Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Колєнов С. О.

МЕДІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В РАДІОФІЗИЦІ

Частина 2

Зорове сприйняття інформації

Навчально-методичний посібник до лекційного курсу
для студентів факультету радіофізики, електроніки
та комп'ютерних систем

Київ 2022

УДК 0047 (381.3)

Медійні технології в радіофізиці: Навчально-методичний посібник до лекційного курсу для студентів факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем. Частина 2: Зорове сприйняття інформації / С. О. Колєнов. – Київ: Навчально-науковий інститут високих технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2022. – 67 с.

Рецензент: заступник директора Інституту проблем реєстрації інформації, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, проф. Крючин А. А.

Навчально-методичний посібник до лекційного курсу складений у відповідності з навчальною програмою дисципліни "Інформаційні технології в медійному середовищі", що викладається студентам факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем. Друга частина цього посібника присвячена медійним технологіям в області візуалізації інформації. Вона містить дві глави з основними відомостями про особливості сприйняття зорової інформації людиною, а також використання засобів обробки та візуалізації такої інформації. Посібник спрямований на допомогу студенту в оволодінні необхідними знаннями та навичками при підготовці до заліку.

Ухвалено Вченою радою Навчально-наукового інституту високих технологій
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
(протокол № 2 від 27 вересня 2022 року)

© Видавництво Навчально-наукового
інституту високих технологій
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка, 2022
© Колєнов С. О., 2022

Вступ

Даний навчально-методичний посібник написаний у відповідності з навчальною програмою дисципліни "Інформаційні технології в медійному середовищі", що викладається у вигляді лекцій для студентів факультету радіофізики, електроніки та комп’ютерних систем спеціальності 6.040204. Даний курс лекцій розрахований на один семестр, складається з двох модулів та закінчується заліком. Перший модуль присвячений медійним технологіям в області звуку, а другий – медійним технологіям в області візуалізації інформації. Відповідно до модулів посібник також розділений на дві частини. В цій частині розглядаються основні поняття та принципи, пов’язані з особливості сприйняття зорової інформації людиною, а також використання засобів обробки та візуалізації такої інформації.

Медійні технології сьогодні набувають особливого статусу. Ми стикаємося з використанням цих технологій кожен день. Цьому сприяє широке розповсюдження комп’ютеризації та інформатизації суспільства, впровадження в побуті цифрових засобів комунікації. У зв’язку з цим вивчення прикладних аспектів теорії інформації набуває вагоме значення. Це дозволяє розробляти нові технології. Наприклад, нові методи обробки відеозображень та технології синтезу віртуальної реальності. Всі ці технології та методики базуються в першу чергу на біологічних особливостях людини щодо сприйняття такої інформації.

Проблема обробки та візуалізації відеоінформації не нова. Починаючі з середини XX століття вчені займаються дослідженнями в цій галузі. Наслідком цих зусиль на початку стала поява аналогового телебачення. При цьому одночасно вирішувалося декілька задач – це формування, передача та відображення картинки, що рухається. Ближче до кінця XX століття дослідники спрямували свої зусилля на розробку та впровадження цифрових технологій передачі та обробки інформації. Перевага цифрового підходу над аналоговим є очевидною: цифрове подання є зручнішим у використанні, воно дозволяє домогтися кращої якості та функціональності систем.

Додатковий поштовх для розвитку цифрових технологій дала поява персональних комп’ютерів. Перші персональні обчислювальні машини були не досить продуктивними для виконання складних завдань, пов’язаних з обробкою потокового відео. Проте, їх продуктивності цілком вистачало для обробки окремих зображень. Як наслідок виділилося два окремих проблемних напрями

в задачах візуалізації. Це проблема обробки потокових зображень та проблема обробки окремих зображень.

На сьогодні медійні технології є однією з найважливіших частин інформаційних технологій. Неперервне зростання кількості інформації, що людина отримає за допомогою медійних технологій, потребує постійного удосконалення існуючих технологій візуалізації та обробки цієї інформації для підвищення ефективності її сприйняття людиною. При цьому важливим також є забезпечення захисту здоров'я людини від негативних факторів, що супроводжують зростання інформаційного навантаження на органи сприйняття людини, зокрема, на органи зору. За допомогою органів зору людина отримає більше 80% інформації про навколишній світ. Тому втрата можливості зорового сприйняття відчувається людиною особливо болісно. Як наслідок безпечність нових технологій візуалізації для людини виходить на перший план. При цьому важливим є вивчення особливостей сприйняття людиною зорової інформації та врахування цих особливостей при розробці різноманітних технічних засобів візуалізації.

Основною метою даного посібника є ілюстрація та пояснення основних принципів та методів обробки та візуалізації зорової інформації найбільш ефективним чином. Крім, того, матеріал, зібраний в даному посібнику, може стати додатковою основою для подальшого вивчення таких дисциплін як "Телекомунікаційні технології" та "Цифровий зв'язок". Посібник можна також рекомендувати і іншим студентам радіофізичних та споріднених з ними факультетів університетів.

Глава 1. Людський зір

Найважливішим органом відчуття людини, що дозволяє сприймати навколишній світ у всіх його деталях, є око. Інші органи відчуття також виконують важливі функції по сприйняттю зовнішнього світу, але у порівнянні з оком грубіше та слабкіше. Мета роботи ідеального ока полягає у тому, що кожна частина будь-якого предмета повинна передаватися власним окремим відчуттям. При цьому дуже важлива просторова коректність передачі і мозок повинен отримати вірні відомості про форму та розміри об'єкту, а також відстань до об'єкту.

Для кращого розуміння процесів сприйняття адаптивного комп'ютерного кодування графічної інформації на початку треба розглянути будову людського ока.

1.1. Будова людського ока

Людина бачить тому, що у неї є, так звані, зорові аналізатори. Їх два і кожний складається з трьох частин:

- очне яблуко;
- центр зору в корі головного мозку;
- провідні шляхи (нервові волокна), що з'єднують центр зору в мозку з кожним з очних яблук.

Якщо маршрут ходу зорових нервових волокон добре відомий, то деталі та роль окремих структур зорового центру мозку на даний час наукою ще не до кінця вивчені. Проте досить добре вивчений периферійний відділ зорового аналізатора – очне яблуко.

Очі людини розташовані в западинах черепа, які називаються очницями. Око в них закріплено за допомогою чотирьох прямих та двох косих м'язів, що керують його рухами. Очне яблуко людини має діаметр близько 24 мм і важить 6-8 г. Більшу частину ока складають допоміжні структури, які призначені для проектування поля зору на шар фоточутливих клітин (сітківку). Очне яблуко має форму кулі. Але при захворюваннях зору (наприклад, при короткозорості) очне яблуко може витягуватися, перетворюючись у об'ємний еліпс.

Схема очного яблука представлена на рисунку 1.

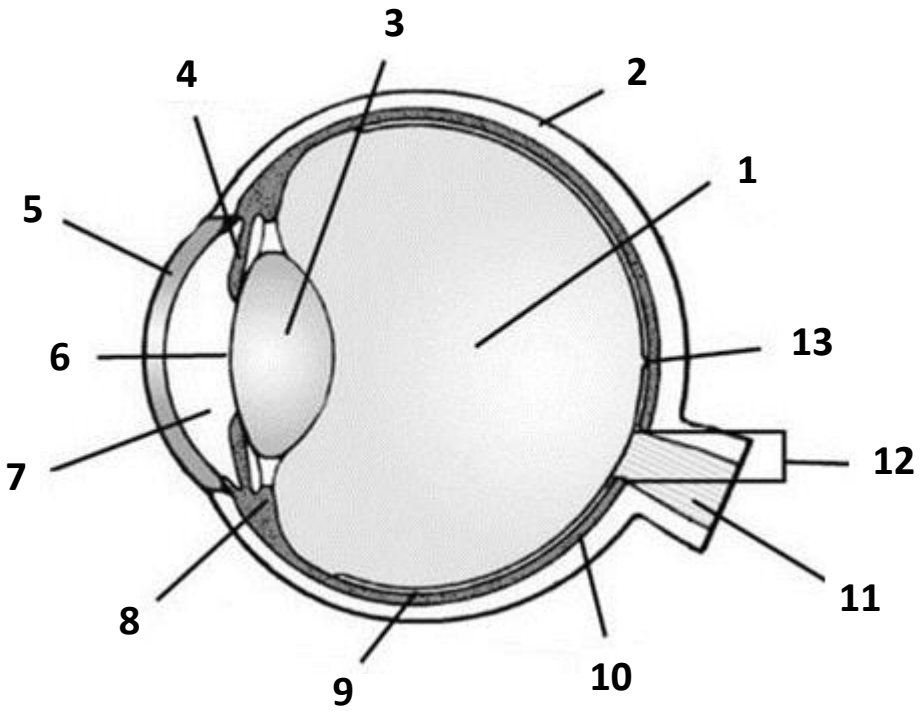


Рис. 1. Будова людського ока: 1 – склоподібне тіло, 2 – склера, 3 – кришталик, 4 – райдужка, 5 – роговиця, 6 – зіниця, 7 – передня камера, 8 – вієподібне тіло, 9 – сітківка, 10 – судинна оболонка, 11 – зоровий нерв, 12 – диск зорового нерву, 13 – фовеола

Найбільшу частину ока за обсягом та вагою займає прозора напіврідка речовина – склоподібне тіло (1). Ця частина ока забезпечує його форму та підтримує необхідне для роботи ока взаємне розташування між собою внутрішніх частин ока. Склера (2) є зовнішньою оболонкою ока. Склера захищає око від ушкодження та допомагає очному яблуку зберігати свою форму. Товщина склери близько 1 мм. Вона покриває око з усіх боків, окрім передньої частини, де вона перетворюється у прозору роговицю (5). Завдяки викривленій поверхні, роговиця діє як головна світлозаломлююча лінза із силою заломлення приблизно 40 діоптрій (може дещо відрізнятися для кожної людини). Товщина роговиці в центральній зоні близько 0.5 мм.

З середини внутрішню порожнину ока вистилає сітківка (9). Сітківка складається з нервових клітин, датчиків, які сприймають світлові промені. Вона має складну багатошарову структуру (крім її центральної частини). Зовнішній шар

пов’язаний із судинною оболонкою (10) товщиною близько 0.3 мм, що є мережею дрібних судин для живлення усіх частин ока. В цьому шарі розташовані клітини, пофарбовані чорним пігментом. За ним йдуть основні елементи зорового сприйняття, які за своїм зовнішнім виглядом отримали назву паличок і колбочок. Наступні шари відповідають нервовим волокнам, що підходять до паличок та колбочок. Кожне нервове волокно закінчується або колбочкою, або групою паличок. Колбочки та палички відрізняються за своїми функціями. Палички більш світлочутливі, але не розрізняють кольорів. Колбочки, навпаки, розрізняють колір, проте менш чутливі до світла. Кольорові об’єкти при слабкому освітленні, коли весь зоровий процес здійснюється паличками, відрізняються тільки яскравістю, тому колір об’єктів у таких умовах не відчувається. Загальна кількість паличок та колбочок у сітківці одного ока людини досягає приблизно 140 млн., з них близько 7 млн. складають колбочки. Розподіл паличок та колбочок по сітківці є нерівномірним. У центральному місці сітківки, через яке проходить зорова лінія ока, розташовані лише колбочки. Центральна частина сітківки має овальну ділянку розміром від 1.4 до 2 мм, яку називають жовтою плямою. У цій плямі знаходиться пігмент, забарвлюючий її у відповідний колір. В межах плями забезпечується гарна гострота зору. Всередині цієї ділянки знаходиться невеличке заглиблення (13) діаметром приблизно 0.4 мм, яке називають центральною ямкою. Кількість колбочок тут сягає 4-5 тис. Ще цю центральну ямку називають фовеолою. Жовта пляма і особливо її заглиблення (фовеола) є областю найбільш чіткого бачення. Тут кожна колбочка приєднана до окремого волокна зорового нерву (11). Уся інша частина сітківки надає можливість мати периферійний зір. У периферійній частині сітківки одне волокно зорового нерву може з’єднуватися з рядом елементів (колбочок та паличок). Також у сітківці є ділянка (12), яка зовсім позбавлена паличок та колбочок і тому зовсім нечутлива до світла. Це місце, де стовбур зорового нерву, що йде до мозку, виходить з ока. Цю круглу ділянку сітківки на дні ока діаметром 1,5 мм називають диском зорового нерву. Відповідно до цього в полі зору можна визначити «сліпу пляму».

За роговицею знаходиться передня камера (7). В ній циркулює волога, що забезпечує обмін речовин (живлення) прозорих частин ока: роговиці, склоподібного тіла та кришталика. Кришталик (3) – це прозоре еластичне двоопукле утворення , що розділяє передню камеру та склоподібне тіло. З фізичної точки зору це є опукла лінза із силою заломлення променів світла

приблизно 20 діоптрій. Кришталик тримається всередині ока за допомогою вієподібного тіла (8), яке є частиною судинної оболонки ока з круговим кільцеподібним м'язом. Цей м'яз може регулювати силу заломлення променів кришталиком, що забезпечує чітке бачення предметів, які перебувають на різних відстанях від ока. Перед кришталиком розташована райдужка (4) – кільцева м'язова діафрагма, яка містить пігмент, що визначає колір очей. З фізичної точки зору це кругова шторка з отвором у центрі – зіницею (6). У райдужці є кільцеподібні м'язи, що можуть звужувати та розширювати зіницю. Колір райдужки залежить від кількості та якості пігментних клітин у ній. Вона регулює кількість світла, що проникає в око. Діаметр зіниці змінюється від 2 до 8 мм. Промені світла, що проходять крізь зіницю, тонко фокусуються кришталиком точно на центральну зону сітківки.

Реєстрація світла світлочутливими клітинами сітківки є фотохімічним процесом. У паличок є особлива речовина, що розкладається під дією світла, – зоровий пурпур або *родопсин*. У колбочок теж є аналогічна речовина – зоровий пігмент, що називається *йодопсином*. Розкладання зорового пурпуру та зорового пігменту під дією світла являє фотохімічну реакцію, у результаті якої в нервових волокнах з'являється електрична різниця потенціалів. Світлове подразнення у вигляді нервових імпульсів передається від ока до мозку, де і сприймається людиною у вигляді світла.

