єдина мережа взаємодіючих комп'ютеризованих госпітальних установ зі своїми локальними інформаційними системами і інформаційно-аналітичними центрами різного рівня ієрархії (регіонального та державного).

Здорова особистість — особистість, яка має здатність адекватно реагувати й адаптуватися до умов біологічного, психічного і соціального середовища, що постійно змінюються, здатна морально удосконалювати себе, підтримувати високу особисту дієздатність.

Здоров'я — нормальне внутрішньосистемне функціонування статусів (фізичного, психічного, соціального) як потенційного базису індивідуума та адекватний системно-середовищний і внутрішньосистемний їх прояв у соціальній поведінці особистості.

Здоров'я екосередовищ — такий стан екосередовищ (довкілля, соціального, інтелектуального, духовного), що не шкодить здоров'ю людини, його фізичному, психічному і соціальному статусам та сприяє розкриттю усіх його потенційних можливостей — фізичних, духовних та інтелектуальних.

Інформація — продукт усвідомлення даних, що знижує рівень невизначеності відомостей про природу об'єкта чи явища, яке спостерігається або досліджується.

Інформаційний показник — натурний показник, перетворений відповідно до положення натурального показника на шкалі його зміни в нормовану, уніфіковану відносну форму, яка дає змогу одержати інформаційну оцінку стану системи за цим показником.

Інформаційно-аналітична система — автоматизована система, що містить крім корпоративної інформації довідкового характеру (банк даних) відомості про методи, моделі та вирішені завдання, тобто повний банк знань.

Інформаційні технології у біології та медицині — сукупність засобів, методів та алгоритмів, що базуються на особливостях інформаційних процесів у біосистемах, тобто біологічно та медично верифікований інформаційний продукт, який може бути застосований для вирішення наукових та прикладних завдань у предметних галузях біології та медицини.

Інформаційно-консультативна система — автоматизована система, що містить алгоритми рекомендацій щодо вирішення різних завдань і прогнозу результату такого вирішення.

Інформаційно-довідкова система — автоматизована система, що містить корпоративну інформацію довідкового характеру (банк даних).

Інформаційно-структурна модель — структурована інформація за проблемою у вигляді різноякісних, взаємопов'язаних інформаційних блоків (з їх вербальним описом), що у сукупності максимально повно характеризують проблему.

Інфотомування — одержання інформаційного знання про пошировку структурну організацію об'єкта, що досліджується.

Компартментальна модель — представлення цілісного організму, або окремої системи, або органа чи клітини як сукупності об'ємів, компартментів, камер (іноді застосовують термін «уявний простір»), де розподіляється, транспортується, переноситься, метаболізує речовина, яка цікавить дослідника.

Кореляційний портрет — графічне відображення структурної організації взаємовідносин між усіма показниками, об'єднаних сіткою кореляційних зв'язків.

Локальна мережа госпітальної інформаційної системи — мережа, що об'єднує інформаційно-довідкові, інформаційно-аналітичні системи профільних відділень госпітального закладу, зв'язує їх з його базовим вузлом та забезпечує доступ до госпітальної інформаційної системи інших госпітальних закладів, базовими інформаційними вузлами різної ієрархії та до Інтернету.

Медична кібернетика — науковий напрям кібернетики, що вивчає загальні закони отримання, зберігання, перетворення і передачі інформації про здоров'я індивідуума і суспільства та організацію процесів керування здоров'ям індивідуума і суспільства.

Метод евристичного моделювання — створення математичної моделі об'єкта на основі гіпотези про його структуру та функції. При цьому використовуються наявні в літературі якісні та кількісні дані, а відсутні дані отримують шляхом припущень на базі якісної гіпотези.

Норма (фізична) — середньостатистичний діапазон кількісних значень показників організму, коли кількісні значення ще не переходять у якісні зміни.

Системний гомеостаз — підтримання сталості структурно-функціональної організації фізіологічної системи як цілісної, незалежної сталості її параметрів та виконання системної функції.

Системний підхід — пошук ізоморфних елементів різних систем, встановлення відношень між ними, синтез окремих структур і підструктур, що дає можливість зрозуміти, як функціонують складні системи.

Структура особистості — психологічна категорія, яка відображає взаємовідносини і загальнолюдських властивостей, і властивостей особистості, сукупність яких (різних за своїм походженням) становить її головну сутність.

