

складає взаємодія з машиною, об'єктом управління і виробничим середовищем. Це може бути як робітник, що виконує фізичну роботу за допомогою найпростішого знаряддя праці, так і оператор, що спостерігає за перебігом автоматизованого виробництва за показниками контрольно-вимірювальних приладів, космонавт, що здійснює політ навколо земної орбіти.

Поняття «машина» означає як найпростіші знаряддя праці (молоток, лопата тощо), так і металообробні верстати, або космічні кораблі. Це знаряддя праці людини, а вона сама — суб'єкт праці.

«Середовище» (виробниче середовище) — сукупність фізичних, хімічних, біологічних і психофізіологічних факторів, що впливають на оператора СЛТС на його робочому місці.

«Об'єкт управління» — об'єкт, на який спрямований вплив усієї СЛТС. Це об'єкт (предмет) праці оператора.

Будь-яка система має вхід й вихід. Якщо між входом і виходом є зворотний зв'язок, така система є замкненою і незамкненою, якщо такий зв'язок відсутній.

Типовим прикладом замкненої системи є водій і автомашина. Входом системи буде зір водія, за допомогою якого він сприймає показання спідометра, а виходом — колеса машини, швидкість обертання яких контролюється спідометром. Прикладом розімкненої системи є запуск двигуна при натискуванні на статер (рис. 4.2).

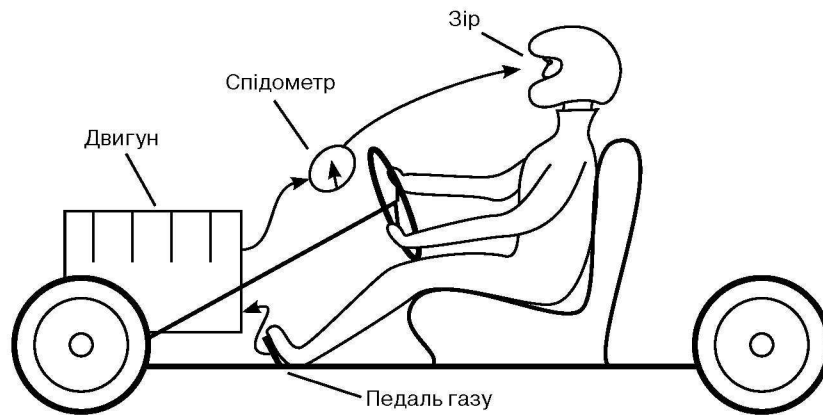


Рис. 4.2. Схема системи зі зворотним зв'язком (замкнута система)

За структурою машинного компонента СЛТС можуть бути різного рівня складності:

- інструментальні системи, в яких технічними пристроями є інструменти і прилади;
- системи, які включають технічні пристрої і людину, що використовує ці пристрої;

- системи, в яких людина управляє сукупністю технологічно взаємопов'язаних, але різних за функціональним призначенням апаратів, пристроїв і машин;
- у вигляді системотехнічних комплексів, у яких людина взаємодіє не тільки з технічними пристроями, а й іншими людьми.

За ступенем участі людини у роботі СЛТС розрізняють системи автоматичні, автоматизовані і неавтоматизовані. У роботі автоматичної системи людина виконує лише функції установки програм і контролю. Робота автоматичних систем здійснюється за участю людини, яка виступає як центральна ланка, що управляє технікою. У неавтоматизованих системах робота виконується людиною без застосування технічних пристроїв.

Загальну структурну схему управління СЛТС подано на рис. 4.3.

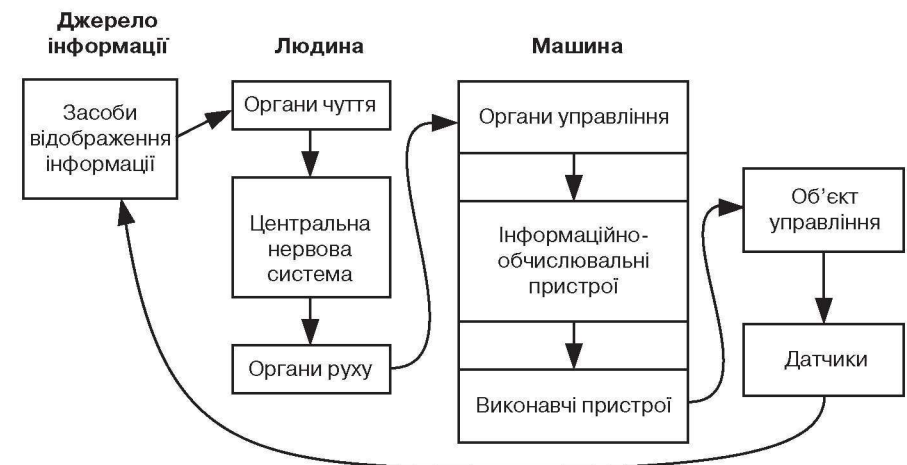


Рис. 4.3. Структурна схема управління

Під час взаємодії з машиною оператор отримує інформацію про стан об'єкта управління (ОУ). На підставі переробки цієї інформації відповідно до певних правил оператор виробляє командну інформацію, яка вводиться в машину і впливає на ОУ. Тобто, між окремими ланками системи утворюється замкнений інформаційний контур (рис. 4.4).

Отже, в діяльності оператора СЛТС можуть бути виділені чотири основних етапи, кожен з яких може бути джерелом помилок і відповідно джерелом небезпеки як для життєдіяльності людини, так і всієї системи в цілому.

1 етап — *сприймання інформації* щодо об'єктів управління та навколишнього середовища. При цьому оператор має помітити сигнали, виділити їх із сукупності найбільш важливих та розшифрувати.

2 етап — оцінка і переробка інформації. На цьому етапі порівнюються задані реальні режими роботи системи, здійснюється аналіз та узагальнення інформації, виділяються критичні об'єкти і ситуації. На підставі вже відомих критеріїв важливості і терміновості встановлюється черговість обробки інформації.



Рис. 4.4. Канали зв'язку між ланками системи управління

3 етап — прийняття рішення про необхідні дії на підставі проведеного аналізу та оцінки інформації, а також на підставі інших відомостей про мету й умови роботи системи, можливі способи дії, наслідки правильних і неправильних рішень.

4 етап — реалізація прийнятого рішення шляхом використання певних рухових дій або видачі відповідних розпоряджень.

Перші два етапи називають отриманням інформації, інші два — її реалізацією.

Отримання інформації відбувається через сприймання оператором інформаційної моделі (ІМ). ІМ — умовне відображення інформації про стан ОК, що складається з багатьох сигналів, які з'являються на спеціальних приладах (засобах відображення інформації). ІМ є підставою для формування *перцептивного образу* (ПО). *Процес формування ПО називається сприйманням, або перцепцією*. Після переробки цих сигналів у свідомості оператора формується логічне знання про об'єкт, яким управляють. Це знання називають *концептуальною моделлю* (КМ), або *оперативним образом*. На базі КМ приймається рішення з управління СЛТС.

Сприймання оператором інформації психологи розглядають як процес формування перцептивного образу. ПО — суб'єктивне відображення у свідомості людини властивостей об'єкта, що на неї діє. Головними психічними процесами, які забезпечують перебіг цього

етапу діяльності оператора СЛТС, є процеси відчуття, сприймання, мислення та уяви.

Відчуття та сприймання складають перший (початковий) рівень пізнання оператором сигналу — *чуттєвий (сенсорно-перцептивний)*. Мислення й уява належать до другого рівня — логічного.

Відчуття — елементарний сенсорний образ. Він виникає при безпосередній дії подразників на органи чуття. Відчуття поділяють на зорові, слухові, рухові, смакові, нюхові, температурні, вібраційні, відчуття рівноваги, прискорення та ін. Основними властивостями відчуттів є *якість, інтенсивність, просторова локалізація і тривалість*.

Якість відчуттів — це ознака сенсорного образу, яка дає змогу відрізнити його від такого ж образу іншої модальності.

Інтенсивність відчуттів — кількісна характеристика ступеня яскравості, виразності відображення людиною властивостей предметів і явищ. Вона залежить від сили діючого подразника, стану *аналізатора*, його місця в сенсорній організації людини.

Просторова локалізація — відтворення у відчуттях місцезнаходження подразника.

Тривалість відчуттів визначається часом, протягом якого сенсорний образ змінює свої якості і залежить від інтенсивності дії подразника.

На відміну від відчуттів, що відображають лише властивості предметів і явищ, *сприймання* — *цілісний перцептивний образ*, що містить у собі сукупність властивостей, які отримує людина за допомогою органів чуття. Саме сприймання характеризується певними властивостями — *цілісністю, структурністю, константністю, усвідомленістю, предметністю, вибірковістю*. Ці властивості формуються у процесі розвитку людини, становлення її професійної майстерності.

Цілісність сприймання виникає внаслідок аналізу і синтезу комплексних подразників.

Структурність пов'язана зі сприйняттям взаємозв'язків між елементами відчуттів, що забезпечує цілісний образ предмета.

Константність сприймання характеризується відносною постійністю властивостей предметів незалежно від умов сприймання.

Усвідомленість сприйняття означає, що сприйнятий об'єкт належить до певного класу, визначеного у розумі й узагальненого у слові.

Предметність сприймання означає, що людина сприймає світ не у вигляді окремих відчуттів, а у формі окремих предметів.

Вибірковість сприймання полягає у відокремленні одних предметів серед багатьох інших, що діють на людину.

Процес формування перцептивного образу проходить стадійно за рахунок таких перцептивних дій, як:

- знаходження — виявлення об'єкта на фоні;
- розрізнення — усвідомлення предмета сприймання шляхом позначення;
- ідентифікація — виділення суттєвих ознак об'єкта і віднесення його до певного класу;
- розпізнавання — усвідомлення предмета сприйняття шляхом позначення.

Тривалість цих стадій залежить від складності діючих сигналів.

Перцепція є шлях переходу об'єктивних матеріальних характеристик об'єкта у суб'єктивні, психічні. Так, предмет сприйняття переходить у стан самого суб'єкта.

На якість формування ПО оператора СЛТС впливає тип, кількість індикаторів, організація інформаційного поля, характеристика інформації.

Розглянуті вище психічні процеси є підґрунтям діяльності оператора СЛТС і суттєво впливають на безпечність її функціонування, оскільки людина є основною ланкою системи, яка ставить мету, координує, направляє всі процеси у СЛТС.

Тільки людина здатна працювати в несподіваних ситуаціях, їй властиві висока гнучкість і адаптивність до мінливих зовнішніх впливів. Може застосовувати нагромаджений досвід і загальні принципи вирішення конкретних проблем. Людина має великі можливості для вибору засобів дії, може швидко використовувати резерви, виправляти помилки. Здатна робити висновки за неповної інформації про події, імпровізовано реагувати на них. Здатна виконувати дії в умовах перевантаження. У той же час можливості людини обмежені щодо обсягів сприймання і швидкості переробки інформації. Їй притаманне зменшення працездатності внаслідок розвитку втоми, залежність ефективності функціонування від фізичного і емоційного станів. Отже, людина є джерелом небезпеки для СЛТС. За статистичними даними, 80% випадків автотрагедій відбувається внаслідок неадекватних дій людини. Це призводить до загибелі 250 тис. людей на рік.

У той же час тільки людина здатна творчо мислити, що дає змогу їй вирішувати нові, не передбачені програмою завдання, розв'язувати складні проблемні ситуації. Отже, вона є елементом, що забезпечує безпечність функціонування СЛТС. Американські дослідники підрахували, що надійність автоматизованих систем при польоті навколо Місяця становить лише 22%, а за участю людини — до 93%. Польоти космічних кораблів «Friendship» та «Восход» могли б закінчитися трагічно, якби космонавти не скористувалися ручним управлінням.

Людину у СЛТС розглядають аналогічно з теорією автоматичного регулювання як динамічну ланку системи управління, яка має сенсорні (чутливі) входи, алгоритмізуючу частину, що виробляє управ-

лінські рішення і моторні (рухові і мовні) виходи, що реалізують ці рішення (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Людина як ланка управління

Головною функцією оператора як динамічної ланки СЛТС, є *передавальна функція* — $W(p)$. У найпростішому випадку вона може бути представлена як відношення вхідного сигналу ($X_{вх}$) до вихідного ($X_{вих}$):

$$W(p) = \frac{X_{вх}(p)}{X_{вих}(p)}$$

Отже, оператор ототожнюється з логічним фільтром чи блоком дискретного відбирання даних тощо. Його перехідні *динамічні* характеристики залежать від типу нервової діяльності, ступеня стомленості, виду вхідних сигналів тощо. Поряд із динамічними, оператора характеризують *статичні* функції, такі, як чутливість аналізаторів, їх порогові закономірності тощо. Тому найкращим чином оператор діє, коли відіграє роль звичайного підсилювача. В інших випадках точність його роботи значно менша.