1.2. Процес сприйняття та обробки графічних образів

В процесі сприйняття графічних образів зорова система людини вмикає низку механізмів, які суттєво покращують якість отримання зорової інформації і полегшують її обробку зоровими центрами мозку. Одним з них є *акомодація*.

Акомодація – це рефлекторний механізм, за допомогою якого промені світла, що надходять від об'єкту, фокусуються на сітківці. Цей механізм включає два процеси, кожен з яких можна розглянути окремо. В одному з процесів бере участь райдужка. При яскравому світлі кільцева мускулатура райдужки скорочується, а радіальна розслаблюється. В результаті відбувається звуження зіниці і кількість світла, що потрапляє на сітківку, зменшується, що запобігає її ушкодженню. В той же час, при слабкому освітленні, навпаки, радіальна мускулатура скорочується, а кільцева розслаблюється, що призводить до

розширення зіниці та збільшення кількості світла, що потрапляє на сітківку. Додаткова перевага, що досягається при звуженні зіниці, полягає у збільшенні глибини різкості.

Для того, щоб потік світла, що потрапляє в око, фокусувався на сітківці, він повинен бути заломлений, і для близьких предметів заломлення повинно бути сильнішим. Нормальне око здатне точно фокусувати світло від об'єктів, що перебувають на відстані від 25 см до нескінченості. Основне фокусування світла здійснює роговиця. Проте, форма роговиці не може змінюватись, тому рефракція світла тут залежить виключно від кута падіння світла на роговицю, що у свою чергу залежить від відстані до предмета. Функція кришталика полягає у остаточному наведенні на фокус. Форма кришталика залежить від ступеня скорочення циліндричного м'язу, який фактично і регулює ступінь заломлення світла.

На сітківці зображення виходить інвертованим, але це не заважає людині правильно сприймати зображення, тому що вся справа не в розташуванні зображення, а в інтерпретації його мозком.

Кольоровий зір обумовлений тим, що у видимій частині спектру електромагнітного випромінювання людське око поглинає світло усіх довжин хвиль, сприймаючи їх у вигляді шести основних кольорів, кожний з яких відповідає певній частині спектру (див. Таблицю 1).

Таблиця 1. Кольори видимого спектру та довжини хвиль, що їм відповідають.

Колір	**Довжина хвилі, *нм***
Червоний	> 620
Помаранчевий	590 – 620
Жовтий	570 – 590
Зелений	500 – 570
Синій	440 – 500
Фіолетовий	< 440

Існує три види світлочутливих клітин (колбочок), що реагують на колір світла, – «червоні», «зелені» та «сині». Ці клітини містять пігменти, які за даними електрофізичних досліджень поглинають світло з різною довжиною хвилі. Кольоровий зір пояснюється з точки зору трикомпонентної теорії, відповідно до

якої відчуття різних кольорів та відтінків визначаються ступенем подразнення світлом різного типу колбочок. Наявність трьох різних видів колбочок робить людину «трихроматом». Для порівняння, існують тварини, у яких може бути й більше видів колбочок. Наприклад, у ротоногих – 16 видів [1]. Однакова стимуляція всіх типів колбочок викликає відчуття білого кольору. Первинне розрізнення кольорів здійснюється у сітківці, але остаточний колір, що буде сприйнятий, визначається інтегральними функціями мозку. Ефект змішування кольорів лежить в основі кольорового телебачення, фотографії та живопису.

Бінокулярний зір – це ще один з механізмів, який дозволяє отримувати додаткову інформацію про навколишній світ, зокрема, допомагає сприймати об'ємну форму предметів та краще орієнтуватись у просторі. Бінокулярний зір має місце в тому випадку, коли зорові поля обох очей перекриваються таким чином, що їхні центральні ямки (фовеоли) фіксуються на одному і тому ж об'єкті. Бінокулярний зір має низку переваг у порівнянні з використанням лише одного ока. Зокрема, він знімає ефект «сліпої плями» і лежить в основі стереоскопічного зору, тобто зору, при якому сприйняття форми, розмірів та відстані до предмета відбуваються набагато точніше. Крім того бінокулярний зір розширює поле зору і дає можливість компенсувати ушкодження одного ока за рахунок іншого. Стереоскопічний зір обумовлений тим, що на сітківках двох очей одночасно виникають трохи різні зображення, які мозок сприймає як один образ. Чим більше очі спрямовані вперед, тим більше стереоскопічне поле зору. У людини загальне поле зору охоплює 180°, а стереоскопічне – 140°. Коли обидва ока спрямовані на один і той самий предмет, вони повертаються на певний кут відносно один одного. Цей ефект називається *конвергенцією* і також бере участь в аналізі нашим мозком інформації про об'ємну форму предметів та відстань до них. Аналіз зображень, що одержуються на сітківці при стереоскопічному зорі, здійснюється у двох симетричних ділянках зорової кори головного мозку. Ця зорова кора розташована у задній частині потиличних ділянок. Саме тут зорові сигнали інтерпретуються і ми бачимо загальну картину. Однак, те, що ми бачимо, набуває сенсу тільки після обміну сигналами з іншими ділянками кори головного мозку, де зберігається попередня зорова інформація.

Близько 20% волокон зорового нерву не доходять до зорової кори, а поступають у середній мозок, де беруть участь у рефлекторній регуляції діаметра зіниці, рухів ока, та інших функціях.

1.3. Око як детектор випромінювання

Для будь-якого детектора об’єкти характеризуються якою-небудь фізичною величиною, яка повністю описує дію об’єкту на детектор. Так для термометра важлива лише температура навколишнього середовища, а для пружних ваг – проекція сили, що прикладається до кінця пружини на напрямок, у якому вона розтягується. При цьому реакція детектора може бути нелінійною і залежати від передісторії. Але, разом з тим, детектор не зможе відрізнити два об’єкти, якщо вони характеризуються фізичними величинами, які діють на нього з однаковою силою.

Для будь-якого детектора світла (електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі біля 0.5 мкм) існує функція $p(\lambda)$ – ймовірність того, що фотон з довжиною хвилі λ, який потрапив на детектор, буде зареєстрований (наприклад, з’явиться новий вільний заряд у напівпровіднику або відбудеться реакція фотосинтезу чи фоторозпаду молекули). При цьому вважається, що всі релаксаційні процеси, пов’язані з відновленням властивостей детектора після реєстрації попереднього фотону вже закінчилися. У такому разі, якщо для певного детектора існує рівність $p(\lambda_1) = kp(\lambda_2)$, то такий детектор не зможе відрізнити дві ситуації, коли за один і той самий час на нього потрапило N фотонів з довжиною хвилі λ_1 або (kN) фотонів з довжиною хвилі λ_2. Тобто для цього детектора світло, що на нього потрапило в обох випадках, буде характеризуватися однією єдиною величиною:

$$P = \int n(\lambda)p(\lambda)d\lambda, \tag{1}$$

де $n(\lambda)d\lambda$ – кількість фотонів з довжиною хвилі в інтервалі $(\lambda, \lambda + d\lambda)$, що потрапляють на детектор в одиницю часу. В даному випадку величина P – є математичним очікуванням кількості реєстрацій фотонів для детектора з нескінченно малим часом відновлення. Тобто P визначає реакцію детектора.

Якщо детектор працює у складі системи, що фокусує на детекторі зображення деякої поверхні зі спектральною яскравістю $L(\lambda)$, то можна ввести деяку безрозмірну функцію $\rho(\lambda)$, що залежить від властивостей середовища, через яке проходить світло від джерела до детектора, таку, що

$$n(\lambda) = \mathrm{c}\,\lambda\,\rho(\lambda)L(\lambda), \tag{2}$$

де c – деякий коефіцієнт, що залежить від геометрії системи. Тоді можна ввести функцію:

$$R(\lambda) = \lambda\,\rho(\lambda)L(\lambda), \tag{3}$$

яку можна визначити як спектральну чутливість всієї системи. Таким чином, математичне очікування (1) з використанням (2) та (3) можна переписати у вигляді:

$$P = \mathrm{c}\int p(\lambda)R(\lambda)d\lambda. \tag{4}$$

Ця величина є з погляду детектора повною і єдиною характеристикою об'єкта зі спектральною яскравістю $L(\lambda)$.

Враховуючи (4), треба зазначити, що реєстратор світла не зможе розрізнити випромінювання, яке реєструється детекторами, що характеризуються ймовірностями $p_1(\lambda)$ та $p_2(\lambda)$, якщо

$$\int p_1(\lambda)R(\lambda)d\lambda = \int p_2(\lambda)R(\lambda)d\lambda. \tag{5}$$

Як зазначалося раніше, людина має три типи детекторів (колбочок), що дозволяє їй сприймати різні кольори. Ці три типи детекторів описуються трьома функціями спектральної чутливості, що можна позначити як $l(\lambda)$, $m(\lambda)$ та $s(\lambda)$. Отже у відповідності з (5) людина не зможе розрізнити випромінювання, яке реєструється детекторами з характеристиками $p_1(\lambda)$ та $p_2(\lambda)$, для яких виконуються рівності:

$$\begin{aligned}
&\int p_1(\lambda)l(\lambda)d\lambda = \int p_2(\lambda)l(\lambda)d\lambda = L,\\
&\int p_1(\lambda)m(\lambda)d\lambda = \int p_2(\lambda)m(\lambda)d\lambda = M,\\
&\int p_1(\lambda)s(\lambda)d\lambda = \int p_2(\lambda)s(\lambda)d\lambda = S.
\end{aligned} \tag{6}$$

Числа L, M та S, які в колориметрії прийнято називати латинською «*Tristimulus values*», несуть повну інформацію про світло, необхідну для відтворення відчуття кольору. Таке позначення відповідає довжинам світлових хвиль, які реєструє кожен тип колбочок (*Long* – довгі, *Medium* – середні, *Short* – короткі). При цьому необхідно зазначити, що однакові кольорові відчуття можуть бути викликані світлом різного спектрального складу. Це приводить нас до важливого висновку: для того, щоб передати колір від якогось джерела, нам не потрібно точно відтворювати спектральний склад його випромінювання, досить підібрати такий спектр, який просто буде викликати аналогічні кольорові відчуття. Це основний принцип всіх методів відтворення кольорів.

Відносна спектральна чутливість колбочок у людини, обрахована на основі непрямих вимірювань, показана на рисунку 2.

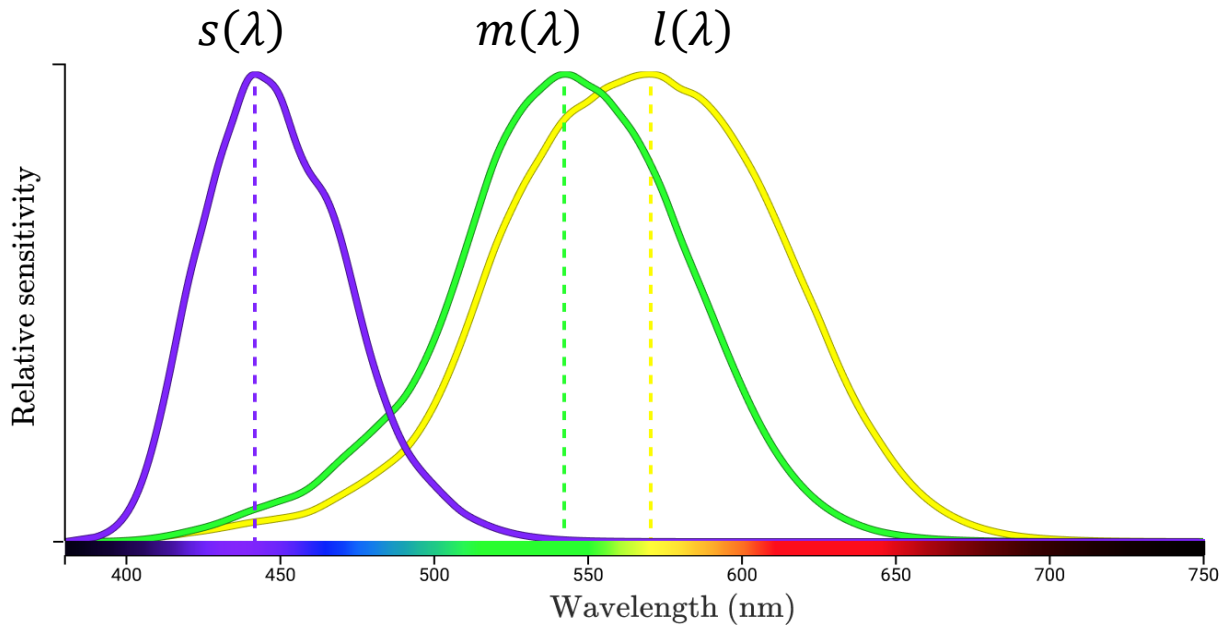


Рис. 2. Відносна спектральна чутливість світлочутливих клітин (колбочок) ока людини [2].

Три криві на рисунку 2 показують, наскільки чутливі колбочки певного типу до кожної довжини хвилі. Найвища точка кожної кривої вказує на довжину хвилі, до якої колбочка найбільш чутлива. Три набори колбочок зводять будь-яку криву спектральної щільності потоку випромінювання до триплету чисел (S, M, L). Відповідно кожен триплет (S, M, L) буде окремим кольором. Це доволі зручно, оскільки з окремими числами працювати простіше, ніж зі складною неперервною функцією.

1.4. Кольорові моделі

Кольорова модель – термін, що позначає абстрактну модель опису представлення кольорів у вигляді кортежів чисел, що мають зазвичай три або чотири значення, які називають кольоровими компонентами або кольоровими координатами. Разом з методом інтерпретації цих даних (наприклад, визначення умов відтворення чи/або перегляду – тобто задання способу реалізації), множина кольорів кольорової моделі визначає кольоровий простір.