Телемедицина — використання телекомунікацій та інтелектуальних інформаційних технологій у поєднанні з досвідом фахівців-медиків для надання медичної допомоги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Айзенк Г.* Структура личности. — М.: КСП+, 1999. — 270 с.
- Амосов Н.М.* Метод моделирования социальных систем // *Вопр. эвристического моделирования.* — 1969. — № 2. — 120 с.
- Амосов Н.М.* Природа человека. — Киев: Наук. думка, 1983. — 222 с.
- Антомонов Ю.Г., Котова А.Б.* Введение в структурно-функциональную теорию нервной клетки. — Киев: Наук. думка, 1976. — 263 с.
- Антомонов Ю.Г.* Моделирование биосистем: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1977. — 200 с.
- Антомонов Ю.Г., Котова А.Б., Зотов В.П.* Основы биологической информатики: В 2 ч. Ч. 1: Теоретическая биоинформатика. — 180 с.; Ч. 2: Биоинформатика в задачах и ответах. — 182 с. — Киев: Медэкол, 1996.
- Бадалян Л.О., Скворцов И.А.* Клиническая электромиография. — М.: Медицина, 1986. — 368 с.
- Белов В.М.* Структура «обобщенной» личности как объект моделирования // *Биологическая, медицинская кибернетика и бионика.* — Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1971. — С. 315—325.
- Бернс Э.* Развитие Я-концепции и воспитание / Пер. с англ. — М.: Прогресс, 1986. — 422 с.
- Берштейн Н.А., Крестовников Н.А., Маршак М.Е.* Физиология человека. — М.: Физкультура и спорт, 1994. — 329 с.
- Биологическая и медицинская кибернетика: Справочник* / О.П. Минцер, В.Н. Молотков, Б.Н. Угаров и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 376 с.
- Биоэкомедицина.* Единое информационное пространство / В.И. Гриценко, А.Б. Котова, М.И. Вовк и др. — Киев: Наук. думка, 2001. — 314 с.
- Брехман И.И.* Валеология — наука о здоровье. — М.: Физкультура и спорт, 1990. — 208 с.
- Ващук Ф.Г.* Введение в проблему информационно-структурного моделирования процесса исследования и системы фор-

мирования психо-социальной сферы. — Ужгород, 1995. — 144 с.

Введение в оздоровительную реабилитацию / В.П. Зотов, Ю.Г. Антонов, А.Б. Котова, В.М. Белов. — Киев: Медэкол, УкрРНПФ «Медицина-Экология», 1995. — 181 с.

Вовк И.В., Дахнов С.Л., Крыжановский В.В., Олійник В.Н. Возможности и перспективы диагностики легочных патологий с помощью компьютерной регистрации и обработки шумов дыхания // Акуст. вісн. — 1998. — 1, № 2.

Войтенко В.П. Здоровье здорового человека. — Киев: Здоровье, 1991. — 246 с.

Вычислительные машины и мышление / Под ред. Э. Фейгенбаума, Дж. Фельдмана. — М.: Мир, 1967. — 552 с.

Грин Н., Стаут У., Тейлор Д. Биология. — М.: Мир, 1990. — Т. 2. — 327 с.; Т. 3. — 374 с.

Гриценко В.И., Вовк М.И., Котова А.Б. Введение в архитектуру информационного пространства. — Киев: Наук. думка, 2003. — 167 с.

Гриценко В.И., Вовк М.И., Козак Л.М., Котова А.Б. Информационные технологии в биологии и медицине: проблемы, задачи, достижения // Укр. журн. мед. техніки і технології. — 1999. — № 4. — С. 5—13.

Каган М.С. Человеческая деятельность (опыт системного анализа). — М.: Изд-во полит. лит-ры, 1974. — 270 с.

Карвасарский Б.Д. Медицинская психология. — Л.: Медицина, 1982. — 272 с.

Кибернетика и биомедицина: состояние и проблемы развития / В.И. Гриценко, Л.С. Алеев, А.Б. Котова и др. // Кибернетика и системный анализ. — 2003. — № 4. — С. 181—188.

Леонтьев А.Н. Деятельность, сознание, личность. — М.: Изд-во полит. лит-ры. — 1975. — 240 с.

Магльований А., Белов В., Котова А. Організм та особистість. Діагностика та керування. — Львів: Мед. газета України, 1998. — 250 с.

Мінцер О.П., Вороненко Ю.В., Власов В.В. Оброблення клінічних і експериментальних даних у медицині. — К.: Вища шк., 2003. — 350 с.

«Миотон» в управлении движениями / Л.С. Алеев, М.И. Вовк, В.Н. Горбанев и др. — Киев: Наук. думка, 1980. — 144 с.

Нейрокомпьютеры и интеллектуальные роботы / Э.М. Куссуль, Н.М. Амосов, Т.Н. Байдык и др. — Киев: Наук. думка, 1991. — 310 с.