Для побудови моделей діяльності оператора у СЛСТ застосовують методи *теорії масового обслуговування* і *методи теорії автоматичного управління*. Побудова моделей ґрунтується на аналізі системи, під час якого встановлюються: критерії поведінки замкнутої системи і визначення її передавальної функції, передавальна функція оператора, яка дала б змогу отримати необхідну функцію всієї системи тощо. Структурну схему лінійної моделі діяльності оператора наведено на рис. 4.6.

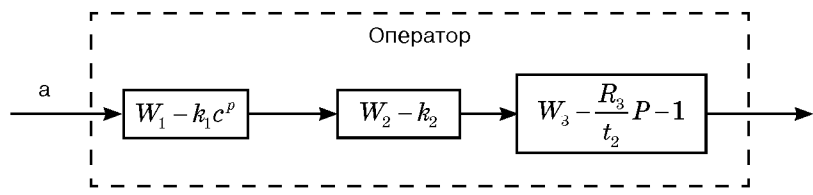


Рис. 4.6. Структурна схема лінійної моделі

На цій моделі оператор проданий у вигляді трьох послідовно з'єднаних ланок. Перша ланка здійснює сприймання сигналів: за своїми динамічними властивостями вона є підсилювальною ланкою із запіз-

ненням. Друга ланка — розрахункова. Вона є звичайним підсилювачем. Третя ланка оператора — виконавча. За своїми властивостями вона є інерційною ланкою.

Загальна передавальна функція такої моделі оператора може бути записана як добуток передавальної функції окремих ланок:

$$W(p) = W_1 W_2 W_3 = \frac{k_1 e^{-p\tau}}{p} + 1,$$

де $k = k_1, k_2, k_3$ — коефіцієнт підсилення оператора;

τ_1 — час реакції оператора, що дорівнює у середньому 0,2 с;

τ_2 — постійна терміну, що характеризує інерцію (приблизно 0,125 с) при створенні виконавчої дії.

Диференціальні рівняння, що реалізують передавальну функцію оператора, встановлюються для кожного конкретного випадку управління і визначаються на основі експериментальних даних за методами теорії автоматичного управління. Для одноканальної системи управління $W(p)$ має вигляд:

$$W(p) = \frac{e^{-p\tau} (1 + pT_1) k}{(1 + pT_2)(1 + pT_3)},$$

де $e^{-p\tau}$ — оператор, що враховує природну затримку реакції людини;

τ — час чистої затримки;

T_1 — постійна часу випередження;

T_2, T_3 — постійні часу затримки;

k — коефіцієнт підсилення.

Незважаючи на загальні риси діяльності оператора, можна виділити окремі види операторської праці, для яких характерні свої особливості.

- а) *оператор-технолог* — безпосередньо включений у технологічний процес, працює в режимі термінового обслуговування, його галузь — переважно виконавчі дії, керується інструкцією;
- б) *оператор-маніпулятор* — у його діяльності головну роль відіграє сприйняття інформації та рухові дії, велика питома вага виконавчих дій;
- в) *оператор-спостерігач* — у його діяльності переважають процеси отримання інформації і її первинної оцінки, виконавчі дії дуже спрощені;
- г) *оператор-дослідник* — у його діяльності на передній план виступають функції прийняття рішень, логічної обробки інформації тощо;
- д) *оператор-керівник* — у його діяльності переважають процеси мислення. Його діяльність полягає у керівництві людьми, здійснюється як безпосередньо, так і опосередковано — через технічні засоби.

Незалежно від типу оператора його діяльність у СЛТС може відбуватися за одним із типів: *детермінованому* (тобто за заздалегідь

відомим алгоритмом дій) — інструкціями, правилами тощо, або *недетермінованому* — коли можливі негадані події, але відомі дії щодо поведінки в цих умовах.

Методичні засади оцінки діяльності оператора СЛТС

Для опису та оцінки діяльності оператора застосовують математичний апарат *теорії інформації*. Теорія інформації — це наука, яка вивчає виникнення, отримання, переробку, зберігання і передавання інформації. Розробником теорії інформації є К. Шеннон. За К. Шенноном, інформацію визначають як функцію відношення кількості можливих відповідей до і після її отримання, тобто функцію відношення апостеріорної імовірності події до її апріорної імовірності:

$$I = f(P_1/P_0),$$

де I — кількість інформації;

P_0 — імовірність події до приймання інформації;

P_1 — імовірність події після приймання інформації.

Інформація — це міра зменшеної невизначеності події або явища.

Кількісною мірою невизначеності є *ентропія*. Невизначеність системи зменшується при отриманні певних відомостей про систему, і відповідно зменшується її ентропія.

Якщо апріорна ентропія системи була H_0 , а після отримання повідомлення — H_1 , то кількість отриманої інформації становитиме:

$$I = H_0 - H_1.$$

Під інформацією при аналізі діяльності оператора СЛТС розуміють повідомлення про процес управління СЛТС, яке відображається певними засобами, сприймається оператором, а також зовнішні повідомлення про необхідність впливу на процес управління. У звичайному розумінні інформація — це повідомлення про факти, відмінні від відомих.

Інформація існує при наявності джерела інформації, каналу зв'язку і отримувача.

Передавання інформації у СЛТС зображене на рис. 4.7.

Якщо в разі отримання відомостей стан системи став цілком визначеним $I_1 = 0$, то кількість отриманої інформації становитиме:

$$I = H_0.$$

Отже, зміна ентропії системи, зумовлена отриманим повідомленням, визначає кількість інформації.

Для дискретного джерела інформації з нерівномірними символами використовують поняття «індивідуальної ентропії»:

$$H_i = -\log_2 P_i.$$

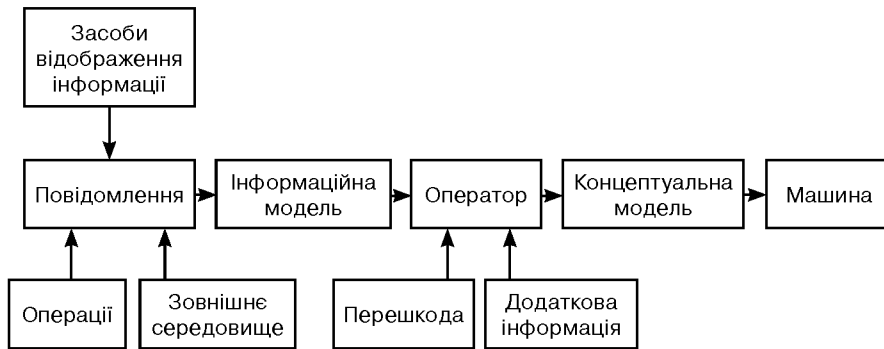


Рис. 4.7. Структурна схема інформаційних процесів у СЛТС

Для оцінки загального обсягу інформації використовують поняття «ентропії у середньому»:

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i \text{ біт},$$

де P_i — імовірність i -го сигналу (перебування системи в i -му положенні); n — загальна кількість різноманітних сигналів (станів системи).

За одиницю кількості інформації береться така її кількість, яку отримано під час вибору з двох рівноймовірних станів системи. Вона вимірюється у двійкових одиницях інформації, або *бітах*, тобто 1 біт — це ентропія системи, яка має два рівноймовірних стани.

$$1 \text{ біт} = \log_2 2.$$

Отже, одна двійкова одиниця інформації відповідає повідомленню про те, що відбулася одна з двох рівноймовірних подій. У загальному вигляді кількість двійкових одиниць інформації можна визначити за формулою:

$$I = \log_2 N,$$

де I — кількість одиниць інформації;
 N — кількість рівноймовірних подій.

Між кількістю сприйнятої оператором інформації і часом реакції на неї існує лінійна залежність:

$$RT = a + bI,$$

де RT — час реакції,
 I — середня інформація на стимул;
 a і b — константи.

Ця залежність отримала назву *закону Хіка*.

Експериментально було встановлено, що час реакції залежить від виду реакції, інтенсивності сигналу, частоти його подавання, значущості і складності роботи, функціонального складу аналізаторів, тренуваності й віку людини. Для сенсомоторної реакції людини він дорівнює 1,5 с, сенсорномовної — в 5–6 разів більше. У людей 60–70 років час реакції складає 3,3 біт/с, а для середнього і молодшого віку — 5,6 біт/с. При високому рівні тренуваності закон Хіка не діє.

Під час управління СЛТС до оператора через канали зв'язку подається різноманітна інформація. Швидкість її пред'явлення оператору за одиницю часу дорівнює:

$$F = F_m + F_p + F_n,$$

де F_m — інформація, що надходить до оператора від засобів її відображення;

F_p — мовна інформація;

F_n — письмова інформація.

Швидкість переробки інформації оператором залежить від її характеристик, складності та обсягів завдання, рівня тренуваності, розпізнаваності сигналів тощо.

Максимальна кількість інформації (I_{max}), що може переробити людина безпомилково за одиницю часу (t), називається пропускну здатністю людини (C). Вона вимірюється в бітах за секунду.

$$C = \frac{I_{max}}{t}, \text{ біт/с.}$$

Для випадку приймання інформації за умови рівноймовірного надходження будь-яких символів пропускна здатність людини визначається виразом:

$$C = \frac{n \log_2 N}{T},$$

де T — час відображення інформації;

n — кількість правильно розпізнаних символів;

N — кількість символів, що пред'являється людині у процесі функціонування СЛТС.

Як уже згадувалося, оператор СЛТС одночасно є як приймачем, так і джерелом інформації. Тому пропускну здатність людини розглядають як таку, що складається із трьох блоків:

- пропускну здатності аналізаторів;
- швидкості переробки інформації;
- швидкості реакції на стимул.

У людини, наприклад, через зоровий аналізатор проходить 10^8 – 10^9 біт/с, нервові шляхи пропускають 2×10^6 біт/с, до свідомості доходить 50 біт/с, в пам'яті міцно затримується 1 біт/с. Пропускна здатність людини щодо інформації різної модальності наведена у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Пропускна здатність людини щодо інформації різної модальності

Модальність стимулу	Характеристика	Пропускна здатність
Зоровий	Довжина лінії	3,25
	Площина	2,7
	Спрямованість	3,3
	Кривизна	2,2
	Колір	3,1
	Яскравість	3,2
Слуховий	Гучність	2,3
	Висота	2,5
Смаковий	Солоність	1,3–2
Тактильний	Інтенсивність	2
	Тривалість	2,3
	Розташування на тілі	2,8
Нюховий	Інтенсивність	1,53

Узгодженість швидкості подання інформації із пропускну здатністю оператора визначається нерівністю $C \geq F$. За цієї умови оператор здатний переробити інформацію, що пред'являється. Якщо $C < F$, то оператор може допускати помилки (пропуски сигналів і ознак, викривлення сигналів, затримку тощо) або спостерігається відмова від розв'язання задачі. У цьому випадку необхідно зменшити кількість інформації, що надходить до оператора за проміжок часу, або підвищити швидкість її переробки оператором шляхом удосконалення процесу його навчання (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Пропускна здатність оператора СЛТС

Вид інформації	Пропускна здатність
Сприйняття сигналів, що надходять	18,2–24,4
Розв'язання логічних задач	8,2–15,1
Арифметична операція	6,0–12,0
Інформація для одночасного сприймання	16,4–24,5
Находження органу управління	19,2–24,4
Рухове завдання	8,5–11,5
Мовні команди	17,8–26,3
Реєстрація показань стрілкових приладів	4,2–8,4

Оптимальна швидкість пероблення інформації людиною, що надходить до аналізаторів, дорівнює 0,1–5,5 біт/с.

У табл. 4.3 наведені дані щодо пропускну здатності людини залежно від швидкості надходження інформації.

Таблиця 4.3

Пропускна здатність людини залежно від швидкості надходження інформації

Швидкість надходження інформації, біт/с	1	2	3	4	5	6	7
Переданий результат, біт/с	1	2	3	3,896	4,208	4,229	3,379

Пропускна здатність людини в цілому складає 3,07–3,85 біт/с. Отже, з метою забезпечення безпечності функціонування СЛТС швидкість надходження інформації до оператора має не перевищувати 2–3 біт/с.

Таким чином, застосування теорії інформації для аналізу діяльності оператора дає змогу:

- оцінити ступінь складності діяльності оператора;
- спрогнозувати час, необхідний операторові для переробки інформації;
- визначити темп подавання інформації.