Як було зазначено вище, кожен вид людських рецепторів світла (колбочок) реагує на певний діапазон видимого світла. Відгук, що викликає у колбочках світло певного спектру, називається кольоровим *стимулом*. При цьому світлові джерела з різним спектральним складом випромінювання можуть мати один і той самий кольоровий стимул і, таким чином, сприйматися людиною однаково. Це явище називається *метамерією*.

Кольорові простори дозволяють кількісно визначити колір. Можна визначити кольоровий простір стимулів як лінійний простір, якщо задати координати в цьому просторі як значення стимулів, що відповідають відгуку колбочок довгохвильового (L), середньохвильового (M) та короткохвильового (S) діапазону оптичного спектру. Початок координат $(S, M, L) = (0, 0, 0)$ буде відповідати чорному кольору. В той же час білий колір не буде мати чіткого положення в даному визначенні діаграми можливих кольорів, а буде визначатися, наприклад, через кольорову температуру, певний баланс білого або якимось іншим чином. Повний кольоровий простір людини має вигляд конуса у формі підкови (рис. 3). Принципово дане представлення дозволяє моделювати кольори будь-якої інтенсивності – починаючи з нуля (чорного кольору) до нескінченості. Проте, на практиці, людські рецептори можуть перейти у насичення і навіть бути пошкоджені випромінюванням з екстремальною інтенсивністю. Тому дана модель не може бути застосована для

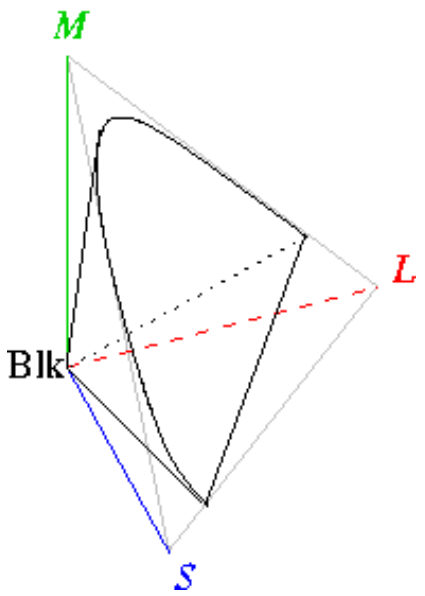


Рис. 3. Кольоровий простір LMS.

опису кольору в умовах надзвичайно високої інтенсивності випромінювання. Також така модель не розглядає опису кольору в умовах дуже низької інтенсивності (оскільки у людини у цьому випадку задіяний інший механізм сприйняття світла – через палички). Крім того, у кольорового простору LMS є деякі властивості, що не мають користі. Справа у тому, що не всі значення координат кольору фізично можливі. Наприклад, координата LMS $(0, 1, 0)$. Щоб вийти на цю координату треба стимулювати тільки колбочки M і при цьому взагалі не стимулювати колбочки L та S. Але це неможливо, оскільки крива чутливості колбочок M значно перекриває криві L та S у всьому діапазоні довжин хвиль (див. рис. 2). В результаті виникає проблема, що реально складно збільшити стимуляцію тільки одного типу колбочок. Через такий побічний ефект, зокрема, дана кольорова модель не дуже сумісна з технологією утворення кольорів, що застосовується у дисплеях.

Інша історична проблема використання моделі LMS полягає у тому, що точної чутливості колбочок не знали до 1990-х років, а необхідність розробки математично точної моделі кольору виникла набагато раніше. Перший значний прогрес в цій області стався наприкінці 1920-х, коли Вільям Девід Райт [3] і Джон Гилд [4] провели експерименти. Вони точно визначили окремі кольори за внеском трьох конкретних довжин хвиль. Хоча вони, ймовірно, не знали про три типи колбочок на сітківці, але ще за сто років до них виникла ідея, що всі видимі кольори можна представити як комбінацію трьох певних кольорів. В результаті цих експериментів був створений графік, який показує кількість червоного (700 *нм*), зеленого (546 *нм*) та синього (435 *нм*) світла, що необхідна для створення відчуття певного кольору на заданій довжині хвилі. Ці функції відомі як функції додавання кольорів (рис. 4): $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$. Вони дають чистий спектральний колір, який асоціюється з довжиною хвилі 600 *нм* за (R, G, B) координатами (0.34, 0.062, 0). У той час як кольоровий простір LMS дозволяє точно визначити колір, кольоровий простір RGB дає спосіб його точно відтворити, за винятком кольорів з від'ємною координатою.

Простір кольорових стимулів має властивість адитивного змішування кольорів внаслідок лінійності кольорового простору. Згідно закону Грассмана [5] колір є тривимірним – для його опису необхідні три лінійно незалежні компоненти. Таким чином, будь-який колір (вектор кольорового простору) можна описати через лінійну комбінацію кольорів, що обрані як базис. Такі кольори називають основними.

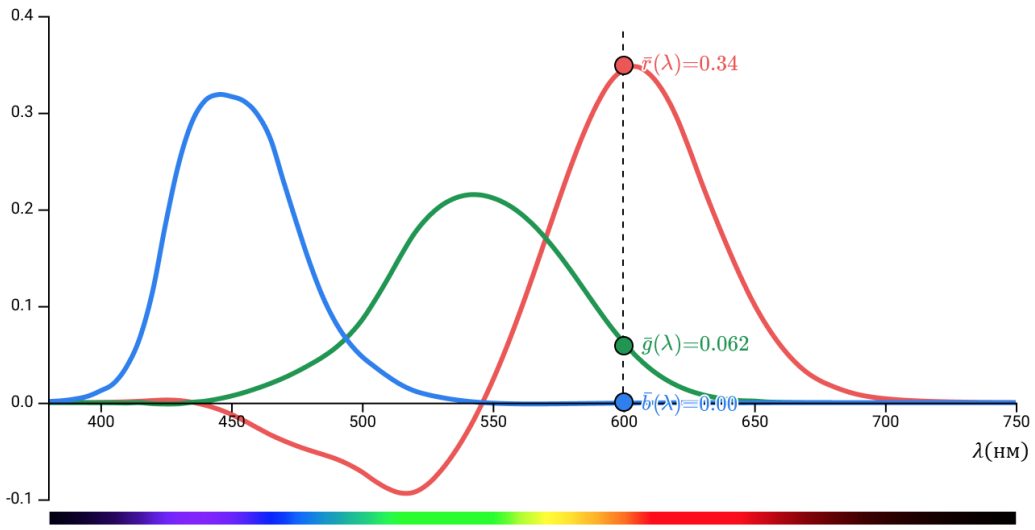


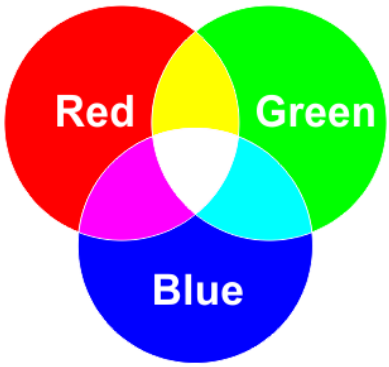
Рис. 4. Функції додавання кольорів.

Найчастіше, як основні обирають кольори моделі RGB – червоний, зелений та синій. Цей вибір є оптимальним з низки причин. Наприклад, тому що при цьому мінімізується кількість точок кольорового простору, для представлення яких використовуються від'ємні координати. Це має важливе практичне значення для відтворення кольорів. До того ж максимуми чутливості L, M та S колбочок припадають на червону, зелену та синю частини видимого спектру. Проте можливі і інші варіанти базису основних кольорів.

Деякі кольорові моделі використовуються для відтворення кольорів на екранах телевізорів та комп'ютерів або для кольорового друку на принтерах. Використовуючи явище метамерії, пристрої, що відтворюють колір, не відтворюють оригінальний спектр зображення, а лише імітують стимулюючу складову цього спектру, що в ідеалі дозволяє отримати картину, яку людина не може відрізнити від оригінальної сцени.

Модель RGB.

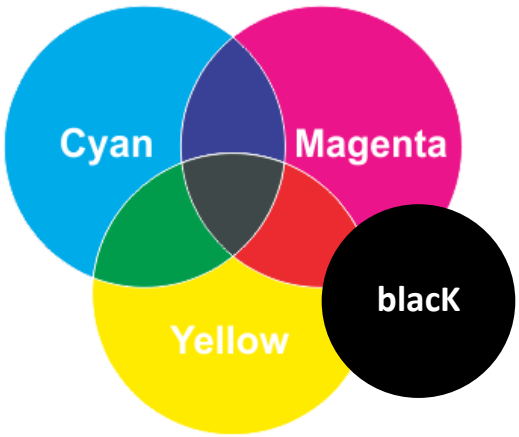
У адитивної кольорової моделі RGB білий колір виходить при максимальних значеннях всіх трьох основних кольорів (Red – червоний, Green – зелений, Blue – синій), а чорний – при їх повній відсутності. Більшість кольорів видимого спектру можуть бути отримані шляхом змішування перерахованих вище компонентів світла в різних



пропорціях. Є винятки: відтворення вторинних кольорів – чисто пурпурного, чисто жовтого та ін. – на практиці неможливо. Адитивна модель застосовується для опису кольору в пристроях виведення, заснованих на принципі випромінювання (монітори, відеосистеми, тощо). RGB-зображення є трьохканальними і містять 24 (3×8) біта інформації на кожну точку (пляму). Значення кожного компонента може лежати в межах від 0 до 255, що є математичною формою визначення величини інтенсивності.

Модель CMYK.

Для опису кольору при друку застосовується субтрактивна кольорова модель CMY (Cyan – бірюзовий або синьо-зелений, Magenta – пурпуровий або малиновий та Yellow - жовтий). Вона полягає в відніманні значення будь-якого основного кольору з білого для отримання потрібного кольору. Білий колір – колір паперу – відповідає нульовим значенням основних кольорів (відсутність друку). При проходженні через світлопроникну фарбу за рахунок абсорбції частина спектра поглинається, а інша частина відбивається і сприймається людським оком. Теоретично комбінація чистих бірюзового, пурпурового та жовтого повинна поглинати увесь спектр, утворюючи чорний колір при максимальній інтенсивності всіх складових. Однак через те що жодна фарба не є абсолютно чистою і обов'язково містить домішки, отримання справжнього чорного або сірого кольору з застосуванням CMY-моделі є проблематичним.



Виходом з даної ситуації стало додавання ще одного кольору – чорного. Літера «B» використовується для позначення синього кольору – Blue, тому чорний прийнято позначати літерою «K» – BlacK. У деяких джерелах чорний колір моделі $CMYK$ визначено як ключовий – Key, а в деяких – «K» позначає Krimson – синяво-чорний. Чотирьохкомпонентна субтрактивна модель стала відомою як $CMYK$, а застосування фарб $CMYK$ (що також іменуються тріадними) для репродукування називається чотирьохфарбовим складеним друком. $CMYK$-модель має найвужче кольорове охоплення, оскільки відтворює тільки ті

кольори, які можуть бути надруковані за допомогою тріадних фарб. Разом з тим, вона найпоширеніша – використовується і у «великій» поліграфії, і у принтерах.

Модель YUV

YUV – це кольорова модель, в якій колір представляється як три компоненти – яскравість (Y) та дві кольорорізницеві компоненти (U та V). Конвертація з цієї моделі в RGB та назад здійснюється за наступними формулами:

$$R = Y + 1.13983 \cdot V$$
$$G = Y - 0.39465 \cdot U - 0.58060 \cdot V$$
$$B = Y + 2.03211 \cdot U$$

$$Y = 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B$$
$$U = -0.14713 \cdot R - 0.28886 \cdot G + 0.436 \cdot B$$
$$V = 0.615 \cdot R - 0.51499 \cdot G - 0.10001 \cdot B$$

Модель широко використовується у телебаченні та збереженні/обробці відеоданих. Яскравісна компонента містить «чорно-біле» (у відтінках сірого) зображення, а інші дві компоненти містять інформацію для відновлення потрібного кольору. Це було зручно у часи появи кольорового телебачення для сумісності зі старими чорно-білими телевізорами. Іншим, можливо важливішим, плюсом цієї моделі є розділення інформації про колір та яскравість зображення. Справа у тому, що людське око вельми чутливе до зміни яскравості, та значно менш чутливе до зміни кольоровості. Це дозволяє передавати та зберігати інформацію про кольоровість з меншою розрядністю (глибиною кольору). Саме на цій особливості людського ока побудовані найпопулярніші на даний час алгоритми стискання зображень (зокрема *JPEG*).

Існують також інші кольорорізницеві схеми утворення кольорів, які є частинним випадком методу YUV. Так у цифровому кольоровому телебаченні використовується кольорова модель $YCbCr$, в якій Y – це так само яскравісна компонента, а дві інші відповідають за колір. При цьому Cb означає кольоровість синього, а Cr – кольоровість червоного. Характеристика принципу представлення кольору в цій кольоровій моделі співпадає з природнім способом

кольоросприйняття людським оком. Аналогічна кольорова модель використовується і в аналоговому телебаченні. Там вона позначається як $YPbPr$.

Кольоровий простір CIE XYZ

Кольоровий простір XYZ – це еталонна кольорова модель, що була задана у строгому математичному сенсі організацією *CIE* (International Commission on Illumination – Міжнародна комісія по освітленню) у 1931 році [6]. Модель XYZ є мастер-моделлю практично усіх інших кольорових моделей, що використовуються в технічних областях. Ця модель характеризується трьома відповідними кольоровими функціями (рис. 5) [7].