Поляков В.А. Психология развития личности в системных отношениях. — М.: Новый центр, 1999. — 128 с.

Потанков А.Г. Эвристика, методология и диалектика моделирования. — Суздаль: Знание, 1993. — 73 с.

Сергієнко І.В. Інформатика в Україні: становлення, розвиток, проблеми. — К.: Наук. думка, 1999. — 352 с.

Теоретические исследования физиологических систем / Н.М. Амосов, Б.Л. Палец, Б.Т. Агапов и др. — Киев: Наук. думка, 1977. — 245 с.

Черниговская Н.В. Адаптивное управление в неврологии. — Л.: Медицина, 1978. — 370 с.

Список літератури

Хьелл Л., Зинглер Д. Теории личности (основы, положения, исследование и применение). — СПб: Питер Ком, 1999. — 608 с.

Щепаньский Ян. Элементарные понятия социологии. — М.: Прогресс, 1969. — С. 51—69.

Aleev L.S., Vovk M.I. Functional Electrostimulation with Myofeedback in Movement Rehabilitation // Proc. 5th Intrn. Muscle Symp. — Vienna, 2000. — P. 69—70.

Gullahorn J.T., Gullahorn J.E. Homunculus: A simulation of Social Interaction. — Michigan: Michigan State Univ., 1962. — P. 67—89.

Hall C.S., Lindzey C. Theories of Personality. — 2nd ed. — New York: Willey & Sons, 1970. — 628 p.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
-----------------	---

ЧАСТИНА 1

Вступ до курсу «Інформаційні технології в біології та медицині»

РОЗДІЛ 1.1

ЕВОЛЮЦІЯ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ	7
--	----------

1.1.1. Предмет дослідження біології та медицини.....	7
1.1.2. Складові біологічної та медичної кібернетики.....	11
1.1.3. Поняття біологічної та медичної інформатики	16
1.1.4. Аксиоматика інформаційних технологій.....	18
1.1.5. Основні досягнення та прогноз розвитку деяких напрямів інформаційних технологій в біології та меди- цині.....	23

РОЗДІЛ 1.2

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ПРОБЛЕМА	30
--	-----------

1.2.1. Метод інформаційно-структурного моделювання ...	30
1.2.2. Метод інфомовування.....	40

РОЗДІЛ 1.3

УСВІДОМЛЕННЯ ПЕРВИННОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО МАСИВУ	45
--	-----------

1.3.1. Табличне представлення даних як функція задачі... 45	45
1.3.2. Методи селекції первинного масиву даних експери- менту	50
1.3.3. Гістограмний аналіз та кореляційний портрет	53
1.3.4. Метод уніфікації показників	62
1.3.5. Методи побудови узагальнених оцінок	71

РОЗДІЛ 1.4

МОДЕЛЮВАННЯ ЯК УСВІДОМЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ	78
1.4.1. Основні положення методу математичного моделювання	78
1.4.2. Міра складності та організації біосистем. Класифікаційна діаграма ...	81
1.4.3. Інформаційні технології синтезу алгебраїчних моделей біосистем ..	86
1.4.4. Інформаційні технології синтезу динамічних моделей біосистем....	96
Контрольні запитання.....	119

ЧАСТИНА 2

**Моделювання як основа синтезу
інформаційних технологій та систем****РОЗДІЛ 2.1**

ЕВОЛЮЦІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ НЕРВОВОЇ КЛІТИНИ	123
2.1.1. Фізіологічні передумови моделювання.....	123
2.1.2. Функціональні моделі динаміки електричного потенціалу нейрона ..	125
2.1.3. Модель Ходжкіна—Хакслі.....	130
2.1.4. Модифікація моделі Ходжкіна—Хакслі.....	134
2.1.5. Структурно-функціональна модель динаміки синаптичних про- цесів.....	138

РОЗДІЛ 2.2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКЦІЇ ОРГАНІЗМУ НА ПОВТОРНУ ДІЮ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН	143
2.2.1. Синтез інформаційного масиву.....	143
2.2.2. Алгоритмічна стратегія виявлення адаптації	145
2.2.3. Математична модель динаміки «чистої» кривої адаптації	151

РОЗДІЛ 2.3

СИСТЕМА ВУГЛЕВОДНОГО ОБМІНУ: МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ	155
2.3.1. Фізіологічні передумови моделювання.....	155
2.3.2. Математичне моделювання.....	162
2.3.3. Алгоритми керування. Синтез алгоритму зі зворотним зв'язком ..	172
2.3.4. Оптимальне програмне керування	177
2.3.5. Програмне керування за узагальненим критерієм якості	181
2.3.6. Адаптивне керування	185
2.3.7. Підтримка глікемічного гомеостазу при рідких вимірюваннях.....	188