У той же час, на цьому шляху є певні перешкоди, які полягають у такому:

- алфавіт сигналів, із якими працює людина, суттєво відрізняється від алфавіту фізичних сигналів, що пов'язане з їх перекодуванням і впливом індивідуального досвіду оператора;
- суб'єктивна вірогідність інформації відрізняється від об'єктивної;
- теорія інформації не враховує змістовий її контекст;
- на характеристики людини впливають навчання, втомлюваність, перешкоди;
- кожний вид інформації по-різному відображається оператором;
- для оператора велике значення має тривалість отримання інформації.

Фізіологічні та психофізіологічні характеристики людини

Характеристика аналізаторів. Фізіологічною основою формування перцептивного образу є робота аналізаторів. Аналізатори — це спеціалізовані структури нервової системи, що виконують функції знаходження сигналів, їх розрізнення, передавання, перетворення, кодування і декодування ознак сенсорного образу, його розпізнавання.

Інформація, отримана через аналізатори, називається сенсорною, а процес її сприйняття і первинної переробки — *сенсорним сприйняттям*.

Кожен аналізатор складається з трьох частин:

- 1) периферійної частини — *рецептора*;
- 2) провідних *нервових шляхів*, якими нервові сигнали передаються у мозок;
- 3) центральної частини — *мозкового центру* у корі та підкірці головного мозку.

Загальну структуру аналізатора подано на рис. 4.8.

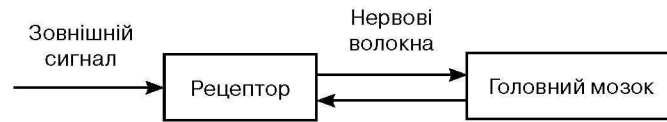


Рис. 4.8. Структурна схема аналізатора

Рецептор — це спеціалізовані клітини, що перетворюють енергію зовнішнього впливу у нервові імпульси. Це дає змогу розглядати рецептори як пристрої кодування інформації. Провідникові шляхи складаються з нейронів, розміщених на різних рівнях нервової системи, які поєднують рецепторну периферію з мозковим центром. У центральній частині аналізатора здійснюється основна обробка нервових імпульсів, які надходять із периферії.

У багатьох аналізаторів є специфічні допоміжні структури, які оптимізують дію подразників на рецептори. Це рогівка, зіниця та кришталік ока, барабанна перетинка, слухові кісточки вуха тощо. Разом із рецепторами вони складають орган чуття. В органах чуття відбуваються фільтрація і перетворення того або іншого виду енергії. Із безлічі фізичних та хімічних факторів середовища органи чуття виділяють такі, для сприймання яких у їх рецепторній частині є відповідні механізми. Наприклад, око та його рецепторна частина — сітківка — тонко реагує на електромагнітне випромінювання у видимій частині спектра, вухо з рецепторним апаратом кортієвого органа сприймає механічне коливання повітря певної амплітуди й частоти, температурні рецептори шкіри реагують на теплову енергію тощо.

Органи чуття та окремі рецепторні системи здійснюють перетворення енергії подразника у процес нервового збудження, змінюючи при цьому свій фізико-хімічний стан. Наприклад, рецептори сітківки ока (палички та колбочки) переводять електромагнітну енергію світла в хімічну енергію, а останню — в енергію електричних імпульсів.

Механізми трансформації енергії рецепторами різних органів чуття дуже відрізняються, але всі вони ведуть до частотно-амплітудних змін електричної активності рецепторів. Такі зміни копіюють зміни у дії подразників. Отже, якщо рецепторні входи пристосовані до прийому різних видів енергії, то їхні виходи надсилають сигнали, які за своєю природою є універсальними для всієї нервової системи. Такі сигнали, зазнавши певної обробки, передаються до головного мозку.

Між рецептором і мозком існує прямий та зворотний зв'язок, тобто рецептор виконує функції як кодування, так і декодування інформації.

Мозкова, *центральна, частина* аналізатора складається з ядра та розсіяних по корі окремих спеціалізованих клітин. Ядра аналізаторів здійснюють найтонший аналіз зовнішніх і внутрішніх впливів.

Ядро утворене з маси нервових клітин. Так, ядро зорового аналізатора розташоване у потилицевих частках, слухового — у скроневих частках кори (рис. 4.9).

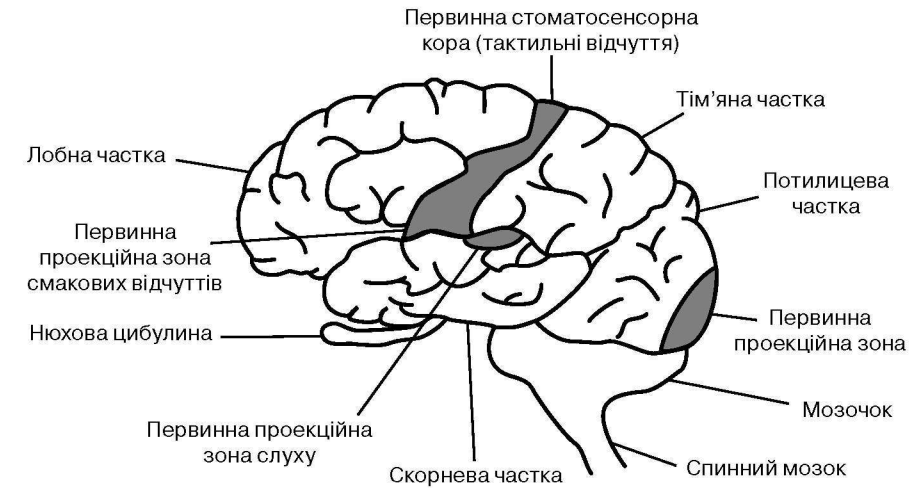


Рис. 4.9. Схема розташування центрів аналізаторів

Розсіяні елементи кожного аналізатора входять до ділянок, суміжних із ядрами інших аналізаторів, завдяки чому аналізатори перебувають у постійній взаємодії. Проявляється вона, наприклад, у тому, що в людини під впливом звуків можуть виникнути відчуття кольору, а деякі кольори можуть викликати відчуття тепла чи холоду. Це явище має назву *синестезії*.

Мозковий кінець аналізатора є проміжною ланкою нервових імпульсів, що виникають у рецепторі. Досягнувши кори та зазнавши обробки, перетворені імпульси знову повертаються до рецепторних систем. Тільки у цьому процесі взаємодії рецепторів і центрів у корі великих півкуль відбувається формування перцептивного образу.

Аналізатор є частиною рефлексорного апарату, до якого входять також виконавчий механізм, такий, як система мотонейронів, що іннервують м'язи, суглоби та інші робочі органи.

Початковий етап синтезу подразників здійснюється у рецептивних полях органів чуття. Рецептивне поле — це сукупність рецепто-

рів, які замикаються на один нейрон того чи іншого рівня нервової системи. На рис. 4.10 зображене рецептивне поле нейрона кори головного мозку.

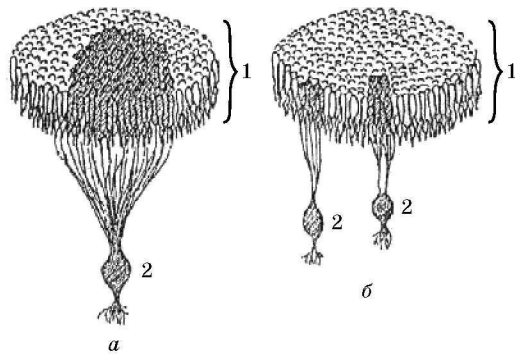


Рис. 4.10. Рецептивне поле клітини сітківки:

a — на периферії рецептивне поле однієї гангліозної клітини має понад сотню паличок; *б* — у центрі сітківки кількість рецептивних клітин, що іннервуються однією гангліозною клітиною, значно менше; 1 — фоторецептори, 2 — гангліозні клітини

Процесів сприйняття та переробки навіть найскладніших сигналів для формування образу недостатньо. На вищих рівнях нервової системи функціонують елементи, які порівнюють периферичну інформацію з еталонами, що зберігаються у пам'яті.

Класифікують аналізатори за:

- модальністю (видом) відчуттів;
- місцем розташування рецепторів;
- наявністю або відсутністю безпосередніх контактів рецептора з подразником, який викликає відчуття тощо.

За модальністю відчуттів, що виникають у людини при подразненні рецептора, розрізняють зорові, слухові, нюхові, смакові рецептори, рецептори дотику (тактильні), терморецептори, пропріо- і вестибуло-рецептори (положення тіла і його частин у просторі). Дискутується питання про існування рецепторів болю.

За місцем розташування рецептори поділяють на зовнішні, або екстерорецептори, і внутрішні, або інтерорецептори. Класифікацію екстерорецепторів наведено у табл. 4.4.

За характером контактів рецептора з подразником найчастіше використовується класифікація І. Шеррингтона (рис. 4.11).

Аналізаторам властиві:

- чутливість;
- адаптивність;
- вибірковість;
- взаємодія;

- сенсibiliзація;
- синестезія.

Таблиця 4.4

Екстерорецептивні аналізатори та їх характеристики

Модальність	Локалізація рецептора	Тип рецепторів	Якість, що сприймається
Зір	Сітківка	Палички Колбочки	Освітленість Контрастність Рух Колір Розміри
Слух	Завитка	Ворсинкові клітини	Висота Сила звуку Тембр Локалізація звуку
Рівновага	Вестибулярний апарат	Макулярні клітини	Обертання Сила тяжіння
Дотик	Шкіра	Закінчення Руффіні Диски Макреля Тільця Пачині	Тепло Тиск Вібрація
Смак	Язик	Смакові сосочки на кінчику язика Смакові сосочки в основі язика	Солоний і кислий смак Гіркий і солоний смак

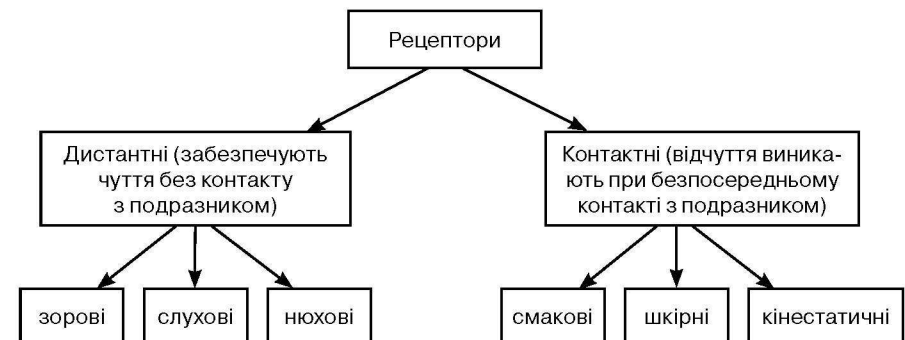


Рис. 4.11. Класифікація рецепторів за характером контакту з подразником

Чутливість — здатність аналізатора отримувати, фільтрувати, перетворювати інформацію про подразники, змінювати їх фізичні або хімічні параметри.

Адаптивність — зміна чутливості аналізатора у бік її зниження під впливом постійно діючого подразника. Наприклад, це явище спостерігається тоді, коли людина з сонячного світла заходить у напівтемну кімнату і навпаки.

Вибірковість — виявляється у виборі певних подразників з усіх, що діють на той момент.

Взаємодія — зміна чутливості одного аналізатора під впливом стану іншого. Наприклад, звуки певної частоти можуть загострити чи притупляти зорову чутливість, а приємні запахи — знижувати нижній абсолютний поріг зорового аналізатора.

Сенсibiliзація — підвищення чутливості аналізатора під час сукупної дії різних подразників. Наприклад, підвищення чутливості дотику у шліфувальників і нюху та смаку у дегустаторів.

Синестезія — перенесення якості одного відчуття на інше, внаслідок чого до специфічного відчуття додається неспецифічне.

Чутливість аналізатора є однією з основних його властивостей, яка визначається інформацією про зовнішнє й внутрішнє середовище людини, а отже, є відповідальною за безпечність існування людини у СЛТС. Вона різна і характеризується *абсолютним, диференційним та оперативним порогом відчуттів* (табл. 4.5).

Пороги відчуттів — це величини подразників, що викликають або змінюють сенсорний образ певної якості. Величини подразників, які не викликають відчуттів, називають *підпороговими*.

Мінімальна сила подразника, що викликає ледь помітне адекватне відчуття, називається *нижнім абсолютним порогом чутливості* певного аналізатора (J_0), а максимальна — *верхнім абсолютним порогом чутливості* (J_{\max}). Подальше зростання сили подразника викликає вже больову реакцію.

Величина, обернено пропорційна нижньому абсолютному порогові, характеризує *абсолютну чутливість аналізатора* (E):

$$E = \frac{1}{J_n},$$

де J_n — порогова величина аналізатора.