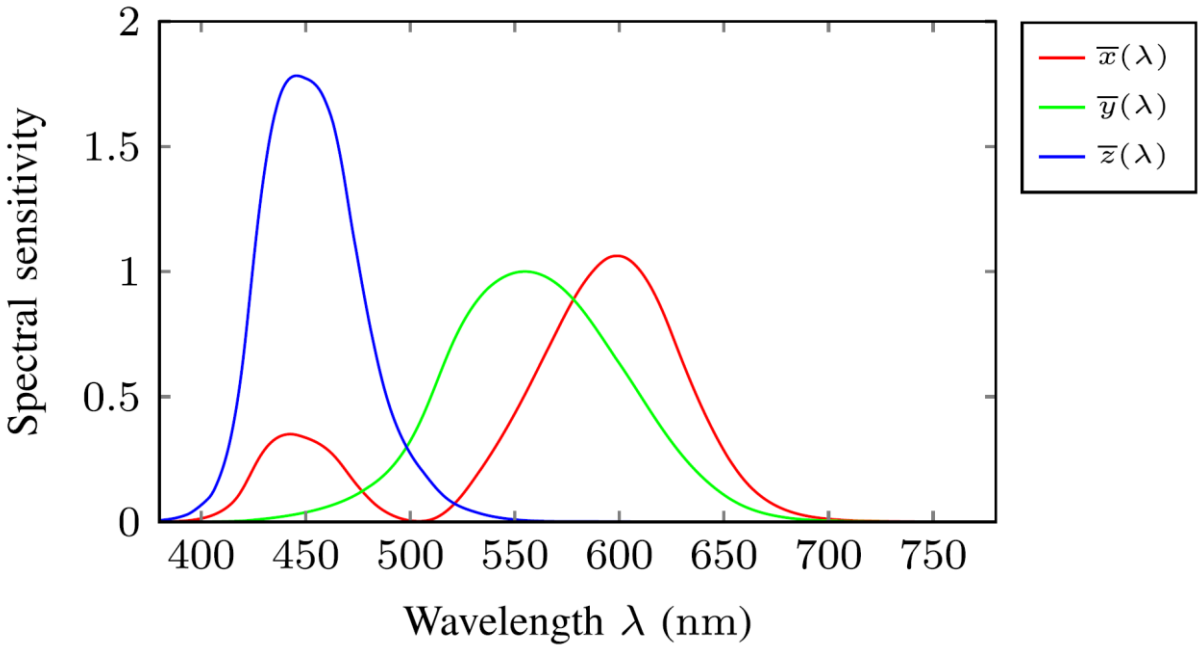


Рис. 5. Функції кольорової відповідності Стандартного колориметричного спостерігача, визначені комітетом CIE у 1931 році на діапазоні довжин хвиль від 380 *нм* до 780 *нм* (з інтервалом 5 *нм*).

Експерименти, що провели Райт та Гілд наприкінці 1920-х та початку 1930-х років, стали основою для визначення функцій кольорової відповідності. Функції кольору $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ та $\bar{z}(\lambda)$ представляють числові описи хроматичних відповідей середньої людини в межах центрального конусу з кутом у 2° всередині центральної ямки ока людини. Для визначення цих функцій у 1931 році використовувався відповідний колориметр. У 1964 році комітет *CIE* опублікував додаткові дані для 10° поля зору. При цьому у визначенні кривих моделі XYZ

закладений фактор свавільності – форма кожної кривої може бути виміряна з достатньою точністю, проте крива сумарної інтенсивності (або сума усіх трьох кривих) містить у своєму визначенні суб'єктивний момент, при якому реципієнт має визначити, чи мають два джерела світла однакову яскравість, навіть якщо ці джерела абсолютно різного кольору. Також є довільність відносного нормування кривих X, Y та Z, оскільки можна запропонувати альтернативну працюючу модель, в якій крива чутливості X має двократно підсилену амплітуду. При цьому кольоровий простір буде мати іншу форму. Криві X, Y та Z в моделях *CIE* XYZ 1931 та 1964 років були обрані таким чином, щоб площі поверхні під кожною кривою були рівними між собою. На рисунку 6 показана класична хроматична діаграма моделі XYZ з довжинами хвиль кольорів. Таку діаграму можна отримати, якщо формально зробити переріз простору XYZ площиною $X + Y + Z = const$.

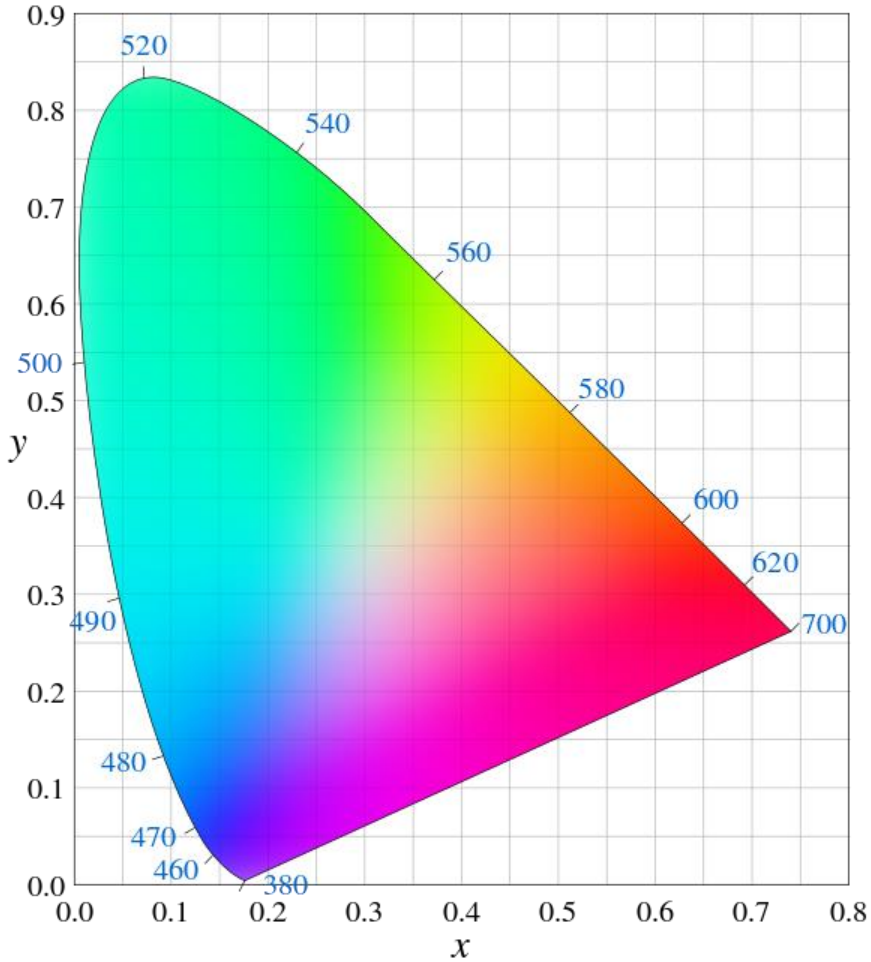


Рис. 6. Хроматична діаграма з довжинами хвиль кольорів [8].

Тоді дві лінійно-незалежні координати, що залишилися, можна записати у вигляді

$$x = X/(X + Y + Z),$$
$$y = Y/(X + Y + Z).$$

В математичному сенсі дану хроматичну діаграму можна представити як підобласть дійсної проективної площини. При цьому x та y будуть проективними координатами кольорів. Дане представлення дозволяє задавати значення кольору через світлоту Y (англ. *luminance*) та дві координати x, y. Проте світлота Y в моделі XYZ – це не теж саме, що яскравість Y в моделі YUV чи $YCbCr$.

Контрольні запитання

1. Що входить до складу зорової системи людини?
2. З яких основних частин складається людське око, які функції вони виконують?
3. Яка частина ока є головною світлозаломлюючою лінзою?
3. Як називається частина людського ока, що містить світлочутливі клітини?
4. Які види фоторецепторів містить світлочутливий шар очного яблука? Чим вони відрізняються?
5. Яка частина людського ока відповідає за гарну гостроту зору?
6. Що в оці людини називають «сліпою плямою»?
7. Що означає акомодація ока?
8. В чому суть процесу конвергенції очей?
9. Які параметри, що використовуються в колориметрії, характеризують спектральну чутливість ока?
10. Що таке кольорова модель ока? Які кольорові моделі використовують в техніці?

Глава 2. Системи відображення інформації

2.1. Основні фотометричні параметри

Проектування та створення електронних систем та засобів відображення інформації потребує врахування психофізичних можливостей органів людського зору. Реакція зорового аналізатора людини залежить в першу чергу від енергетичних характеристик та спектрального складу світлового випромінювання.

Процес кількісного вимірювання параметрів потоку випромінювання, який викликає фізіологічне відчуття яскравості, має назву *фотометрія*. Світлове випромінювання характеризується низкою фотометричних параметрів [9, 10], серед яких можна виділити наступні:

- світловий потік;
- сила світла;
- яскравість;
- освітленість;
- яскравісний контраст.

Енергетичні величини в фотометрії характеризують параметри оптичного випромінювання без урахування особливостей його впливу на той чи інший приймач випромінювання. Розглянемо детальніше визначення цих параметрів.

Світлове випромінювання, що проходить через деяку поверхню, можна характеризувати кількістю енергії, яку переносить електромагнітна хвиля через цю поверхню за одну секунду, тобто потужністю випромінювання W_λ через дану поверхню. Ця енергетична характеристика випромінювання називається *потоком світлової енергії*. Проте, зорове сприйняття залежить не тільки від потужності випромінювання, але і від спектральної чутливості ока.

Око чутливе лише до дуже вузької ділянки шкали довжин хвиль електромагнітного випромінювання – приблизно від 380 до 770 *нм*. При цьому навіть у цьому інтервалі чутливість ока до різних довжин хвиль неоднакова. Найбільшою чутливістю око володіє до довжини хвилі $\lambda_0 = 555$ *нм*, тобто до зеленого кольору. Чутливість ока в бік довших та коротших хвиль різко знижується до нуля. Тому різні джерела монохроматичного світла, що мають однакову потужність, але різний колір, представляються оку такими, ніби вони мають різну яскравість. Тобто найяскравішими здаються джерела

світла саме зеленого кольору. Наприклад, для того, щоб монохроматичне джерело червоного світла з довжиною хвилі $\lambda = 760$ *нм* здавалося таким саме за яскравістю як джерело зеленого світла, необхідно, щоб потужність червоного світла в 20 000 разів (!) перевищувала потужність зеленого світла.

Відношення потужності W_0 монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_0 = 555$ *нм* до потужності W_λ монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі λ, що викликає відчуття такої самої яскравості, як і випромінення з довжиною хвилі λ_0, називається *функцією видності*, або *коефіцієнтом видності* випромінювання з довжиною хвилі λ:

$$V_\lambda = \frac{W_0}{W_\lambda}. \tag{7}$$

Коефіцієнт видності є мірою спектральної чутливості ока. Значення цих коефіцієнтів були визначені шляхом усереднення результатів чисельних вимірювань та затверджені *CIE*. Графік спектральної чутливості ока (або *крива відносної видності*) показаний на рис. 7 [12].

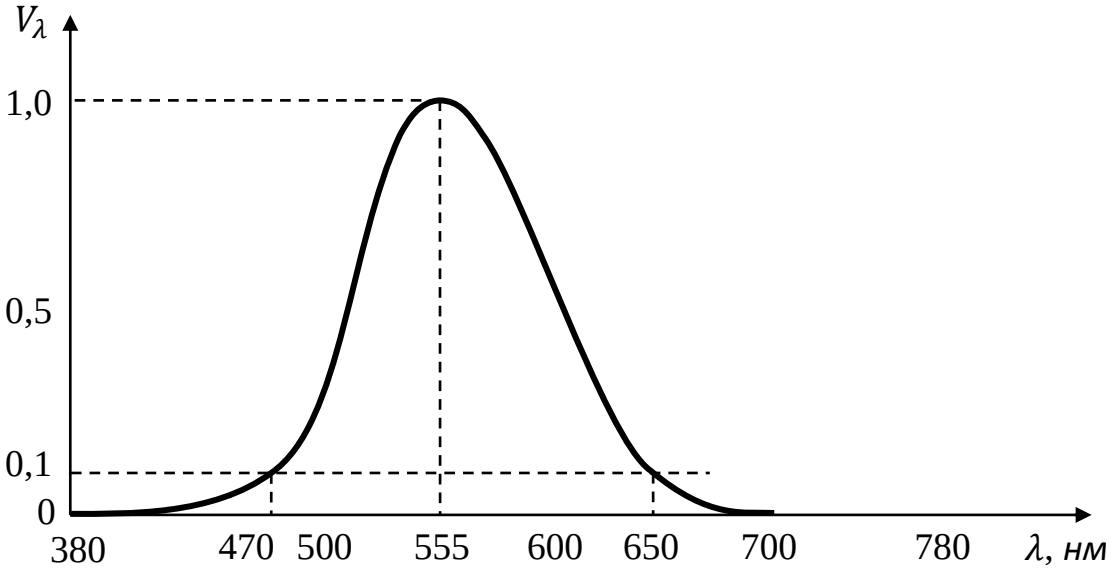


Рис. 7. Графік спектральної чутливості ока.

З врахування спектральної чутливості ока, світлове випромінювання зручно характеризувати добутком потужності випромінювання W_λ на коефіцієнт видності V_λ. Ця психофізична, або фотометрична, характеристика

монохроматичного випромінювання, що враховує спектральну чутливість ока, називається *світловим потоком* Φ_λ. Якщо випромінювання містить хвилі різної довжини, то світловий потік Φ такого немонохроматичного випромінювання складається з суми світлових потоків для кожної довжини хвилі:

$$\Phi = \sum \Phi_\lambda = \sum W_\lambda \, V_\lambda. \tag{8}$$

Таким чином, можна сказати, що світловим потоком називається потік світлової енергії, що оцінюється по зоровому відчуттю. Світловий потік виражається в *люменах* [*лм*] в Міжнародній системі одиниць (СІ). В перекладі з латинської «люмен» означає світло.

Іншим фотометричним параметром є *сила світла*. *Сила світла* I_λ характеризує просторову щільність світлового потоку Φ_λ в даному напрямку та визначається як відношення світлового потоку $d\Phi_\lambda$, який проходить всередині малого тілесного кута $d\omega$ в напрямку, що розглядається, до величини цього кута:

$$I_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{d\omega}, \tag{9}$$

де $d\omega = dA/r^2$, де dA – площа, обмежена тілесним кутом на поверхні A сфери радіуса r. Тілесний кут виражається в *стерадіанах* [*ср*]. Один *стерадіан* відповідає круговому конусу з кутом розкриття 65.6°.