РОЗДІЛ 2.4

МОДЕЛЮВАННЯ ОСОБИСТОСТІ ТА СОЦІАЛЬНОЇ ПОВЕДІНКИ	193
2.4.1. Специфіка моделювання складних систем	193
2.4.2. Гіпотеза про внутрішню структуру моделі «узагальненої» особистості	199
2.4.3. Еволюція моделей особистості та соціальної поведінки	206
2.4.4. Математичні моделі динаміки «ключових» якостей особистості ...	227

РОЗДІЛ 2.5

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ «ІНДЕКСУ ЗДОРОВ'Я»	239
2.5.1. Інформаційний простір проблеми здоров'я	239
2.5.2. Інформаційна структура інтегрального здоров'я	246
2.5.3. Особливості взаємин здоров'я, норми і гомеостазу	247
2.5.4. Інформаційно-структурна модель фізичного статусу здоров'я	249
2.5.5. Інформаційно-структурна модель психічного статусу здоров'я	258
2.5.6. Інформаційно-структурна модель соціального статусу здоров'я ...	271
Контрольні запитання	281

ЧАСТИНА 3**Теорія біотехнічних систем та її застосування**

РОЗДІЛ 3.1

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СИНТЕЗУ БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	285
3.1.1. Ключові властивості біотехнічних систем	285
3.1.2. Класифікація біотехнічних систем	287
3.1.3. Метод як основа синтезу біотехнічних систем	290
3.1.4. Біотехнічна система як засіб одержання нового знання	291

РОЗДІЛ 3.2

ОСНОВИ СИНТЕЗУ БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХАМИ ЛЮДИНИ ЯК ЦІЛЕСПРЯМОВАНИХ	297
3.2.1. Фізіологічні передумови синтезу	300
3.2.2. Принципи формування рухів за допомогою біотехнічних систем	311
3.2.3. Еволюція синтезу біотехнічних систем програмного керування рухами	312
3.2.4. Технологія синтезу біологічно адекватної системи керування рухами	318
3.2.5. Біотехнічні системи як цілеспрямовані. «Образне» керування рухами	331
Контрольні запитання	340

ЧАСТИНА 4

**Організація інформаційного поля знань біологічної
та медичної спрямованості**

РОЗДІЛ 4.1

**БІОЕКОМЕДИЦИНА: ЦІЛЕСПРЯМОВАНИЙ СИНТЕЗ ІНФОРМАЦІЙНОГО
ПОЛЯ ЗНАНЬ БІОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНИ 343**

4.1.1. Інформаційно-структурна модель біоекомедини..... 343

4.1.2. Комп'ютерно-інформаційний простір біоекомедини 352

РОЗДІЛ 4.2

ЄДИНИЙ МЕДИКО-ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПРОСТІР..... 357

4.2.1. Архітектура єдиного медико-інформаційного простору 357

4.2.2. Госпітальні інформаційні системи..... 362

4.2.3. Телемедицина та віртуальний консиліум 368

Контрольні запитання..... 371

СЛОВНИК ОСНОВНИХ ТЕРМІНІВ 372

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ 376

Навчальне видання

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ЦЕНТР
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І СИСТЕМ

ГРИЦЕНКО Володимир Ілліч
КОТОВА Аліна Борисівна
ВОВК Майя Іванівна
КІФОРЕНКО Світлана Іванівна
БЄЛОВ Володимир Михайлович

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

Курс лекцій

Київ, Науково-виробниче підприємство
«Видавництво “Наукова думка” НАН України», 2007

Художнє оформлення *В.Д. Кузьменка*
Художній редактор *І.Р. Сільман*
Технічний редактор *Т.М. Шендерович*
Коректор *Л.Г. Бузіашвілі*
Оператор *О.О. Іщенко*
Комп'ютерна верстка *Л.В. Багненко*

Підп. до друку 03.09.2007. Формат 60×90/16. Папір. офс. Гарн. Таймс.
Ум. друк. арк. 24,0. Ум. фарбо-відб. 24,0. Обл.-вид. арк. 25,04.
Наклад 300 прим. Зам. 7—1245

Оригінал-макет підготовлено у НВП
«Видавництво “Наукова думка” НАН України»
01601 Київ 1, вул. Терещенківська, 3

ЗАТ фірма “Віпол”
03151 Київ 151, вул. Волинська, 60

Свідоцтво про внесення до державного реєстру
серія ДК № 752 від 27.12.2001