Інтервал між (J_0) і (J_{\max}) називають *зоною (діапазоном) чутливості аналізатора*. Зона чутливості слухового аналізатора, обмежена кривими, утвореними значеннями верхнього і нижнього абсолютних порогів, зображена на рис. 4.12.

Перехід від сили подразника, яка не сприймається аналізатором, до тієї, що викликає відчуття, відбувається стрибком. Ця закономірність у вигляді психометричної кривої наведена на рис. 4.13.

Характеристика аналізаторів різних видів

Аналізатор	Абсолютний поріг	Диференційний поріг	Ступінь використання у технічних системах
Зоровий	$4 \times 10^9 - 10^3$ лк	1% від вихідної інтенсивності, лк 0,6–1,5 кут. хв	90 9
Слуховий	0,0002 довжина/см ²	0,3–0,7 дБ	1
Тактильний	3–300 мг/мм ²	7% від вихідної інтенсивності, мг/мм ²	
Смаковий	10–10000 мг/дм ³	20% від вихідної концентрації	У незначному ступені
Нюховий	0,001–1 мг/дм ³	16–50% від вихідної концентрації	
Кінестатичний	—	2,5–9% від вихідної величини	
Температурний	0,2–0,4 °С		
Вестибулярний	0,1–0,12 м/с ²	—	

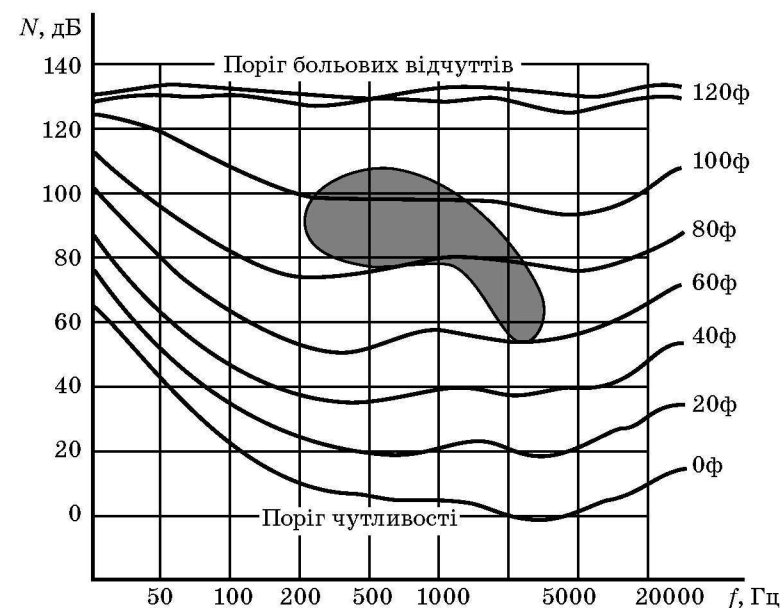


Рис. 4.12. Зона чутливості слухового аналізатора людини

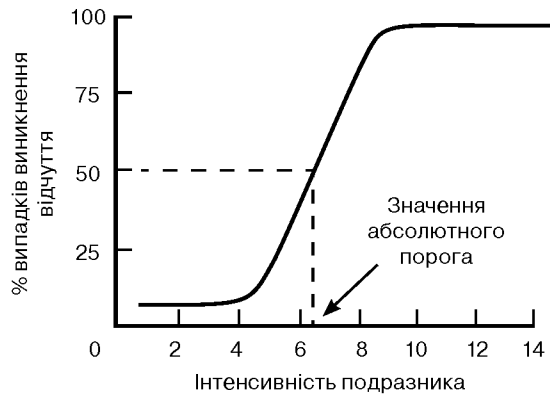


Рис. 4.13. Загальний вигляд психометричної кривої

Пунктирною лінією показана величина стимулу, якій відповідає 50% виникнень почуттів. Це значення приймається як значення абсолютного порогу, тобто таке, що розділяє між собою стимули впливаючі і не впливаючі на аналізатори.

Мінімальна відмінність у силі двох подразників, яка викликає ледь помітну відмінність відчуттів, називається *диференційним порогом* (ΔJ), або порогом розрізнення.

Прикладом нижнього абсолютного порогу буде сила світла, яка починає відчуватися, верхнього — сила світла, яка викликає осліплення зорового аналізатора, диференційного — зміна яскравості світла.

Диференційний поріг характеризує граничні можливості аналізаторів з розрізнення інтенсивностей подразників і тому не може бути використаний у процесі визначення алфавіту сигналів, що надходять до оператора СЛТС. Для цього використовують не мінімальну, а оптимальну величину розрізнення сигналів. Така величина дістала назву *оперативного порога*, тобто — це мінімальна розбіжність сигналів, при якій швидкість і точність розрізнення є максимальними.

Для окремих відчуттів диференційні пороги чутливості є незмінними щодо вихідної інтенсивності подразника:

$$\frac{\Delta J}{J} = K.$$

Ця залежність отримала назву *закону Вебера*.

Для зорового аналізатора K становить 0,01, слухового — 0,1, тактильного — 0,3. Отже, щоб помітити різницю, наприклад, треба до початкового значення додати 1/30 її частки.

У середині XIX ст. німецьким фізиком і математиком Г. Фехнером було встановлено, що інтенсивність відчуттів прямо пропорційна логарифму інтенсивності подразника. Ця залежність отримала назву *основного психофізіологічного закону Вебера-Фехнера*:

$$S = k \lg R + c,$$

де S — інтенсивність відчуттів;
 R — інтенсивність подразника;
 k і c — константи.

Пізніше з'ясувалося, що в умовах дії постійного подразника чутливість аналізатора дещо змінюється. Ці обставини враховує *закон Стівенса*: між рядами відповідних змін інтенсивностей подразника і почуттями існує ступенева залежність:

$$S = k \cdot R^n,$$

де K — константа, яка залежить від вибраної одиниці виміру;
 R — інтенсивність подразника;
 n — показник, який залежить від модальності відчуття.

Для відчуттів різної якості показник ступеня змінюється. Так, для відчуттів світла він дорівнює 0,33, а для відчуття удару електричним струмом — 3,5. Це означає, наприклад, що подвоєння яскравості світла змінює його видиму яскравість усього на 25%, тоді як подвоєння сили електричного струму збільшить відчуття у 10 разів. Вивчаючи залежність відчуттів від інтенсивності подразника, яка змінюється у часі, В. Вальтер увів поняття *динамічного порогу диференціальної чутливості* (ΔD):

$$\Delta D = \Delta S \left(\frac{1 + V_0}{V_i - V_0} \right),$$

де ΔS — статичний поріг;
 V_0 — порогова швидкість зміни інтенсивності;
 V_i — швидкість зміни інтенсивності подразника.

Для кожного аналізатора характерна мінімальна тривалість сигналу, що необхідна для виникнення відчуття. Це *часовий поріг аналізатора*. Його величина визначається тривалістю часу, необхідного для сприйняття сигналу і його циркуляції у рефлекторному кільці аналізатора. *Просторовий поріг* визначається мінімальним розміром ледь відчутного подразника. Термін часу від моменту подачі сигналу до моменту виникнення відчуття називається *латентним періодом реакції*. Він визначається часом реакції (ЧР). Це функція потенціалу збудливості:

$$\text{ЧР} = f(e - \bar{e}),$$

де e — процес збудливості;
 \bar{e} — різні види гальмування.

У табл. 4.6 наведений латентний період реакції при подразненні аналізаторів різної модальності.

Таблиця 4.6

Латентні періоди реакції різних аналізаторів

Аналізатор	Латентний період, с
Тактильний	0,09–0,22
Слуховий	0,12–0,12
Зоровий	0,15–0,22
Нюховий	0,31–0,39
Температурний	0,28–1,6
Вестибулярний	0,4

Відчуття, що з'явилося, зникає не одразу, а через певний проміжок часу. Ця часова характеристика аналізатора називається *інерцією (післядією)*. Післядія — проміжок часу від моменту припинення впливу подразника до моменту зникнення відчуття.

Для оцінки спроможності аналізаторів щодо сприймання інформації введено поняття «пропускної здатності аналізатора» (C_0) або психофізіологічною ємністю сенсорного входу. Під C_0 розуміють максимальну кількість інформації (I_{\max}), що може сприйматися аналізатором за одиницю часу (t):

$$C_0 = \frac{I_{\max}}{t}, \text{ біт/с.}$$

Експериментально було встановлено, що людина розрізняє поодинокі сигнали лише у випадку, якщо їхня кількість не перевищує 7–9. Ці дані були вперше отримані американським ученим С. Міллером і викладені у статті «Магічне число 7 плюс або мінус 2».

Таким чином, аналізатори характеризуються якісними, кількісними і просторово-часовими характеристиками та пропускною здатністю.

Для діяльності оператора найбільше значення мають зоровий і слуховий аналізатори.

Характеристики зорового аналізатора

Найбільша кількість інформації (близько 90%) передається через зоровий аналізатор, адекватним подразником, для якого є світлова енергія, а рецептором — сітківка ока (рис. 4.14).

Зір дає змогу сприймати форму, яскравість, колір і рух об'єктів. Можливості зорового аналізатора визначаються його енергетичними, просторовими, часовими та інформаційними характеристиками (рис. 4.15).

Енергетичні характеристики визначаються інтенсивністю сигналів, або *яскравістю*. Світловий потік (I), що падає на око людини, породжує певні зорові відчуття. I — це потужність світлового видимого випромінювання, що оцінюється оком людини через зорові відчуття.

Об'єкт краще сприймається, якщо він випромінює певну кількість світла, тобто має певну *яскравість*, яка визначається за формулою:

$$B = \frac{I}{S \cos \alpha},$$

де I — потужність світла, тобто світловий потік на одиницю тілесного кута;

S — площа освітленої поверхні;

α — кут зору, під яким розглядається ця поверхня.

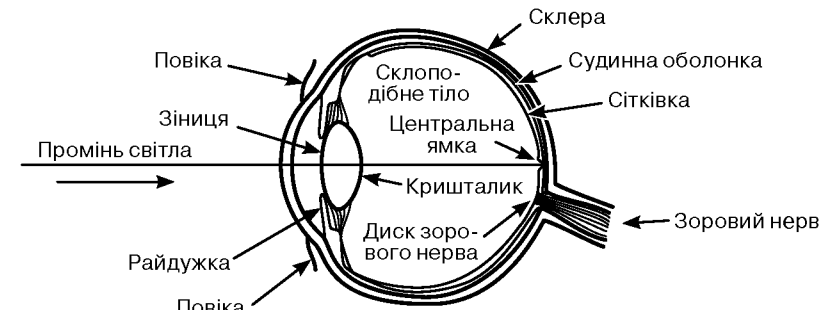


Рис. 4.14. Спрощена модель ока людини



Рис. 4.15. Характеристики зорового аналізатора

Саме яскравість об'єкта визначає величину нервових імпульсів, що виникають на сітківці ока.

Яскравість об'єкта можна визначити за формулою:

$$B_{\text{об}} = B_{\text{вип}} + B_{\text{від}},$$

де $B_{\text{вип}}$ — яскравість випромінювання самого об'єкта;

$B_{\text{від}}$ — яскравість відображення об'єктом зовнішнього світла.

Яскравість відображення об'єктом певного світлового потоку залежить від кольору та розташування поверхні об'єкта відносно ока людини:

$$B_{\text{від}} = \frac{E\rho}{\pi},$$

де E — освітленість поверхні, лк;

ρ — коефіцієнт кольорового відображення поверхні.

Діапазон чутливості зорового аналізатора великий — від 10^{-6} до 10^6 кд/м².

Контрастність між об'єктом і фоном теж зумовлює ефективність сприйняття інформації оператором. Розрізняють два види контрасту: прямий і зворотний. Кількісно коефіцієнт контрастності вираховується за формулами:

$$K_{\text{зв}} = \frac{B_{\text{об}} - B_{\text{ф}}}{B_{\text{об}}}; \quad K_{\text{пр}} = \frac{B_{\text{ф}} - B_{\text{об}}}{B_{\text{ф}}},$$

де B — яскравість фону;

$B_{\text{об}}$ — яскравість об'єкта.

Оптимальна величина коефіцієнта контрастності — у межах 0,60–0,95.

Робота в прямому контрасті сприятливіша, ніж у зворотному. Але для забезпечення нормальної роботи оператора необхідно знати, як цей контраст сприймається в конкретних умовах. Для цього вводиться поняття *порогового контрасту*:

$$K_{\text{пор}} = \frac{dB_{\text{пор}}}{B_{\text{ф}}},$$

де dB — порогова різниця яскравості, тобто мінімальна різниця яскравості між об'єктом і фоном, яка відчувається оком.