Одиниця вимірювання сили світла – *кандела* [*кд*]. Вона прийнята за основну одиницю Міжнародної системи одиниць (СІ), яка визначає силу світла, що випромінюється при температурі затвердіння платини (2042.5°К) елементом поверхні еталона чорного тіла площею 1/60 см^2 в напрямку перпендикулярному до цього елемента. В перекладі з латинської «*Candela*» означає свіча. Раніше силу світла вимірювали саме в *свічах* [*св*] (1 *св* = 1 *кд*).

Отже, одиниця світлового потоку (*люмен*) може бути визначена як світловий потік від точкового джерела силою в 1 *кд* всередині тілесного кута в 1 *ср*.

Поняття сили світла вводиться за допомогою уявлення про точкове джерело світла. Джерело світла вважається точковим, якщо його розмір є малим у порівнянні з відстанню до місця спостереження і якщо він випромінює світло рівномірно за всіма напрямками. Якщо світловий потік від точкового джерела є

рівномірним, тобто джерело є ізотропним, то сила світла є однаковою у будь-якому напрямку і дорівнює

$$I_\lambda = \frac{\Phi_\lambda}{4\pi}. \tag{10}$$

Якщо джерело світла не є ізотропним, то сила світла залежить від напрямку. Ця залежність характеризується діаграмою направленості випромінювача. Плоска дифузно випромінююча поверхня має діаграму направленості у вигляді кола (рис. 8). Таку випромінюючу поверхню називають *випромінювачем Ламберта*.

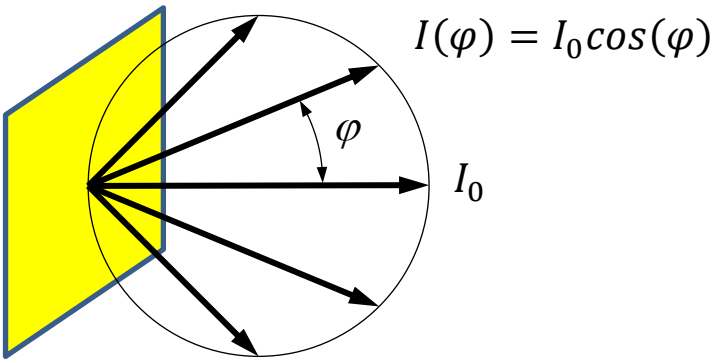


Рис. 8. Випромінювач Ламберта.

Для порівняння на рисунку 9 також показано діаграму направленості звичайної лампи розжарювання.

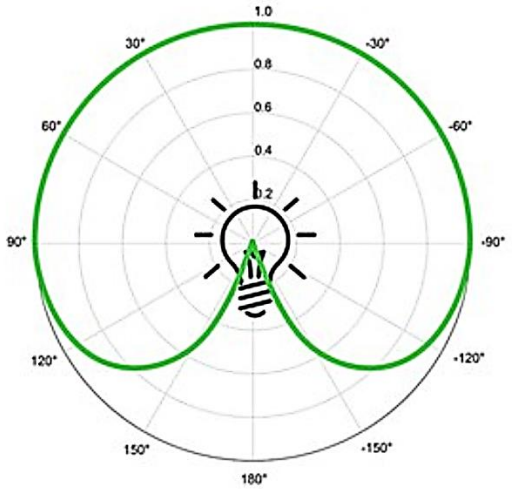


Рис. 9. Діаграма направленості звичайної лампи розжарювання.

Поняття сили світла застосовується лише для точкових джерел світла. Для протяжних джерел сила світла вже не може слугувати вичерпною характеристикою. Дійсно, з двох джерел, що випромінюють світло однакової сили, але мають різні розміри (площі), менше джерело буде здаватися яскравішим, оскільки дає більшу силу світла з одиниці площі. Тому для протяжних джерел світла вводиться додаткова характеристика, яка називається *яскравістю*.

Яскравість L_λ характеризує випромінення поверхні площею dA, що світиться в даному напрямку. Поняття яскравості застосовують до будь-яких протяжних джерел, що мають скінчені розміри. Кількісно яскравість дорівнює відношенню світлового потоку, що проходить в напрямку, що розглядається, в межах малого тілесного кута через ділянку поверхні, до добутку величини тілесного кута, площі ділянки та косинуса кута α між напрямком, що розглядається, та нормаллю до ділянки. У відповідності з даним визначенням можна записати вираз для яскравості у вигляді:

$$L_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{d\omega \cdot dA \cdot cos(\alpha)} = \frac{I_\lambda}{dA \cdot cos(\alpha)}. \quad (11)$$

Тобто *яскравість* – це відношення сили світла, що випромінюється або відбивається поверхнею в даному напрямку, до проекції одиничної площі цього елементу на площину, що перпендикулярна даному напрямку. Одиниця яскравості [*кд*/*м*^{2}] – це яскравість такої поверхні, квадратний метр якої дає в напрямку, перпендикулярному цій поверхні, силу світла в 1 *кд*. У таблиці 2 наведені значення яскравості для деяких джерел світла.

Таблиця 2. Яскравість деяких джерел світла [11].

Джерело світла	**Яскравість, *кд*/*м*^{2}**
Екран ТВ трубки	30 ÷ 1000
Світлодіод	10 ÷ 400
Люмінесцентна лампа	5000 ÷ 10000
Нитка вакуумної лампи розжарювання	$2 \cdot 10^6$
Нитка газонаповненої лампи розжарювання	$8 \cdot 10^6 \div 20 \cdot 10^6$

Сила світла, яскравість та світловий потік є характеристиками *активних* (*первинних*) джерел світла. Об'єкти, які можна бачити завдяки освітленню світлом первинних джерел, називають *пасивними* (*вторинними*) джерелами світла. Їх основною характеристикою є *освітленість*, яка вводиться для кількісної оцінки освітлення поверхні. *Освітленість* E_λ визначається світловим потоком $d\Phi_\lambda$, який падає перпендикулярно на одиницю площі поверхні dA, що освітлюється, з використанням співвідношення:

$$E_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{dA}. \tag{12}$$

Одиницею освітленості є *люкс* (*лк*). Освітленість в 1 *лк* створюється світловим потоком в 1 *лм*, що рівномірно освітлює поверхню площею 1 $м^2$. Для того, щоб надати наочне уявлення про одиниці освітленості, можна зазначити, що мінімальна освітленість, яка необхідна для читання, дорівнює 20 *лк*, освітленість кімнати у ясний сонячний день дорівнює біля 100 *лк*, а освітленість, яка створюється прямими сонячними променями на відкритій місцевості, дорівнює біля 10^5 *лк* [11].

Також вторинні джерела світла характеризуються іншим важливим параметром, а саме *коефіцієнтом відбиття*

$$\rho_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda_{\text{відб}}}}{\Phi_\lambda}, \tag{13}$$

який показує яка частина $\Phi_{\lambda_{\text{відб}}}$ падаючого світлового потоку Φ_λ відбивається від об'єкту, що освітлюється. При цьому яскравість такого вторинного джерела світла буде дорівнювати:

$$L_{\lambda_{\text{відб}}} = \frac{L_\lambda \rho_\lambda}{\pi}. \tag{14}$$

Значення коефіцієнта відбиття для деяких матеріалів:

- сніг, крейда, гіпс 0.93;
- біла бумага 0.6…0.8;
- біла тканина (батист, шовк) 0.62…0.65;
- пісок 0.25;

- віконне скло (1-2 мм) 0.08;
- чорне сукно 0.01…0.02;
- чорний бархат 0.004…0.01.

Ще одним важливим фотометричним параметром, який характеризує об'єкти, що освітлюються, або об'єкти, що самі випромінюють світло, є *яскравісний контраст*. Цей фотометричний параметр визначає співвідношення яскравості об'єкту та тла, що дає змогу оцінити ступінь відмінності між двома яскравостями, що сприймаються. В залежності від того, що є яскравішим – об'єкт чи тло, розрізняють *прямий* та *обернений* яскравісний контраст.

Для позитивного зображення (темне зображення на світлому тлі або, іншими словами, об'єкт темніший за тло) задається *прямий яскравісний контраст*:

$$K_{\text{пр}} = \frac{L_{\lambda_{\text{т}}} - L_{\lambda_{\text{о}}}}{L_{\lambda_{\text{т}}}}, \tag{15}$$

де $L_{\lambda_{\text{т}}}$ та $L_{\lambda_{\text{о}}}$ – яскравість тла та об'єкту, відповідно.

Для негативного зображення (світлий об'єкт на темному тлі або, іншими словами, об'єкт яскравіший за тло) задається *обернений яскравісний контраст*:

$$K_{\text{обер}} = \frac{L_{\lambda_{\text{о}}} - L_{\lambda_{\text{т}}}}{L_{\lambda_{\text{о}}}}. \tag{16}$$

Також буває зручним користуватися поняттям *контрастності* K_k, що є відношенням яскравостей об'єкту (тла) та тла (об'єкту):

$$\begin{aligned} K_k &= \frac{L_{\lambda_{\text{о}}}}{L_{\lambda_{\text{т}}}} \quad \text{при} \quad L_{\lambda_{\text{о}}} > L_{\lambda_{\text{т}}}; \\ K_k &= \frac{L_{\lambda_{\text{т}}}}{L_{\lambda_{\text{о}}}} \quad \text{при} \quad L_{\lambda_{\text{о}}} < L_{\lambda_{\text{т}}}. \end{aligned} \tag{17}$$

Зв'язок між яскравісним контрастом та контрастністю визначається наступним виразом:

$$K_{\text{пр(обер)}} = 1 - \frac{1}{K_k}. \tag{18}$$

2.2. Психофізичні характеристики сприйняття зорової інформації людиною

В системах відображення інформація представляється у формі, придатній для сприйняття людиною. Тому створення таких систем потребує врахування психологічних та фізіологічних особливостей людини. Якість сприйняття зорової інформації людиною визначається наступними характеристиками:

- енергетичними;
- просторовими;
- часовими;
- інформаційними.

Енергетичні характеристики.

До енергетичних характеристик відносять: діапазон яскравостей, що сприймаються, *пороговий контраст*, а також відносна *видність*, яка, як було показано вище, визначає спектральну чутливість ока або кольоровідчуття.

Усі параметри зорового сприйняття людини пов'язані між собою таким чином, що зменшення числового значення одного параметра потребує збільшення значень інших параметрів, щоб їх загальний «енергетичний» добуток був однаковим. Проте, змінювати значення параметрів можна лише в певних межах, оскільки кожен параметр має граничні значення, за межами яких, його вже не можна компенсувати ніяким збільшенням інших параметрів. Наприклад, зниження яскравості зображення нижче певного порога вже не може бути скомпенсоване збільшенням розмірів цього зображення або необмеженим часом його спостереження.

Основною характеристикою зорового аналізатора людини є чутливість. Мінімальна (порогова) величина яскравості світлової плями, яка виявляється оком на чорному тлі, називається *нижньою абсолютною межею чутливості*. Відповідно *верхня абсолютна межа чутливості* характеризується больовими відчуттями. Діапазон яскравостей, що сприймає людина складає 10^{12}. Проте, зорова система людини не здатна сприймати одразу увесь цей діапазон. Яскравість світла, яку може сприймати око людини знаходиться в межах від 10^{-7} *кд*/*м*^{2} для ока, що повністю адаптоване до темряви, до 10^5 *кд*/*м*^{2} для ока, що повністю адаптоване до світла. Абсолютна чутливість ока людини є нижчою, ніж чутливість окремих фоторецепторів на сітчатці. При цьому палочковий

апарат володіє більшою чутливістю, ніж колбочковий [13]. Палочковий апарат починає працювати на найнижчих рівнях яскравості, колбочковий – на яскравостях порядку декількох кандел на квадратний метр. При яскравості 10 *кд*/*м*^{2} палочковий апарат засліплюється, оскільки швидкість розпаду родопсину при таких яскравостях збільшується настільки, що його відновлення починає відставати. Як наслідок, концентрація родопсину швидко падає і відбувається повний розклад зорового пурпуру. При яскравостях більших за 10 *кд*/*м*^{2} працює тільки колбочковий апарат.

Людина здатна помічати інформаційні сигнали лише тоді, коли їх параметри перевищують пороги чутливості ока. *Абсолютним порогом світлової чутливості* є мінімальна яскравість сигналу, яка може бути виявлена. Цей поріг знаходиться в межах $9.971 \div 9.571$ *кд*/*м*^{2}.

Чутливість ока не залишається постійною при зміні світлового подразника. Важливою властивістю ока є *адаптація* – зміна чутливості ока в залежності від дії на нього світлових подразників. Адаптація дозволяє оберігати зір людини від надмірного подразнення при великих рівнях яскравості та дозволяє розрізняти предмети при слабких рівнях яскравості. В поле зору людини можуть одночасно потрапляти предмети з різною яскравістю. Середня (з суми яскравостей, що сприймаються людиною одночасно) інтегральна яскравість інформаційних об'єктів та інших джерел світла (первинних та вторинних) створює *яскравість адаптації* L_{λ_a}. Найкращими для роботи вважаються такі умови, коли рівень яскравості адаптації знаходиться в межах від декількох десятків до декількох сотен *кд*/*м*^{2} ($L_{\lambda_a} = 10\ldots1000$ *кд*/*м*^{2}).

Мінімальний приріст яскравості $\Delta L_{\lambda_{\min}}$, який розрізнює око при даній яскравості адаптації L_{λ_a}, називається *диференційним порогом чутливості*, а відносний приріст яскравості, що розрізняється оком, – *пороговим контрастом*

$$K_{\text{пор}} = \frac{\Delta L_{\lambda_{\min}}}{L_{\lambda_a}}. \tag{19}$$

Значення $K_{\text{пор}}$ залежить від рівня яскравості адаптації. В робочому діапазоні яскравостей адаптації від 10 до 1000 *кд*/*м*^{2} можна прийняти $K_{\text{пор}} \approx 0.02\ldots0.05$. Суб'єктивна оцінка яскравості інформаційного сигналу, що сприймається, залежить від яскравості оточуючого тла. Для впевненого сприймати зображення на певному тлі необхідно, щоб прямий або обернений контраст ($K_{\text{пр}}$ або $K_{\text{обер}}$) не менше ніж у 10 разів перевищував пороговий контраст. Звідси

рекомендується обирати діапазон контрасту в межах $K_{\text{пр(обер)}} = 0.65 \div 0.95$ [12].

Найнижча світлова чутливість характеризується гранично допустимою яскравістю джерела, яка викликає ефект осліплення, тобто порушення роботи зорового аналізатора. Абсолютно засліплююча яскравість відповідає $225\,000\ кд/м^2$. Ефект осліплення може наступити також і у випадку, якщо в полі зору ока знаходяться сигнали різної інтенсивності. При цьому сигнали з більшою інтенсивністю можуть викликати засліпленість ока. Засліплююча яскравість визначається розміром поверхні, що світиться, та яскравістю сигналу, а також рівнем адаптації ока. Вона розраховується за наступною формулою [12]:

$$L_{\text{засл}} = L_{\lambda_a} + \frac{840}{\sqrt[4]{\beta}} \sqrt[3]{L}\,, \tag{20}$$

де β – тілесний кут, під яким спостерігається джерело сигналу.

Перехід людини у темряву викликає збільшення світлової чутливості. Перехід людини з темряви в зону дії великих рівнів яскравості викликає зменшення світлової чутливості. Це називається *темновою адаптацією*. Чим менше різниця яскравостей при переході зі світла у темряву, тим швидше (крива 1, рис. 10) йде зростання світлової чутливості, яка встановлюється на відносно постійному рівні через 40 – 60 хвилин. У випадку значної різниці яскравостей початкова світлова чутливість ока буде незначною і встановлюється на постійному рівні тільки через 60 – 80 хвилин (крива 2, рис. 10).

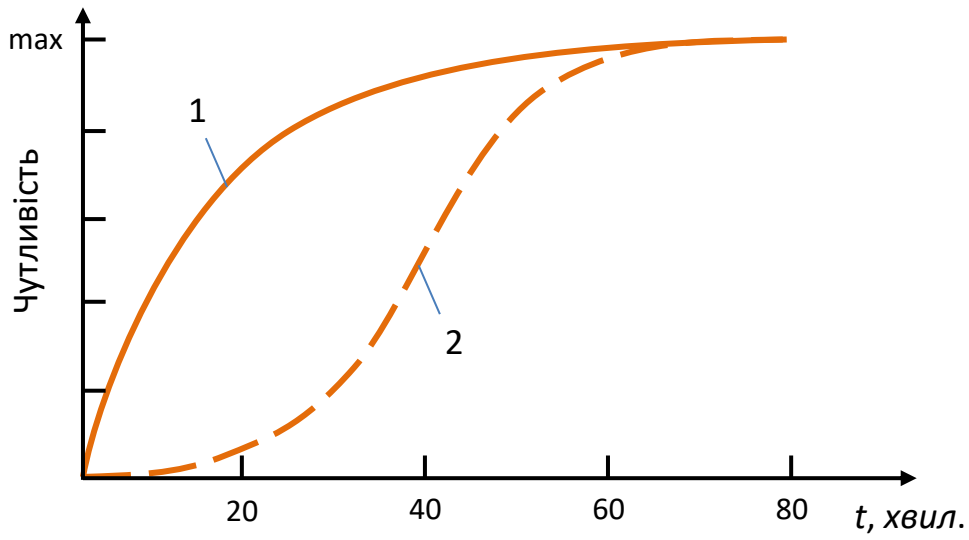


Рис. 10. Зміна світлової чутливості ока людини при темновій адаптації.

Перехід людини з темряви в область дії великих рівнів яскравостей викликає зменшення світлової чутливості (світлова адаптація), яка встановлюється на відносно постійному рівні через 5 – 10 хвилин (рис. 11). Чим вище рівень яскравості, тим нижче значення буде мати світлова чутливість.

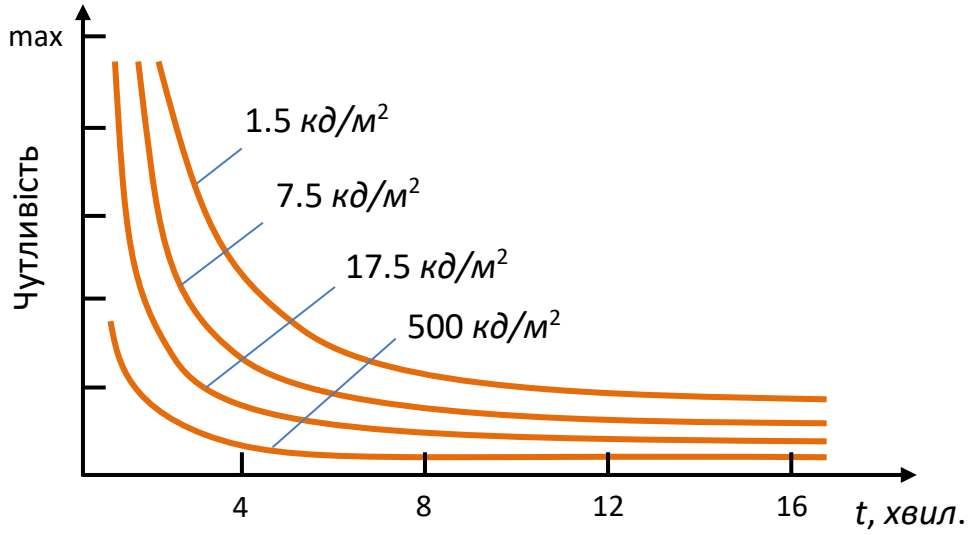


Рис. 11. Зміна світлової чутливості ока людини при світловій адаптації.

Якщо відношення яскравостей при різкий зміні зовнішнього освітлення знаходиться в межах $10 \div 30$ разів, то час адаптації не перевищує 1 с. А при відношенні яскравостей $3 \div 5$ разів – зорова система постійно адаптована на поточні значення яскравостей. Оскільки сигнали, що потрапляють в око, мають різну яскравість, то яскравість адаптації є близькою до середньої яскравості у полі зору. Величина яскравості адаптації в полі зору визначає вид освітлення:

- нічне ($L_{\lambda_a} \leq 0.01$ *кд/м*²);
- сутінки ($L_{\lambda_a} = 0.01 \div 10$ *кд/м*²);
- денне ($L_{\lambda_a} \geq 10$ *кд/м*²).

Цим яскравостям відповідає нічний, сутінковий та денний зір.

Розглянуті характеристики світлової чутливості зорового аналізатору людини відносяться до роботи паличкового апарату, що забезпечує сприйняття ахроматичного світла. Диференційний поріг кольорової чутливості є дуже малим. Мінімальна різниця довжин хвиль, яку людина може розрізнити, залежить від яскравості та кутових розмірів об’єктів. При великих розмірах об’єктів, що знаходяться поряд, око здатне розрізняти до 10^7 світлових відтінків. Розрізнення погіршується із зменшенням розмірів, а при розмірах менших за $10'$

колір випромінювання перестає помічатися оком. При середніх розмірах об'єктів та яскравостях вище 10 *кд*/*м*^{2} кількість відтінків кольору, що розрізнюється, може досягати декілька сотень [14]. Збільшення та зменшення яскравості знижує чутливість до кольорових тонів.

Варто відмітити, що при суттєвому зменшенні яскравості змінюється також чутливість ока до різних довжин хвиль. Зокрема, крива відносної видності, показана на рисунку 7, зміщується ліворуч в бік короткохвильового випромінювання, що призводить до збільшення чутливості ока до синіх променів та її різкому зменшенню до червоних – *явище Пуркіньє* [13].

Просторові характеристики.

Просторові характеристики ока визначаються розмірами предметів, що сприймаються, та їх розташуванням у просторі. До цих характеристик відносять *роздільну здатність* та *поле зору*.

Роздільна здатність або гострота зору характеризується мінімальним кутом, під яким дві рівновіддалені точки можна бачити окремо. Цей кут називається *порогом гостроти зору* α_λ. Кут зору, що дорівнює 1', відповідає одиниці гостроти зору і вважається границею роздільної здатності ока людини для нормального зору. Гострота зору залежить від рівня освітленості, відстані до предмета спостереження та його положення відносно спостерігача.

Розміри предметів виражають у кутових величинах. Для кількісної оцінки кутового розміру предмета можна скористатися рисунком 12.

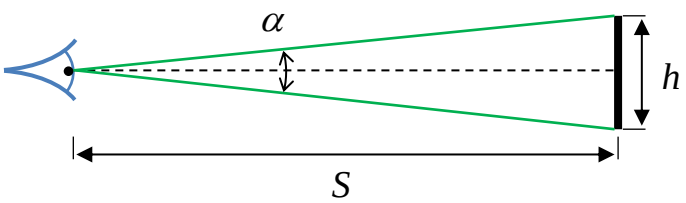


Рис. 12. Визначення кутових розмірів предмета.

Згідно з рисунком 12 кутовий розмір предмету спостереження пов'язаний з його лінійними розмірами співвідношенням:

$$h = 2S \cdot \mathrm{tg}(\alpha/2)\,, \tag{21}$$

де h та α – лінійний та кутовий розміри предмету, S – відстань від ока до предмету.

Кут зору, під яким деяку інформаційну модель можна надійно ідентифікувати, визначається гостротою зору. Для розрахунків обирають рекомендоване значення $\alpha_{\lambda_\mathrm{p}}$, яке дорівнює 2′ – 3′. Відповідний кут зору $\alpha_{\lambda_\mathrm{e}}$, необхідний для надійної ідентифікації інформаційної моделі, буде також залежати від складності цієї моделі, яка оцінюється кількістю дискретних елементів K_e, що мінімально розрізняються і на які можна розкласти інформаційну модель:

$$\alpha_{\lambda_\mathrm{e}} \cong K_\mathrm{e} \cdot \alpha_{\lambda_\mathrm{p}} \,. \tag{22}$$

Наприклад, для синтезу букв та цифр потрібно $7 \div 9$ дискретних елементів по висоті. Як наслідок, для них $\alpha_{\lambda_\mathrm{e}} = 14' \ldots 27'$. Роздільна здатність падає по мірі віддалення предмету від ока вздовж його осі.

Поле зору визначається при фіксованому погляді як область простору, я межах якого можлива проекція зображення на сітчатку ока. Воно залежить від можливостей оптичної системи ока, площі та характеру розподілу фоторецепторів, виступаючих частин обличчя.

Все поле зору можна умовно розбити на 3 зони:

- *зона центрального зору* (розмір приблизно $4 \ldots 7°$), відповідає жовтій плямі сітчастої оболонки ока, де можливе найбільш чітке розрізнення деталей.
- *зона ясного зору* обмежена кутовими розмірами $16 \ldots 20°$ по горизонталі та $12 \ldots 15°$ по вертикалі, де при нерухомому оці можна розпізнати предмет без розрізнення дрібних деталей. У відповідності з цим в телебаченні обрані рекомендовані відстані до спостерігача $S \cong (3 \ldots 6)D$, де D – діагональ екрану, і формат інформаційних полів $K_\text{ф} = 4 : 3$.
- *зона периферійного зору* ($75 \ldots 90°$), де предмети виявляються, але не упізнаються. Зона периферійного зору відіграє важливу роль при орієнтації в навколишньому світі.

Сприйняття буквено-цифрової інформації при фіксованому положенні спостерігача та зображення передбачає рух ока по рядку тексту, що дозволяє збільшити кутовий розмір інформаційного поля по горизонталі до $50°$. Формат інформаційних полів буквено-цифрових систем відображення інформації часто обирають рівним $K_\text{ф} = 5 : 3$.

Кут між перпендикуляром, опущеним з центру ока на поверхню спостереження, та лінією, що з'єднує центр ока з точкою спостереження, називається *кутом спостереження*. З його збільшенням гострота зору падає через те, що випромінення більшості індикаторів має направлений характер, максимум інтенсивності якого співпадає з нормаллю до площини випромінювання. Максимальне значення кута спостереження, при якому забезпечується зчитування інформації з індикатора, називають *кутом обзору*.

Часові характеристики.

Часові характеристики зорового аналізатора людини визначаються часом, що необхідний для виникнення зорового відчуття при певних умовах. До групи цих характеристик відносяться: латентний (прихований) період зорової реакції, тривалість інерції відчуття, критична частота мерехтінь, час адаптації та тривалість інформаційного пошуку.

Латентний період зорової реакції – це інтервал часу між моментом подачі сигналу та початком реакції у відповідь (виникнення відчуття). Цей час залежить від інтенсивності сигналу (чим сильніше подразник, тим реакція на нього коротша), функціонального стану аналізатора, віку та інших індивідуальних особливостей людини. У середньому для більшості людей латентний період зорової реакції складає $160 \div 200$ *мс*.

Критична частота мерехтінь $f_{\text{КЧМ}}$ – це мінімальна частота, при якій око перестає сприймати мерехтіння зображення, що переривчасто світиться. Критична частота мерехтінь збільшується із збільшенням яскравості та кутових розмірів елементів зображення, що мерехтять. Для зображень з яскравістю до декількох сотень *кд*/*м*^{2} критичну частоту мерехтінь приймають рівною приблизно 50 *Гц*.

Середня (уявна) яскравість елемента, що мерехтить, $L_{\lambda_{\text{уяв}}}$, яка сприймається оком, визначається *законом Тальбота*:

$$L_{\lambda_{\text{уяв}}} = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} L_\lambda(t)dt\ , \tag{23}$$

де $L_\lambda(t)$ – закон зміни яскравості в інтервалі часу світіння елементу $(t_2 - t_1)$, T – період повторення мерехтіння елементу. При $f > f_{\text{КЧМ}}$ сигнали зливаються у рівне світло, що не мерехтить.

Залежність $f_{\text{КЧМ}}$ від яскравості визначається виразом виду:

$$f_{\text{КЧМ}} = 9{,}6 \cdot lg(10^{-4}L) + 65(\text{Гц}). \tag{24}$$

При значеннях яскравості $L = 30, 110, 250, 350$ *кд/м*^{2} критична частота мерехтінь відповідно дорівнює $f_{\text{КЧМ}} = 40, 45, 47, 49$ *Гц*.