Величина $K_{\text{пор}}$ визначається диференціальним порогом. $K_{\text{пор}}$ для оперативного порога має бути в 10–15 разів більша за диференціальний поріг, тобто коефіцієнт контрасту $K_{\text{пр}}$ чи $K_{\text{зв}}$ має бути в 10–15 разів більшим за диференційний поріг. Величина порогового контрасту залежить від яскравості та розмірів об'єкта (кутові величини — α). Характер цих співвідношень зображений на рис. 4.16.

Аналіз наведених на рис. 4.16 даних свідчить, що об'єкти великих розмірів добре сприймаються і при менших контрастах.

Значний вплив на ефективність сприймання інформації має характер зовнішнього освітлення. Збільшення освітлення при прямому контрасті поліпшує умови сприймання інформації, оскільки яскравість фону зростає більше, ніж яскравість об'єкта, а при зворотному контрасті — навпаки. Величина порогового контрасту залежить і від часу експозиції інформації. При необмеженості експозиції користу-

ються графіками, що наведені на рис. 4.16, а при обмеженому часі експозиції величина порогового контрасту визначається формулою:

$$K = \frac{K_{\text{пор}}}{1 - e^{-t_e/t_p}},$$

де $K_{\text{пор}}$ — величина порогового контрасту при необмеженому часі експозиції;

t_e — час експозиції;

t_p — час реакції людини.

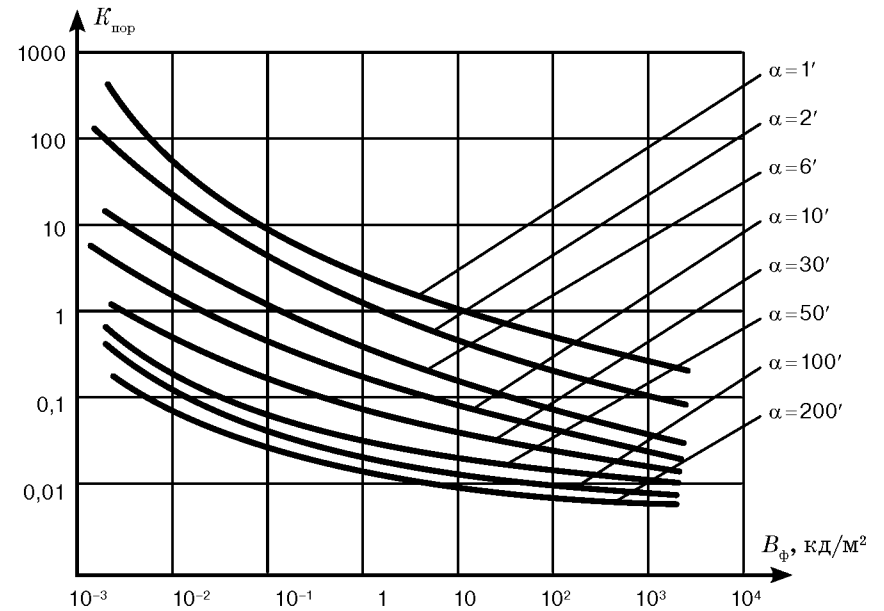


Рис. 4.16. Залежність порогової контрастності від яскравості й кутів розмірів об'єкта

Засліплююча яскравість. Оператор сприймає інформацію різної інтенсивності, однак сигнали значної яскравості можуть спричинити осліплення.

Засліплююча яскравість визначається розміром освітленої поверхні, яскравістю сигналу, а також рівнем адаптації ока:

$$B_c = B_a + \left(\frac{840}{\omega^{1/4}} \right) B_a^{1/3},$$

де ω — тілесний кут, під яким оператор бачить освітлену поверхню (у стерadianах).

Значення засліплюючої яскравості при різних рівнях адаптації наведені в табл. 4.7.

Прийнятними вважаються перепади яскравостей у межах 1/10–1/30.

Таким чином, для створення нормальних умов зорового сприйняття інформації необхідно забезпечити певну яскравість і контрастність сигналів, а також рівномірність розподілу яскравостей у полі зору оператора.

Таблиця 4.7

Характеристики засліплюючої яскравості

Яскравість поля адаптації, кд/м ²	Засліплююча яскравість, кд/м ²	Яскравість поля адаптації, кд/м ²	Засліплююча яскравість, кд/м ²
$3,2 \times 10^{-6}$	$6,4 \times 10$	$3,2 \times 10$	$1,11 \times 10^4$
$3,2 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^2$	$3,2 \times 10^3$	$4,62 \times 10^4$
$3,2 \times 10^{-1}$	$2,18 \times 10^3$	$15,9 \times 10^4$	$15,9 \times 10^4$

Відносна видимість. Око людини сприймає електромагнітні хвилі діапазону 380...760 нм. Але очі людини мають різну чутливість до різних хвиль. Найбільша чутливість — до хвиль у діапазоні 500–600 нм. Це — жовто-зелений колір. Залежність чутливості ока від довжини хвилі, тобто відчуття від подразника, характеризується коефіцієнтом відносної видимості K :

$$K = \frac{S_\lambda}{S_{\max}}$$

де S_λ — відчуття, що виникають при дії подразника з довжиною хвилі λ , S_{\max} — відчуття, що виникає при дії подразника тієї ж потужності, але з довжиною хвилі 550 нм.

Цю залежність показано на рис. 4.17.

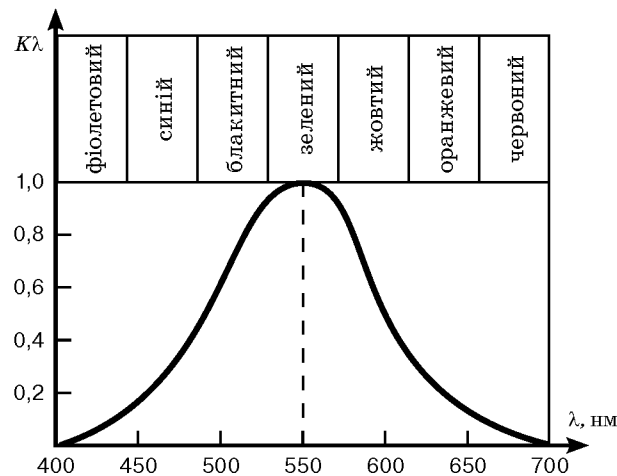


Рис. 4.17. Чутливість ока до хвиль різної довжини

Інформаційні характеристики зорового аналізатора зумовлені пропускнуою здатністю, що визначає кількість інформації, яку може сприйняти аналізатор за одиницю часу. Найбільша пропускна здатність — $5,6 \times 10^9$ біт/с буде на рівні фоторецепторів (сітківки) ока, на рівні кори — 20–70 біт/с, а для діяльності в цілому (прийняття рішень та виконання керівних дій людини) — 2–4 біт/с.

Просторові характеристики зорового аналізатора залежать від гостроти зору, поля зору та обсягу сприймання. Гострота зору характеризується властивістю ока розрізнявати дрібні деталі об'єкта. Вона визначається величиною, еквівалентною тому мінімальному розміру об'єкта, за якого він розрізняється оком. Розмір об'єкта виражається в кутових величинах, які пов'язані з його лінійними розмірами таким співвідношенням:

$$h = 2L \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right),$$

де L — відстань до об'єкта;

h і α — відповідно лінійний і кутовий розміри об'єкта (рис. 4.18).

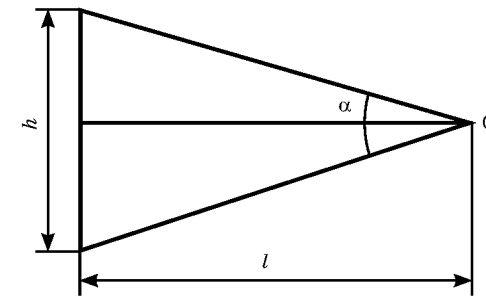


Рис. 4.18. Співвідношення лінійних (α) і кутових (h) розмірів об'єкта

Нормальним вважається зір, при якому людина розрізняє об'єкти величиною $1'$, що є *одиницею гостроти зору*. Вона залежить від рівня освітлення об'єкта, відстані до нього та його положення відносно спостерігача. Гострота зору характеризує абсолютний просторовий поріг зорового аналізатора. Оператор має працювати на рівні оперативного порога, в якому кутовий розмір об'єкта буде не менший ніж $15'$ — для об'єктів найпростішої форми, а для складних об'єктів цей розмір має бути в межах $30' \dots 40'$. Це розмір знака та інших елементів зображення об'єкта, котрі мають зовнішні та внутрішні деталі.

Поле зору умовно поділяють на три зони:

- центральне поле $\sim 4^\circ$, де повніше розрізняються всі деталі об'єкта;
- поле ясного бачення = $30^\circ \dots 35^\circ$, де не розрізняються малі деталі об'єкта;

- периферійне поле = $75^\circ \dots 90^\circ$, в якому об'єкт тільки виявляється, але не розпізнається (рис. 4.19).

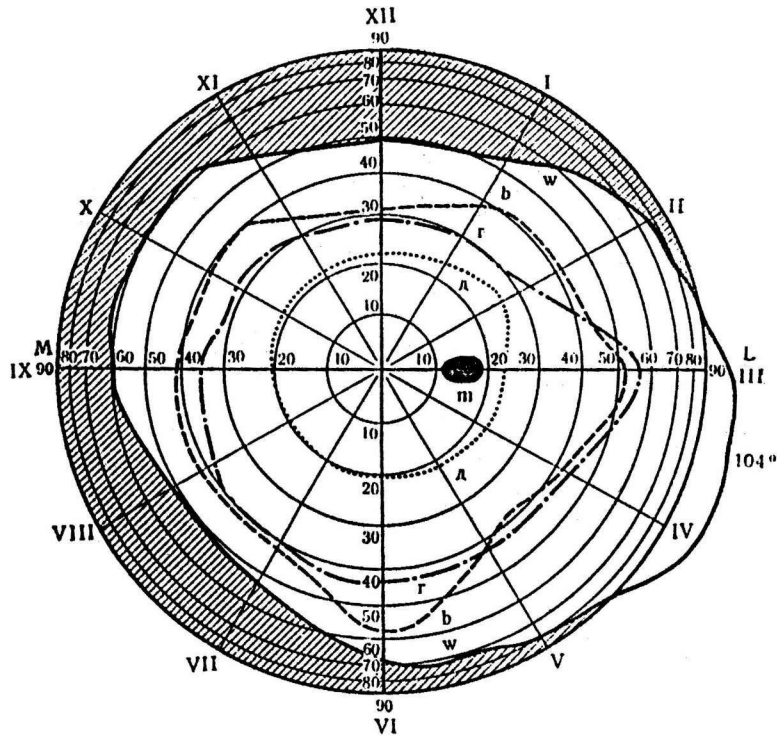


Рис. 4.19. Поле зору людини, представлене у полярних координатах:

w — чорно-біле поле зору; g, r, b — поля зору для зеленого, червоного і синього кольорів; m — фізіологічна скотома сліпої плями

Об'єкти, що перебувають у периферійній зоні, можуть бути переміщені в іншу зону при простому повороті голови або русі очей.

Обсяг сприймання характеризується кількістю об'єктів, які охоплює людина за одну фіксацію ока, тобто симультанним сприйманням. Доведено, що за одну фіксацію людина може охопити 4–8 не пов'язаних між собою об'єктів.

Часові характеристики зорового аналізатора визначаються часом та його складовими, необхідними для виникнення зорового відчуття і сприймання потрібної інформації в певних умовах роботи оператора.

Латентний період — це час до виникнення відчуття з початку подавання сигналу. Залежить він від потужності подразника, його значущості, складності роботи і віку оператора, його індивідуально-типологічних характеристик. У середньому для людини він складає 150 ... 240 мс.

Тривалість інерції відчуття залежить не тільки від характеристик сигналу (яскравості, кутових розмірів), а й від того, яким буде наступний сигнал, тобто наскільки він зможе «загасити» дію попереднього сигналу. Тому час дії основного сигналу має враховувати час дії послідовного образу (табл. 4.8).

Таблиця 4.8

Залежність часу інерції відчуття від яскравості та кутових розмірів об'єкта

Кутові розміри об'єкта	Рівень яскравості, кд/м ²				
	64	32	10	1	0,2
11'	31	32	34	73	113
23'	26	25	26	48	88
1,5°	17	15	19	38	68
90°	13	17	14	26	54

Урахування цих особливостей має велике значення для організації потоку інформації. Якщо сигнали подаються дискретно, то їхній період має бути не менший за 0,2...0,6 с.