Час адаптації – це час, необхідний для самонастроювання чутливості зорового аналізатора при зміні яскравості об'єкту спостереження. Величина часу темнової адаптації (перехід від світла до темряви) може складати десятки хвилин, а світлової (перехід від темряви до світла) – одиниці хвилин. Після припинення дії світлового подразника око продовжує бачити джерело світла по інерції і уявна яскравість $L_{\lambda_{\text{уяв}}}(t)$ спадає по експоненційному закону:

$$L_{\lambda_{\text{уяв}}}(t) = L_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \tag{25}$$

де L_0 – яскравість у момент припинення дії подразнювача, τ – постійна часу інерції.

Завдяки інерції здійснюється накопичення слабких сигналів (світлових потоків), усереднення світлових впливів, необхідних для виділення корисних сигналів з шуму. Із збільшенням інерції зростає роздільна здатність ока, а із збільшенням яскравості зменшується час інерції та гострота зору. Інерція зору дорівнює $0{,}1 \div 0{,}2$ *с* для центрального зору та $0{,}1 \div 0{,}32$ *с* для периферійного зору. Якщо виникає необхідність у послідовному реагуванні спостерігача на сигнали, що дискретно з'являються, то період їх слідування повинен бути більшим за час збереження відчуття.

Інформаційні характеристики.

Інформаційні характеристики систем відображення безпосередньо пов'язані з пропускною здатністю людини, тобто з кількістю інформації, яку наші органи зору здатні сприйняти в одиницю часу. Пропускна здатність людини є функцією багатьох факторів: типу задачі, ступеня участі людини у роботі системи, об'єму інформації, що виводиться, довжини алфавіту, яскравості символів, їх розміру, контрастності і т. і. Наприклад, для випадку зчитування інформації при рівноймовірному надходженні будь-яких символів пропускна здатність людини визначається виразом:

$$C = \frac{(n\ log_2 N)}{T}, \tag{26}$$

де T – час відображення, n – кількість правильно розпізнаних символів, N – довжина алфавіту (кількість символів для системи відображення інформації).

Пропускна здатність людини лише в окремих випадках може бути виражена в уніфікованих одиницях, наприклад, у бітах. Так пропускна здатність зорової системи при розпізнаванні предметів дорівнює 50 – 70 *біт/с*, букв та цифр – 55 *біт/с* [15]. Пропускна здатність людини залежить від тривалості зчитування інформації. Із збільшенням тривалості зчитування пропускна здатність зменшується.

При одночасному наданні системою відображення різноманітної інформації людина спочатку здійснює пошук потрібних їй елементів. Витрати часу, які для цього потрібні, можуть бути визначені величиною, що дорівнює добутку математичного очікування кількості кроків у пошуку (кількості рухів очей) на середню тривалість зорової фіксації, яка для різних умов пошуку наведена в таблиці 3.

Таблиця 3. Тривалість зорової фіксації при пошуку інформації.

Задачі	**Середня тривалість фіксації у секундах**
Пошук простих геометричних фігур	0,18 – 0,20
Пошук букв та цифр в таблицях	0,30
Пошук умовних знаків	0,30
Ознайомлення з ситуацією, позначеною умовними знаками	0,64
Виявлення змін у знайомій ситуації, позначеній умовними знаками	0,55
Підрахунок умовних знаків	0,52

При розробці систем відображення інформації потрібно узгоджувати потік інформації, що генерує така система, з потоком інформації, що може бути оброблений людиною.

2.3. Ергономічні характеристики систем відображення інформації

Ергономічні вимоги, що висуваються до систем відображення інформації, визначаються в першу чергу особливостями зорової системи людини. Ці вимоги спрямовані на досягнення у зображенні, що створюється, максимальної ефективності зорового сприйняття інформації. При цьому ефективність сприйняття буде залежати від наступних чинників:

- типу, форми та розмірів інформаційних символів;
- рівня яскравості та контрастності між зображенням та тлом;
- кольору знаків, що відтворюються;
- рівня зовнішнього освітлення;
- величини кутів огляду та відстані до екрану.

Оцінка яскравісного режиму включає нормування рівня яскравості та її перепадів у полі зору спостерігача для досягнення потрібних показників ефективності обробки зорової інформації. Оптимальною вважається така яскравість, при якій забезпечується максимальна чутливість та роздільна здатність. Яскравість тла (для прямого контрасту), що забезпечує найвищу гостроту зору (найкраще розрізнення), скрадає 10^4 *кд*/*м*^{2} [16]. При розрізненні складних об’єктів найвища гострота зору досягається при яскравості тла в 3000 *кд*/м^2. Зі зменшенням яскравості гострота зору змінюється несуттєво порівняно з її найбільшими значеннями (для яскравості 200 *кд*/*м*^{2} гострота зору складає 90% від максимального значення). Різке падіння гостроти зору має місце при яскравості менше 10 *кд*/*м*^{2}. В той же час діапазон яскравостей, встановлений на зображенні в полі зору спостерігача, буде оптимальним лише при умові, що перепад яскравостей буде близький до рівня адаптації. Встановлено, що максимально допустимий перепад яскравостей у полі зору не повинен перевищувати 100:1. Оптимальними ж є співвідношення: 20:1 – між джерелом світла та найближчим оточенням, а також 40:1 – між найсвітлішою та найтемнішою ділянками зображення.

Контрастність зображення знижується при зовнішньому освітленні тим сильніше, чим нижчою є яскравість екрану і чим більшою є яскравість, що створюється освітленням. Контраст між системою відображення інформації та її безпосереднім оточенням не повинен перевищувати співвідношення 3:1.

Ефективність сприйняття інформації в значній ступені залежить від системи візуального кодування, що використовується. Під візуальним кодуванням інформації розуміють операцію ототожнення умовних знаків (символів, сигналів) з тим чи іншим видом інформації. Вибір оптимального коду пов'язаний із забезпеченням максимальної швидкості та надійності прийому та обробки інформації людиною, тобто з досягненням максимальної ефективності виконання операцій зорового пошуку, виявлення, розрізнення, ідентифікації та розпізнавання сигналів.

Різні кількісні та якісні характеристики об'єктів спостереження кодуються у різний спосіб: умовними знаками, буквами, цифрами, яскравістю і т. п. В задачах зорового пошуку перевагу має кольорове кодування. Найменший час забирає пошук об'єктів у полі зору саме за кольором. Найбільший час витрачається при пошуку об'єктів за яскравістю та за розміром. При використанні як кодових категорій форми, розміру, кольору та просторової орієнтації фігур найбільшу ефективність здійснення пошуку забезпечують категорії кольору та форми. Найменшу точність має ідентифікація по розміру.

В системах відображення інформації для оцінки якості цього відображення використовують інтегральну характеристику, яка має назву «читаність» [17]. Дана характеристика оцінюється за швидкістю та точністю розрізнення, розпізнавання та інтерпретації показників. Читаність елементів системи відображення залежить від правильної розробки окремих деталей. Так, найважливішим є вибір алфавіту символів, що використовуються як коди: геометричних фігур, букв, цифр, знаків. Форма символів впливає на швидкість та точність розпізнавання. Легше та швидше розпізнаються цифри, що формуються прямими лініями. Наприклад, у рядку цифр: 1, 4, 7, 5, 3, 0, 8, 6, 9, порядок цифр відповідає легкості їх розпізнавання.

На практиці застосовується достатньо велика кількість типів шрифтів цифр. Розглянемо деякі з них. Наприклад, Бергером був запропонований шрифт цифр, утворений прямокутними елементами (рис. 13*а*). За начертанням найкращими вважаються цифри Макворта, в яких нахилені лінії в знаках розташовані під кутом 45° (рис. 13*б*). З усіх шрифтів найкращими для розпізнавання є цифри Слейта (рис. 13*в*).

(*а*)

(*б*)

(*в*)

Рис. 13. Типи шрифтів цифр: *а*) Бергера; *б*) Макворта; *в*) Слейта.

Товщина ліній символів залежить від освітленості та контрастності символів з тлом. При відтворенні білих цифр на чорному тлі товщину ліній рекомендовано брати як 1/10 від висоти цифр. При відтворенні чорних цифр на білому тлі товщину ліній слід обирати рівною 1/6 від висоти цифр. Ширина цифр має складати 2/3 від висоти. Високі та вузькі цифри розпізнаються краще при слабкому освітленні. Розміри знаків повинні відповідати відстані до спостерігача.

В залежності від відстані S, на якій має сприйматися інформаційне повідомлення, висоту h знаків, згідно з (21), слід обирати на основі наступної нерівності:

$$h \geq 2S \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}. \tag{27}$$

Час зчитування інформації не є постійним і залежить від різних чинників: кутових розмірів символів, світлових характеристик, складності знаків, що

відображаються. Чим складніше символ, тим більше часу потрібно для його розпізнання. Алфавіт знаків, що відображаються, можна розділити на прості, середньої складності та складні (рис. 14). Точніше розпізнаються знаки, у яких контур має різки перепади. Для оптимального розпізнання знаків простої складності рекомендують обирати їх кутовий розмір рівним $\alpha = 18' \pm 1'$; знаків середньої складності – рівним $\alpha = 21'$; складних знаків – рівним $\alpha = 35'$. При використанні знаків, що мають розміри менше допустимих, час сприйняття та кількість помилок збільшуються.

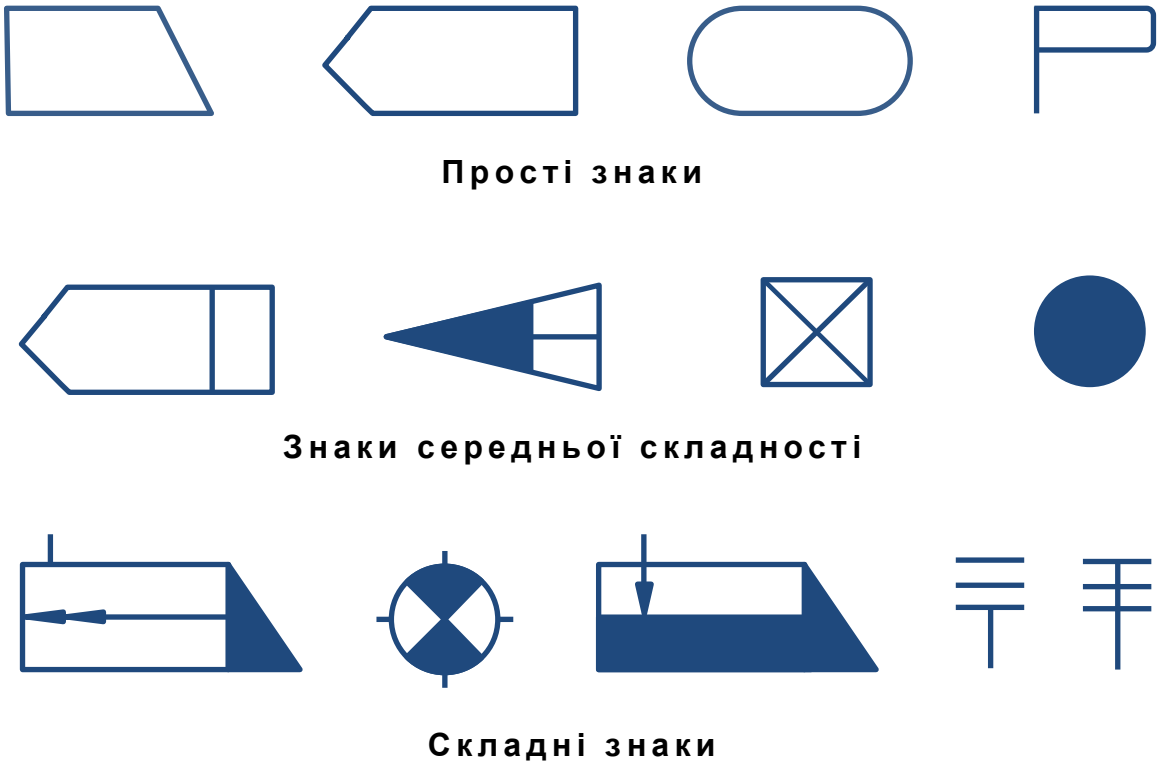


Рис. 14. Класифікація знаків за ступенями складності [17].

На зорове розпізнавання елементів суттєвий вплив має контраст. Зображення з прямим контрастом створюють кращі умови для роботи ока (вище гострота зору, менше втомленість). При незначній різниці у яскравості знаку та тла знак сприймається у вигляді плями. Це можна ототожнити зі стадією, що зветься *виявленням*. Коли можна розрізнити форму знаків, їх контури, то така стадія вже називається *розрізненням*. Якщо ж різниця у яскравості знаку та тла така, що око розрізняє суттєві ознаки, то це є стадія *розпізнавання*. Пороговому

значенню різниці у яскравостях тла ($L_{\text{т}}$) та знаку ($L_{\text{зн}}$) відповідає пороговий контраст:

$$K_{\text{пор}} = \frac{(L_{\text{зн}} - L_{\text{т}})_{\text{пор}}}{L_{\text{т}}} = \frac{\Delta L_{\text{пор}}}{L_{\text{т}}}. \quad (28)$$

Якщо контраст знаку та тла менше порогового значення, то такий знак не буде видимим. Величина порогового контрасту для знаків з кутовими розмірами 60’ та яскравістю 80 – 120 *кд/м*^{2} складає 0,015 – 0,020. Контраст до 20% відповідає малому контрасту, до 50% – середньому, а більше 50% –високому. Для знаків з розмірами $35' - 40'$ величину контрасту рекомендовано обирати від 0,65 до 0,8, для знаків менших розмірів – від 0,7 до 0,9. Оптимальною величиною є величина контрасту 0,85 – 0.9, що рекомендується при довготривалій роботі з сигналами. При невеликій тривалості роботи, коли потрібна найбільша чіткість зображення, використовують контраст більше ніж 0.9. При зменшенні розмірів знаку контраст треба збільшувати. Підвищити контраст можна шляхом створення штучного тла або окремим підсвічуванням тла.