Критична частота мерехтіння (КЧМ) — це частота, при якій відбувається злиття поточних образів подразників у єдиний образ об'єкта. КЧМ залежить від яскравості і спектрального складу сигналу, його розмірів та конфігурації знаків (рис. 4.20).

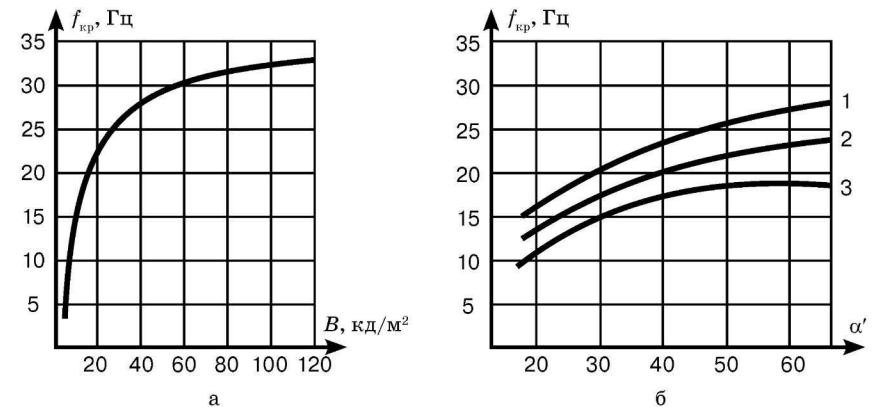


Рис. 4.20. Залежність критичної частоти мерехтіння

Залежність КЧМ від яскравості об'єкта підпорядкована основному психофізіологічному закону.

Середня тривалість фіксації погляду при вирішенні завдань інформаційного пошуку

За нормальних умов спостереження КЧМ становить 15–25 Гц, при втомі вона знижується. Якщо мерехтіння застосовується для кодування інформації (привертання уваги оператора), треба мати на увазі, що зорова втома буде найменшою за частоти 3–8 Гц.

Чутливість зорового аналізатора може змінюватися в 10^8 разів. Є дві форми адаптації:

- темнова: при переході від світла до темряви;
- світлова: при переході від темряви до світла.

Час адаптації залежить від її форми і становить десятки хвилин при темновій та хвилини або частки хвилини при світловій (рис. 4.21).

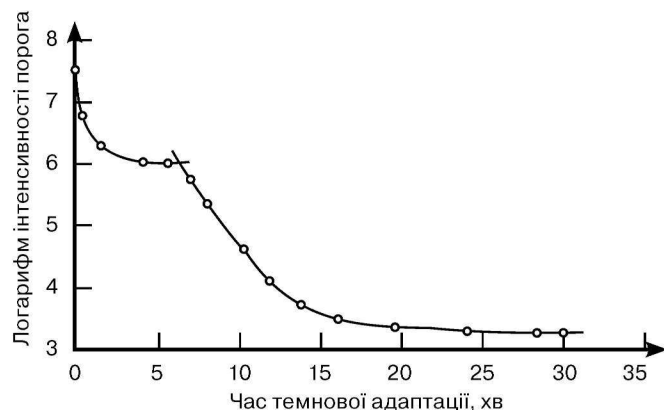


Рис. 4.21. Зміна чутливості ока при темновій адаптації

Тривалість інформаційного пошуку. Значну роль у процесі сприймання сигналу та об'єктів відіграють рухи очей. Це дає змогу розглядати сприймання як дію, спрямовану на пошук джерела сигналу та обстеження об'єкта для побудови його образу.

Загальний час інформаційного пошуку визначається за формулою:

$$T_{\text{in}} = \sum_{i=1}^n (t_n + t_{\text{ф}}),$$

де t_n — час переміщення погляду;

$t_{\text{ф}}$ — час фіксації погляду;

n — кількість фіксацій або кроків пошуку;

t_n залежить від відстані переміщення погляду, тобто від кута, на який «сягає» око, а $t_{\text{ф}}$ — від властивостей інформаційного поля, складності його елементів, індивідуально-психологічних властивостей людини та професійної підготовки оператора.

У той же час для певних завдань і стабільного інформаційного поля ця характеристика відносно постійна (табл. 4.9).

Завдання	$t_{\text{ф}}$, мс
Пошук сигналу на екрані	370
Читання літери або цифри	310
Пошук умовних знаків	300
Пошук геометричних фігур	200
Фіксація мерехтіння індикатора	280
Знаходження певного умовного знака	640
Наведення на ціль	1200

Характеристики слухового аналізатора

Одним із основних каналів передавання інформації операторові є звукові сигнали, завдяки яким він отримує до 10% її обсягу. При відображенні цих сигналів у людини виникають відчуття, спричинені дією звукової енергії на слуховий аналізатор.

Слуховий аналізатор складається з вуха, слухового нерва, складної системи нервових зв'язок і мозкових центрів людини. Слуховим рецептором людини є кортіїв орган (рис. 4.22).

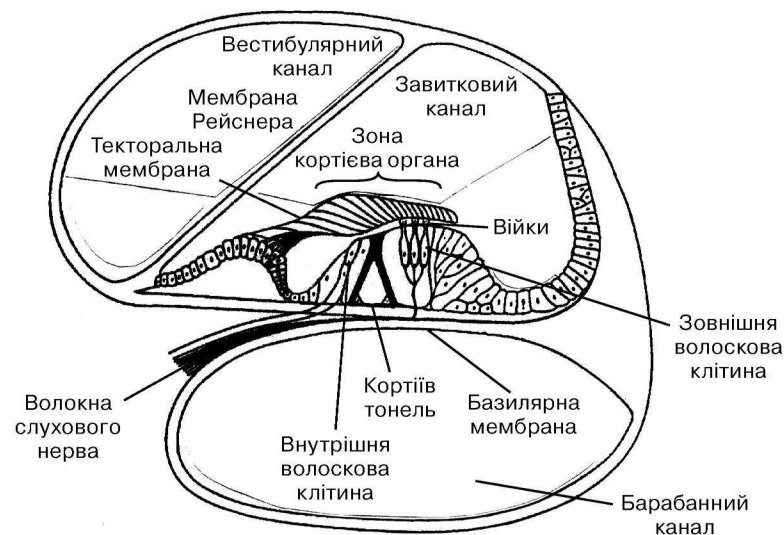


Рис. 4.22. Канали завитки

Вухо сприймає окремі частоти звуків завдяки функціональній здатності волокон його мембрани до резонансу. Джерелом звукових хвиль може бути будь-який процес, який спричиняє зміни тиску або механічну напругу в середовищі. Таким чином, звук як фізичне явище — це коливання пружного середовища, а з фізіологічної точки зору він визначається як відчуття, що сприймається органами слуху під час дії на них звукових хвиль у діапазоні частот 16–20 000 Гц.

Основні характеристики звукових коливань — амплітуда (інтенсивність), частота і форма звукових хвиль — відображаються у таких слухових відчуттях, як *гучність, висота і тембр*.

Інтенсивність (сила) звуку (Вт/м^2) визначається щільністю потоку звукової енергії (щільністю потужності). Вплив звукових сигналів на звуковий аналізатор визначається рівнем *звукового тиску*. Одиницею звукового тиску є Н/м^2 ($1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$ (паскаль)).

Існує нижня і верхня межі чутності. Нижня межа чутності називається порогом чутності, верхня — больовим порогом. Поріг чутності — найменший звуковий тиск, який сприймається людиною як звук ($J_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ або $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$). Його сприймає близько 1% людей. Больовий поріг — це максимальний звуковий тиск, що сприймається вухом як звук. Тиск, що перевершує больовий поріг, може викликати пошкодження органів слуху. При частоті 1000 Гц (на цій частоті вухо має найбільшу чутливість) больовий поріг дорівнює $P = 20 \text{ Н/м}^2$. Відношення звукового тиску при больовому порозі і порозі чутності складає 10^6 .

Для характеристики величин, що визначають відчуття звуку, суттєвими є не стільки абсолютні значення інтенсивності звуку і звукового тиску, скільки їх відношення до порогових значень (J_0 або P_0). У зв'язку з тим, що між слуховим сприйняттям і інтенсивністю подразнення існує логарифмічна залежність, для вимірювання звукового тиску, сили звуку і звукової потужності використовують логарифмічну шкалу, у якій кожен наступний ступінь більший за попередній у 10 разів. Ця одиниця називається 1 Бел (Б). Найчастіше використовують одиницю децибел (дБ), що дорівнює 0,1 Б.

Інтенсивність звуку (дБ), виражена в логарифмічних одиницях щодо початкового рівня, описується рівнянням:

$$L = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0}, \text{ дБ},$$

де I — потужність конкретного сигналу;
 I_0 — порогове значення сили звуку ($I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$).

Рівень звукового тиску (Па), виражений у логарифмічних одиницях, дорівнює

$$L_p = 20 \cdot \lg \frac{P}{P_0}.$$

Частота звукових коливань виражається в герцах (1 герц — це частота звукових коливань, період яких дорівнює 1 с). Діапазон ча-

стот, який сприймає вухо людини, складає від 16 до 20 000 Гц. Особливе значення він має у межах 200–3500 Гц, що відповідає спектрові людської мови.

Усі звуки поділяють на прості і складні. Коливання з однією частотою — це прості звуки, або чисті тони. Усі інші розглядаються як складні. Нерегулярні звукові коливання називають *шумом*. Окремо виділяють так званий білий шум — звук, що вміщує всі чутливі частоти.

Суб'єктивно інтенсивність відчувається як *гучність* і виражається у фонах. Фон кількісно дорівнює звуковому тиску для чистого тону частотою 1000 Гц.

Абсолютні порого слухового аналізатора залежать від частоти звукового сигналу. Значення нижнього і верхнього абсолютного порогів та зона мови показані на рис. 4.23.

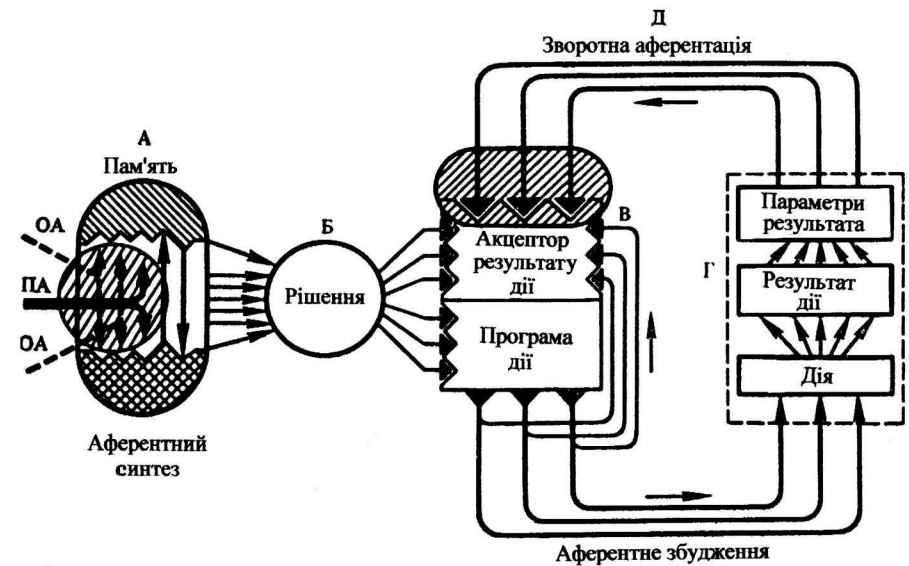


Рис. 4.23. Функціональна система (за П.К. Анохіним):

А — аферентний синтез; ОА — обстановочна аферентація; ПА — пускова аферентація; Б — прийняття рішення; В — формування акцептора результату й аферентної програми власне дії; Г-Д — отримання результатів дії та формування зверненої аферентації для порівняння отриманих результатів із запрограмованими

Психофізіологічні основи діяльності людини

Діяльність оператора СЛТС, як згадувалося вище, полягає у сприйманні поточної інформації, її аналізі, зберіганні, переробці, прийнятті рішення, здійсненні керуючих дій, сприйнятті результа-

тів цих дій. Тобто дії оператора — це замкнена система (рефлекторне кільце).

Формування цих складових діяльності людини забезпечується *функціональними системами (ФС)*. ФС — комплекс елементів різної анатомічної належності функціонально об'єднаних між собою нервовою й гуморальною регуляціями для забезпечення корисних для організму пристосувальних результатів (рис 4.23).

Це одиниці цілісної діяльності організму. Вони є саморегульовальними системами. ФС формуються на метаболічній основі під впливом факторів навколишнього середовища.

Організм людини — це ієрархія багатьох функціональних систем. Вони мають різну спеціалізацію (рух, дихання тощо). ФС організує та регулює функціонування всіх органів тіла людини, підпорядковуючи їх основному завданню — діяльності. У кожен момент часу домінує провідна ФС, а інші мають другорядний характер. У той же час зміна результатів діяльності однієї з ФС обов'язково впливає на діяльність іншої. Цей принцип називається *мультипараметричною взаємодією*.

Склад функціональної системи визначається не просторовою близькістю структур чи анатомічною належністю, а роллю у досягненні результату. У ФС можуть включатися як близько, так і віддалено розташовані системи організму і навіть деталі окремих органів.

Усі ФС, незалежно від складності, мають однотипну організацію, яка включає:

- 1) результат діяльності;
- 2) рецептори результату;
- 3) зворотну аферентацію, що надходить від рецепторів результату у центральні утворення функціональної системи;
- 4) центральну архітектоніку, тобто вибіркоче об'єднання нервових елементів різних рівнів;
- 5) виконавчі соматичні, вегетативні й ендокринні компоненти, у тому числі організовану цілеспрямовану поведінку.

Теорія функціональних систем (ТФС) була розроблена П.К.Анохіним (1968). Центральне місце у ТФС займає поняття «результат діяльності» і його оцінка. Досягти результату — означає змінити співвідношення організму і середовища у корисному для організму напрямку.

Досягнення результату у ФС здійснюється за допомогою специфічних механізмів, із яких найбільш важливими є:

- 1) аферентний синтез, завдяки якому відбувається відбирання з усієї інформації, що надходить у нервову систему, головної і формування мети поведінки;
- 2) прийняття рішення з одночасним формуванням апарату прогнозування результату у вигляді аферентної моделі — акцептора результатів дії (тобто образу очікуваного результату);

- 3) власне дія;
- 4) порівняння за допомогою зворотної аферентації параметрів результату виконаної дії з параметрами, відображеними в акцепторі результатів дії;
- 5) корекція поведінки у випадку неузгодженості реальних й ідеальних параметрів дії.

На підставі ТФС була розроблена загальна структура психологічної системи діяльності людини. Вона створила можливість вирішувати завдання щодо підвищення ефективності виробничої діяльності і професійного навчання.

4.2. Послідовний аналіз системи «людина—техніка—середовище»

4.2.1. Методичні засади визначення небезпечності об'єктів та процесів

Головним методичним принципом БЖД є системно-структурний підхід, а методом — системний (послідовний) аналіз.

У широкому розумінні поняття «системний аналіз» — сукупність методичних засобів, які використовуються для підготовки та обґрунтування рішень стосовно складних понять.

Системний аналіз, що використовується для оцінки СЛТС, — це сукупність методів визначення небезпек, які виникають у системі в цілому, або на рівні її компонентів. Вони передбачають застосування математичного апарата теорії ймовірності і методів неформального аналізу (експертизи, опитування, евристичні методи).

Системний аналіз як метод дослідження виник наприкінці 50-х років минулого століття у складі наукової дисципліни «Безпека систем». Концепція безпеки систем зародилася у галузі ракетобудування і знайшла широке застосування в авіабудівництві та аерокосмічних дослідженнях, а згодом — ядерній енергетиці, хімічній промисловості та інших галузях.

Безпека систем спрямована на виявлення небезпек, застосування засобів із запобігання та контролю цих небезпек протягом життєвого циклу системи.

Системний аналіз дає змогу виявити можливі небезпечні ситуації у системі, описати якісно і кількісно, прогнозувати їх виникнення та можливі наслідки, а отже, запобігти їм. Для цього використовуються методи теорії ймовірності, статистичного аналізу тощо.

Системний аналіз включає дослідження:

- апріорні, що проводяться до виникнення небезпечних подій у СЛТС;
- апостерорні, що проводяться після виникнення небезпечних подій у СЛТС.

Аналіз небезпек починається з досліджень, що створюють можливість ідентифікувати джерела небезпеки, далі проводять детальний якісний аналіз. Вибір методу якісного аналізу визначається поставленою метою, складністю об'єкта тощо. Цей аналіз ґрунтується на розрахунках імовірностей виникнення небезпек і статистичних показників. Кількісною оцінкою небезпеки є ризик.

Якісні методи аналізу небезпек включають:

- попередній аналіз небезпек;
- аналіз наслідків відмов;
- аналіз небезпек за допомогою дерева наслідків;
- аналіз небезпек методом потенціальних відхилень;
- аналіз помилок персоналу;
- причинно-наслідковий аналіз тощо.

Попередній аналіз небезпек включає:

- вивчення технічних характеристик системи, об'єкта, процесу, джерел енергії й матеріалів, що використовуються, їх руйнівних властивостей;
- установлення відповідності технічної документації та актуального стану об'єктів і процесів принципам і нормам безпеки;
- ідентифікацію небезпек системи та її компонентів.

Аналіз наслідків відмов полягає у виділенні окремих компонентів системи та виявленні для кожного з них можливих відмов, їх ранжування за ступенем небезпечності, вивченні небезпечних подій та розробки запобіжних заходів. Це переважно якісний метод ідентифікації небезпек, що ґрунтується на системному підході і має прогностичний характер.

Аналіз небезпек за допомогою дерев причин орієнтується на потенційно небезпечні події. Він полягає у виявленні всіх факторів, що можуть сприяти її виникненню. За результатами цього аналізу будують орієнтовний граф — дерево.

Аналіз небезпек за допомогою дерева наслідків потенційної події досліджує групу подій, що призводять до небезпечних подій.

Аналіз небезпек методом потенційних відхилень досліджує режим функціонування системи, об'єктів, процесів або їх компонентів, що відхиляються від нормативного.

Аналіз помилок персоналу полягає у відборі системи і виду робіт та ідентифікації серед них виду потенційної помилки, прогнозуванні наслідків і можливих заходів до її виправлення, оцінки ймовірності помилки та її виправлення, розрахунку ризику, вибору шляхів до його зменшення.

Причинно-наслідковий аналіз виявляє причини небезпечної події, що відбулася. Він завершується прогнозом імовірних небезпечних подій і розробкою заходів з їх усунення. У ньому використовуються методи:

- прямі — коли за переліком причин установлюються можливі наслідки;
- зворотні — коли за небезпечними наслідками виявляються їхні причини.

Найчастіше у системному аналізі СЛТС застосовуються методи, що ґрунтуються на *теорії ймовірності*. Вони дають змогу не тільки встановити причину, а й прогнозувати небезпечну подію.

Теорія ймовірності описує *масові події*. Масовими називають такі події, які мають місце у сукупності великої кількості практично рівноправних об'єктів. Імовірність їх виникнення (або невиникнення) зумовлена комплексом умов і незначною мірою визначається природою об'єктів. При цьому подія може відбутися, а може не відбутися. Тобто подія має випадковий характер.

Відповідно до теореми, сформульованої французьким математиком Борелем, частота появи будь-якої випадкової події за умови необмеженої кількості експериментів зводиться до ймовірності цієї події. Ця теорема може бути записана у вигляді рівності:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \frac{m}{n} \rightarrow P \right\} = 1,$$

де P — імовірність події;

n — кількість незалежних дослідів;

m — кількість появ події.

Подія, ймовірність появи якої близька до одиниці, називається практично достовірною, а подія, ймовірність появи якої близька до нуля — практично неможливою.

Процеси, що виникають у системі, стан якої у кожний момент часу є випадковим, називається *стохастичним*. У СЛТС вони мають місце під час аварій, перевтомі оператора та інших відхилень стану як системи в цілому, так і її компонентів. Найпростішими зі стохастичних процесів є *дискретні*. Вони повторюються через певні проміжки часу.

Стохастичні процеси з дискретним параметром називаються *стохастичними послідовностями*, або *випадковими ланцюгами*. Окремий їх вид — *ланцюги Маркова*, або *Марківські стохастичні процеси*.

Ланцюгом Маркова називається така послідовність подій, в якій умовні ймовірності наслідків кожної наступної події залежать тільки від наслідків безпосередньої події і не залежать від наслідків подій, що відбулися раніше. Якщо ці ймовірності не залежать від номера події, то ланцюги Маркова називаються *однорідними*.

Застосування цього методу для аналізу небезпечних подій створює можливість визначити ймовірність їх появи і запропонувати попереджувальні заходи щодо виникнення небезпек.

Наприклад, на якійсь СЛТС відбулася низка небезпечних подій (по черзі вийшли з ладу окремі її елементи). При цьому система перейшла у стан $A_1, A_2 \dots A_k$. Результат кожної з таких подій залежить тільки від наслідків попередньої події. Проаналізуємо ймовірності їх появи у майбутньому, які позначимо $P_{11}, P_{12} \dots P_{1k}$. Використовуючи метод однорідних ланцюгів Маркова, отримаймо матрицю (таблицю) переходу:

$$\pi = \begin{pmatrix} P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1k} \\ P_{21}, P_{22}, \dots, P_{2k} \\ \dots \\ P_{k1}, P_{k2}, \dots, P_{kk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/3 & 1/6 \\ 0 & 2/3 & 1/3 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1/2 & 1/2 & 0 \end{pmatrix}.$$

Ця матриця показує, якщо система була у стані A_1 , то у наступній події вона з імовірністю $1/2$ залишиться у тому ж стані A_{11} і з імовірністю $1/3$ перейде у стан A_{21} , у стан A_{k1} вона перейде із імовірністю $1/6$. Якщо система вже перебуває у стані A_{21} , то при наступній події вона не зможе перейти у стан A_{11} , а з імовірністю $2/3$ залишиться у тому ж стані. З імовірністю $1/3$ перейде у стан A_{k1} . Зі стану A_{k1} система перейде з імовірностями $1/2$ у стан A_{11} або A_{21} .

Для аналізу безпеки об'єктів з успіхом використовується метод «дерев».

Це багатоетапний процес виявлення небезпечних ситуацій і їх причин, який за структурою нагадує дерево з розгалуженими гілками. Межі розгалуження дерева визначаються методом аналізу. Це графоаналітичний метод. До його переваг належить можливість зосередити увагу тільки на тих елементах системи і подіях, що безпосередньо є джерелом безпеки. Існують різноманітні прийоми виявлення небезпечних ситуацій:

- із застосуванням дерев відмов;
- із застосуванням дерев подій;
- небезпечності і працездатності тощо.

При побудові дерев розрізняють три види подій:

- 1) головна подія — це вихідна подія, що відбиває дію або стан елемента, який визначає безпеку функціонування всієї системи, тобто подія, з якої починається «дерево небезпек»;
- 2) провідна подія — відбиває стан системи при реалізації небезпек, це подія, що обмежує «дерево небезпек»;
- 3) допоміжні події, до яких належать проміжні, несуттєві, але достатньо вивчені й умовні події.

Наприклад, дерево подій має таку структуру:

- реалізація безпеки — верхня частина дерева;
- тіло дерева — послідовні події, що призводять до реалізації безпеки і поєднані між собою певною логікою;

- стовбур — події, що ґрунтуються на статистичних або теоретичних даних щодо їх виникнення. Ці події впливають на межі розгалуження дерева.

Техніка побудови дерев, що застосовується для аналізу СЛТС і її складових, докладно висвітлена у монографії «Теоретичні основи безпеки життєдіяльності» В. В. Березуцького.

4.2.2. Аналіз видів, наслідків та критичності відмов елементів системи

Безпека життєдіяльності людини у СЛТС визначається великою кількістю складових. Однією з найважливіших є *надійність виробництва*.

Надійність виробництва залежить від надійності технічних засобів, технологій і людини.

Надійність виробництва визначається також надійністю будівельних конструкцій виробничих споруд, транспортних засобів, енергетичних систем тощо.

Якою б досконалою не була СЛТС і які б питання не вирішувала, якщо вона не надійна, тобто часто виходить із ладу, *ефективність* її експлуатації буде низькою, а отже, небезпечною для людини і навколишнього середовища.

Під ефективністю СЛТС розуміють здатність системи досягати поставленої мети у заданих умовах із певною якістю.

Ефективність експлуатації СЛТС характеризується функцією виду:

$$W_c^{H_\Sigma}(t, \tau) = [W_m^{H_\Sigma}(t, \tau) \cdot W_r^{H_\Sigma}(t, \tau) \cdot Y_c^{H_\Sigma}(t, \tau)];$$

$$\text{при } l(t, \tau) \begin{cases} i = 1, \dots, L \\ i = 1, \dots, M, \end{cases}$$

де W_c — ефективність експлуатації СЛТС;

t — час функціонування СЛТС;

r — передісторія функціонування СЛТС;

W_m — узагальнений показник ефективності техніки;

W_r — узагальнений показник ефективності оператора;

Y — внутрішні витрати оператора в СЛТС;

H_Σ — комплекс робіт, орієнтований на виконання мети всіх етапів функціонування СЛТС;

l — функція зовнішніх впливів;

i — етапи функціонування СЛТС;

j — збурення зовнішнього середовища.

У спрощеному вигляді ефективність функціонування СЛТС можна оцінити за виразом:

$$W_c(t, \tau) = W_m(t, \tau) \cdot W_r(t, \tau) \cdot W_{cp}(t, \tau),$$

де $W_c(t, \tau)$ — ефективність функціонування машини;
 $W_m(t, \tau)$ — показник ефективності функціонування оператора;
 $W_{cp}(t, \tau)$ — показник, що характеризує вплив середовища на ефективність функціонування системи.

Отже, ефективність функціонування СЛТС залежить від ефективності роботи як технічних ланок, так і оператора.

Оцінюється ефективність функціонування СЛТС, головним чином, за показниками надійності й ергономічності, а також ризику виникнення небезпечних ситуацій.

Надійність технічних систем

Під *надійністю системи* розуміють властивість виконувати функції протягом певного часу у заданих умовах роботи. Критерії, що використовуються при оцінці надійності, наведені в табл. 4.10.

Таблиця 4.10

Критерії оцінки надійності СЛТС та її елементів

Техніка	Людина	СЛТС
1. Імовірність безвідмовної роботи, $P(t)$. 2. Коефіцієнт готовності, K_r . 3. Коефіцієнт відновлення техніки, що вийшла з ладу, $P_{відн}$	1. Імовірність безпомилкової роботи, $P_{оп}$. 2. Коефіцієнт готовності оператора, $K_{оп}$. 3. Імовірність своєчасного виконання роботи, $P_{св}$. 4. Імовірність виправлення допущених помилок, $P_{вип}$	1. Імовірність виконання системою завдання, $P_{лм}$

Оцінка надійності виконується:

- при проектуванні СЛТС — для прогнозу очікуваного рівня надійності (проектна оцінка надійності);
- при експлуатації СЛТС — для визначення фактично досягнутого рівня надійності (фактична оцінка надійності).

Оцінка надійності може виконуватися різними методами: аналітичними (розрахунковими), експериментальними і шляхом моделювання.

Надійність технічних засобів або їх елементів може оцінюватися як якісно, так і кількісно. Під якістю технічного засобу розуміють здатність виконувати задані функції в установлених умовах використання. Класифікація кількісних методів оцінки надійності СЛТС на рис. 4.24.

При застосуванні *структурного методу* діяльність СЛТС розглядається як ряд ієрархічних рівнів, кожен із яких представлений певною структурою.



Рис. 4.24. Класифікація методів оцінки надійності СЛТС

Системний метод ґрунтується на аналізі й оцінці надійності СЛТС, апаратури (приладів), безвідмовності операторів за різними функціональними рівнями (обслуговуючого, біологічного тощо).

Операційно-психологічний метод ґрунтується на розчленуванні діяльності оператора на окремі дії, для яких відомі вихідні значення часу, точності та надійності виконання. На підставі цього здійснюється синтез структури діяльності й отримання інтегральних характеристик надійності СЛТС.

Системно-технічний метод розрізняє оцінку надійності систем із різними типами комплектації. На підставі цих умов визначається надійність СЛТС.

Надійність технічних засобів або їх елементів може оцінюватися як якісно, так і кількісно. Під якістю технічного засобу розуміють здатність виконувати задані функції в установлених умовах використання.

Кількісно надійність реалізується через безвідмовність і відновлюваність. Поняття *відмови* є головним поняттям теорії надійності. Під відмовою розуміють випадкову подію, у разі якої система або її елементи повністю або частково втрачають свою працездатність, унаслідок чого задані їм функції не використовуються.

Відмови класифікують за:

- часом;
- наслідками;
- причинами виникнення;
- характером виявлення тощо.

За часом існування і характером усунення відмови поділяються на стійкі і тимчасові. *Стойкі відмови* усуваються тільки в результаті ремонту (заміни елемента, що відмовив) або регулювання. *Тимчасові відмови* можуть зникати самостійно, без втручання обслуговуючого персоналу. Тимчасові відмови, що повторюються багаторазово, називаються *переміжними*.

При класифікації за наслідками розрізняють *повні і часткові відмови*. Повна відмова виключає можливість продовжувати роботу технічного засобу. Наприклад, припинення надходження палива до паливного насоса призводить до зупинки двигуна.

Відмови технічних засобів виникають за рахунок *зносу, старіння* або через несприятливий збіг умов роботи. Знос — повільні зміни розміру й форми робочих поверхонь окремих деталей технічного засобу, що відбувається під час його експлуатації. Старінням технічних засобів називають структурні зміни матеріалів, із яких виготовлені його деталі. Залежність *інтенсивності відмов* від терміну експлуатації технічного засобу наведені на рис. 4.25.



Рис. 4.25. Залежність інтенсивності відмов від терміну експлуатації технічного засобу

Причиною відмов технічних засобів можуть бути також дефекти конструктивних рішень, порушення технологічних норм їх виготовлення.

Основними критеріями *безвідмовності технічних засобів* є імовірність $P(t)$ безвідмовної роботи й інтенсивність відмов. Під імовірністю безвідмовної роботи розуміють імовірність того, що час T безвідмовної роботи засобу буде більше заданого системі часу t :

$$P(t) = P(T > t).$$

Імовірність безвідмовної роботи технічного засобу в будь-який час експлуатації (t) розраховується за результатами статистичної обробки даних, отриманих під час випробувань системи на надійність:

$$P^*(t) = N_0 - \frac{n(t)}{N_0},$$

де $P^*(t)$ — імовірність безвідмовної роботи засобу за час t ;
 N_0 — загальна кількість засобів;
 $n(t)$ — кількість засобів, що відмовили на час роботи t .

Відмова як подія, протилежна події безвідмовної роботи, визначається:

$$q(t) = 1 - P(t),$$

де $q(t)$ — відмова.

Зі зростанням терміну роботи від t_1 до t_2 технічного засобу ймовірність його відмови неперервно зростає.

Найбільш повною характеристикою надійності елементів системи є *інтенсивність відмов*. Інтенсивність відмов визначається як відношення кількості засобів, які відмовили за одиницю часу, до їх кількості, що залишилися працювати:

$$\lambda(t) = \frac{dn}{N_u(t) dt},$$

де $\lambda(t)$ — інтенсивність відмов;

dn — кількість засобів, що відмовила за час dt ;

$N_u(t)$ — кількість засобів, що пропрацювали час dt .

Імовірність відмов пов'язана з імовірністю безвідмовної роботи. Цей зв'язок отримав назву *загального закону надійності: характер зміни ймовірності безпомилкової роботи технічного засобу у часі при прийнятих допущеннях залежить тільки від характеру зміни у часі інтенсивності відмов*. Його відображає вираз:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt},$$

де λ — інтенсивність відмов.

При $\lambda(t) = \text{const}$ формула набуває вигляду:

$$P(t) = e^{-\lambda(t)}.$$

Ця закономірність отримала назву *експоненційного закону надійності*.

Інтенсивність відмов системи, що складається з k елементів, визначають як суму інтенсивностей відмов окремих елементів. Для таких систем:

$$P(t) = \prod_{i=1}^k p_i = l - \sum_{i=1}^k e^{\lambda_i(t)}.$$

Використовуючи поняття згаданої теорії надійності для СЛТС неперервного типу показником надійності є ймовірність безвідмовного, *безпомилкового* і своєчасного протікання виробничого процесу за термін t . Надійність такої системи можна подати у вигляді:

$$P_{л,м,л}(t) = P_T(t) + [1 - P_T(t)] K_{оп} [P_{оп} P_{св} + (1 - P_{випр}(t_л))],$$

де $P_T(t)$ — імовірність безвідмовної роботи технічних засобів;

$K_{оп}$ — коефіцієнт готовності оператора;

$P_{св}$ — імовірність своєчасного виконання оператором необхідних дій;

$P_{випр}$ — імовірність виправлення помилкових дій.

Для СЛТС змішаного типу формула для розрахунку надійності має вигляд:

$$P_{л,м,2} = K_{оп} [P_{т} P_{оп} P_{св} + (1 - P_{т}) P_{від} P_{оп} P_{св} + P_{он}] P_{т} P_{випр},$$

де $P_{від}$ — ймовірність відмови техніки.

Для СЛТС дискретного типу розрахунок надійності виконують за формулою:

$$P_{л,м,3} = K_{т} P_{т} P_{оп} P_{св} + (1 - P_{т} K_{т}) P_{від} P_{оп} P_{св} + (1 - P_{оп}) P_{т} P_{випр},$$

де $K_{т}$ — коефіцієнт готовності техніки.

Поряд із характеристиками ймовірності безвідмовної роботи, надійність технічних засобів визначається *коефіцієнтом готовності* ($K_{т}$):

$$K_{т} = \frac{T_0}{T_0 - T_{п}},$$

де T_0 — час безвідмовної роботи технічного засобу за термін T ;

$T_{п}$ — середній час простою технічного засобу.

Розглянуті кількісні оцінки надійності функціонування технічних засобів ґрунтувалися на ймовірності відмов. Іншим підходом є *визначення їх надійності за наслідками*. Він створює можливість зв'язати відмову технічного засобу з аварією системи, готовністю її до подальшого використання. Ця залежність, наприклад, для випадку відмови польотів літаків цивільної авіації визначається за формулою:

$$F(A/Q)q = \beta(1 - \delta)(1 - \eta)[(1 - \nu) + \nu(1 - \xi)]q,$$

де η — ймовірність відмови, яка не порушує режиму польоту;

$F(A/Q)q$ — умовна ймовірність наслідку A ;

ξ — парировання відмови після її виявлення;

q — ймовірність відмови технічного засобу;

ν — ймовірність своєчасного виявлення відмови льотчиком;

β — ймовірність відмови технічного засобу, що визначається на підставі статистичних даних;

δ — надійність роботи системи резервування.

Для випадку, пов'язаного з ремонтом авіатехніки (D), рівняння має вигляд:

$$F(D/Q)q = q.$$

Зв'язок між надійністю й відсутністю стійких відмов має такий вигляд:

$$P(t) = K_{т} P_{y}(t) P_{n}(t),$$

де $P_{y}(t)$ $P_{n}(t)$ — ймовірність відсутності стійких відмов, що чергуються за час t .

Поряд з оцінкою надійності технічних систем з точки зору безпеки життєдіяльності людини важливе значення має такий показник,

як *безпечність праці оператора* в СЛТС. Він оцінюється ймовірністю безпечної роботи:

$$P_{оп} = 1 - \sum_{i=1}^n P_{винi} \cdot P_{помi},$$

де $P_{винi}$ — ймовірність виникнення небезпечної або шкідливої для людини виробничої ситуації i -го типу;

$P_{помi}$ — ймовірність помилкових дій оператора в i -й ситуації;

n — кількість небезпечних ситуацій.

Небезпечні та шкідливі ситуації можуть створюватися через технічні причини (несправність машин, аварійна ситуація, несправність захисних засобів тощо), стану умов праці й ін.

Надійність оператора

Надійність оператора визначається як ймовірність якісного виконання роботи або поставленого завдання протягом установленого терміну при заданих умовах.

Надійність діяльності людини у СЛТС визначається надійністю організму людини: надійністю виконання людиною функцій з управління технічними засобами і їх обслуговування. Тому надійність оператора звичайно представляють у вигляді структурної і функціональної надійності. Під *структурною надійністю* розуміють властивість людини зберігати дієздатність протягом визначеного часу у певних умовах.

Функціональна надійність — властивість людини виконувати певні функції відповідно до завдання у той же термін і за тих же умов.

Таким чином, у загальному вигляді надійність оператора, як ймовірність безвідмовної роботи за термін t ; дорівнює:

$$K_{оп}(t) = K_{оп} P_{ф}(t) P_{ψ}(t),$$

де $K_{оп}$ — коефіцієнт готовності оператора, що дорівнює ймовірності сприймання інформації за час t ;

$P_{ф}$ — структурна надійність;

$P_{ψ}$ — функціональна надійність.

На безпечність функціонування СЛТС найбільший вплив має функціональна надійність. Із цього боку надійність оператора характеризується показниками *безпомилковості, готовності, відновлюваності, своєчасності*.

Як і для технічних засобів, головним показником безпомилковості роботи є ймовірність безпомилкової роботи. Ця ймовірність розраховується як на рівні окремої операції, так і рівні всього завдання (алгоритму) в цілому. На рівні окремої операції основними критеріями є вірогідність безпомилкового виконання операції, а для типових операцій, що найчастіше повторюються — *інтенсивність помилок* (відмов).