2.4. Інформаційна модель та формування її елементів

У будь-яких засобах відображення інформація представляється *інформаційною моделлю* – сукупністю сигналів, що організовані за відповідною системою правил та дозволяють відображати стан об’єкту керування. Фактично відбувається представлення деякого фізичного стану однієї системи (об’єкту керування) за допомогою фізичного стану іншої системи, яка реалізує інформаційну модель. Цей процес прийнято називати кодуванням. Таким чином, в інформаційній моделі в закодованій формі представляється сутність реальних процесів, явищ, об’єктів. При цьому інформаційна модель може відображати лише найбільш суттєві параметри об’єкту, що є важливими для заданої задачі керування об’єктом. Це означає, що один і той самий об’єкт в залежності від задачі може бути представлений різними інформаційними моделями. Наприклад, для авіапасажира суттєвою буде інформація про пункт призначення, номер рейсу, час відправлення та прибуття літака в пункт

призначення. В той же час для пілота цього літака суттєвою буде інформація про показники приладів, які характеризують роботу систем літака.

Кодування в інформаційній моделі здійснюється за допомогою певної кількості елементів, якими можуть виступати букви, цифри, умовні знаки та символи, геометричні фігури, лінії, точки тощо. Набір усіх таких елементів, що використовує інформаційна модель, утворює *алфавіт* інформаційної моделі. До складу алфавіту можуть входити такі ознаки інформаційної моделі як градації яскравості, розмір елементів, їх орієнтація, колір і т. п. Загальна кількість елементів алфавіту називається *основою коду алфавіту* N_a. Для забезпечення нормального сприйняття інформації основа коду алфавіту, що містить усі кодові ознаки, не має перевищувати межу 200 – 400.

Якщо є потреба представити елементи алфавіту інформаційної моделі двійковим кодом, то кількість розрядів такого коду n_a визначається з умови:

$$n_a \geq [\log_2 N_a] \,, \tag{29}$$

де квадратні дужки означає округлення до найближчого більшого цілого числа. Зазвичай в інформаційних моделях окремо кодують алфавіти знаків та їх ознак. В даному випадку кількість розрядів коду визначається з виразу:

$$n_a = n_{аз} + n_{ао} = [\log_2 N_{аз}] + [\log_2 N_{ао}] \,, \tag{30}$$

де $N_{аз}$ та $N_{ао}$ – основи кодів алфавіту знаків та їх ознак відповідно, а $n_{аз}$ та $n_{ао}$ – розрядності двійкових кодів знаків та ознак відповідно. Таким чином:

$$N_a = N_{аз} \cdot N_{ао} \,. \tag{31}$$

Як приклад визначимо мінімальну кількість розрядів двійкового коду, що необхідна для кодування 33 букв українського алфавіту та 10 арабських цифр, які можуть відображатися у 10 кольорах. Таким чином, маємо $N_{аз} = 43$, $N_{ао} = 10$. Користуючись співвідношенням (30), отримаємо:

$$n_a = [\log_2 43] + [\log_2 10] = [5{,}43] + [3{,}32] = 6 + 4 = 10 \,.$$

Отже, нам потрібно мінімум 10 розрядів двійкового коду для кодування такої інформаційної моделі.

Інформаційна модель формується у просторі як правило на площині. Та частина простору, яку займає інформаційна модель, називається інформаційним полем. Це поле характеризується шириною W та висотою H (рис. 15). Таким чином, можна визначити формат інформаційного поля K_F, як відношення ширини інформаційного поля до його висоти:

$$K_F = W : H . \tag{32}$$

В сучасних моніторах, дисплеях або телевізорах $K_F = 16 : 9$ або $K_F = 16 : 10$.

За алфавітом, який використовується, виділяють наступні основні типи інформаційних моделей:

- буквено-цифрові;
- графічні;
- напівтонові;
- комбіновані.

Однією з важливих характеристик інформаційної моделі є *інформаційна ємність*, яка визначає кількість інформації, що може бути одночасно представлена на інформаційному полі. Для буквено-цифрових інформаційних моделей вона задається загальною кількістю знаків у інформаційному полі $N_з$, що визначається у свою чергу кількістю знаків у текстовому рядку $N_{зр}$ та кількістю текстових рядків $N_р$ як $N_з = N_{зр} \cdot N_р$. При цьому інформаційну ємність можна виразити у бітах:

$$V = N_з \cdot \log_2 N_a . \tag{33}$$

Що стосується графічних інформаційних моделей, то їх інформаційна ємність оцінюється як сумарна кількість точок, що можуть бути відображені.

Буквено-цифрові інформаційні моделі як елемент інформаційної моделі можуть використовувати букви, цифри, умовні знаки (символи) і т. п. При цьому властивості об’єкту чи процесу представляються буквеним текстом, цифровими комбінаціями, формулами, таблицями тощо. При побудові буквено-цифрової моделі усе інформаційне поле розбивається на окремі частини, кожна з яких

необхідна та достатня для відображення одного знаку N_i у вигляді букви, цифри чи символу (рис. 15). Така частина поля називається *знакомісцем*. Для відображення буквено-цифрової інформації рекомендується дотримуватись наступних співвідношень між шириною знакомісця $w_з$, його висотою $h_з$, проміжком між знаками в рядку d та проміжками між текстовими рядками r (рис. 15) [11]:

$$\begin{aligned} w_з &= (2/3 \div 4/5)\, h_з; \\ d &= (0.3 \div 0.6) w_з; \\ r &= (0.9 \div 1.0) h_з. \end{aligned} \tag{34}$$

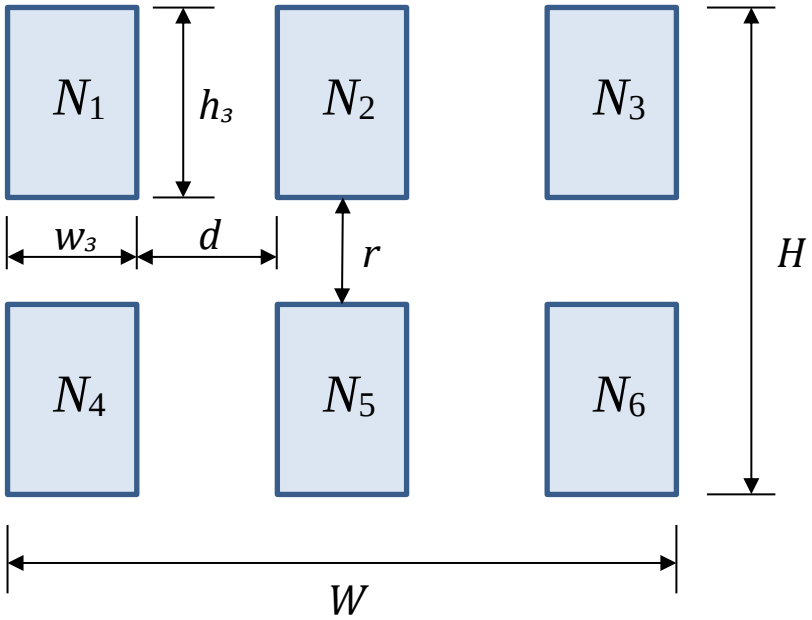


Рис. 15. Інформаційне поле буквено-цифрової моделі.

Найпростіший елемент інформаційної моделі, який може бути реалізований обраним типом індикатора, називають *елементом відображення*. Елемент відображення характеризується формою, геометричними розмірами, яскравістю, часом післясвітіння, кольором тощо. Елементами відображення можуть бути, наприклад, сегменти цифр електронних годинників, точкові елементи інформаційно-довідникових табло і т.п.

У відповідності з тими елементами відображення, які використовуються, усі способи формування знаків можна розділити на дві основні групи:

1) *Знакомоделюючий спосіб*. Цей спосіб формування знаків характеризується цілісним представленням знаку. При цьому форма елементу відображення співпадає з контуром знаку. Приклад елементу з таким способом відображення є газорозрядний індикатор, який показано на рисунку 16, де всередині індикатора є сукупність катодів, виконаних у формі десяткових цифр. В такому індикаторі при відображенні певної цифри світиться лише той катод, через який протікає струм.

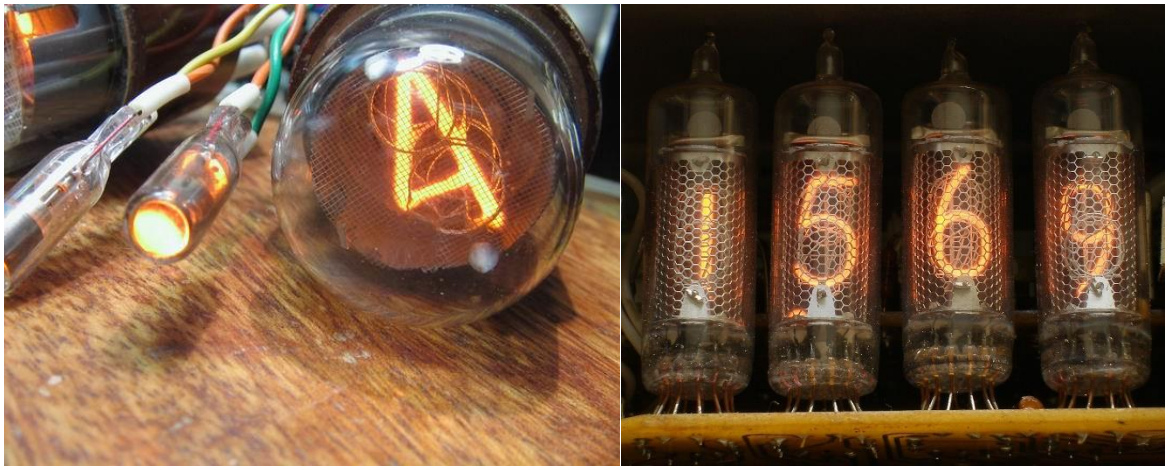


Рис. 16. Індикатори, що використовують знакомоделюючий спосіб відображення.

2) *Знакосинтезуючий спосіб*. Цей спосіб формування знаків характеризується тим, що знаки формуються з простіших елементів відображення. На рисунку 17 показаний синтез цифр з сегментів. Набір сегментів у знакомісці складає деяку узагальнену фігуру – *полігграму*.

Рис. 17. Індикатор, що синтезує цифри з сегментів.

Чим більше сегментів в поліграмі, тим більший набір знаків можна за допомогою неї синтезувати (рис. 18). Так з 7-сегментної поліграми (рис. 18*а*) можна синтезувати усі арабськи цифри та деякі букви (наприклад, H, P, E та інші). А за допомогою 16-сегментної поліграми (рис. 18*в*) можна синтезувати усі букви латинського алфавіту.

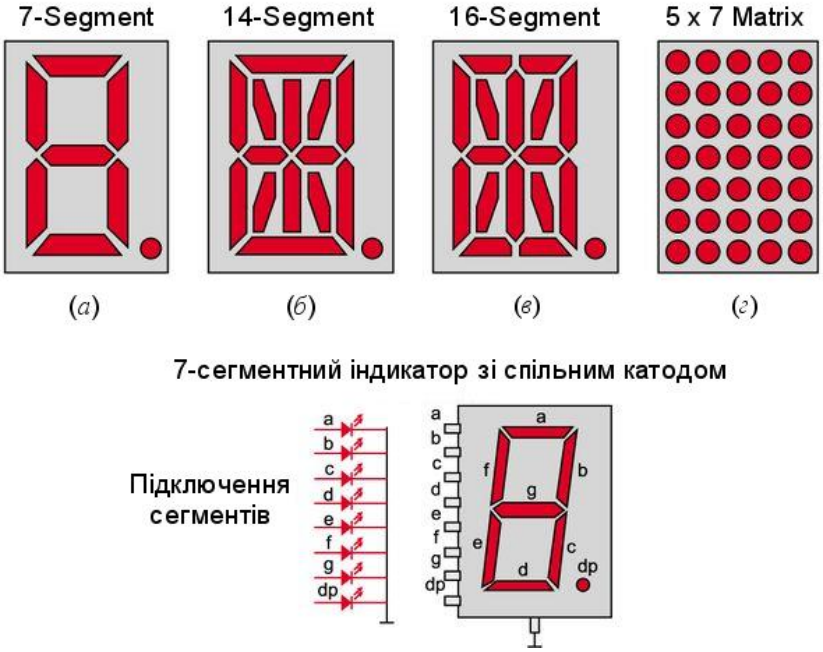


Рис. 18. Поліграми 7-ми, 14-ти та 16-сегментних світлодіодних індикаторів та світлодіодної матриці 5x7.

Також знаки можна синтезувати з точкових елементів відображення, розміри яких набагато менші за розміри знаків, що синтезуються. В межах знакомісця точкові елементи відображення утворюють матрицю знаку. Кількість елементів відображення в матриці знаків обирають, виходячи з вимог безпомилкової та швидкої ідентифікації усіх знаків алфавіту. Так, наприклад, матриця 5x7, що складається з 5 стовбців та 7 рядків (рис. 18*г*), є практично мінімально прийнятною для синтезу букв латинського алфавіту та цифр. Для синтезу тільки арабських цифр розмірність матриці можна зменшити до 3x5.

Як показують психофізіологічні дослідження, при розпізнаванні символів, що синтезовані за допомогою матриці 5x7, можливі помилки. Так, наприклад, часто плутають B та 8, 5 та S, Q та O тощо. Уникати таких помилок дозволяє збільшення кількості точок матриці. Наприклад, матриця 7x9 суттєво покращує точність розпізнавання. В той же час подальше збільшення кількості точок,

наприклад, до 9x13 вже не призводить до істотного покращення сприйняття символу.

Якщо елементи відображення складаються з окремих конструктивних частин, як то електричні лампи розжарювання, світлодіоди, катоди газорозрядних ламп, що виконуються у формі цифри або сегменту, то такі елементи відображення називають *дискретними*. В той же час існують такі елементи відображення, що входять в знак, які генеруються безпосередньо в процесі відображення, наприклад, при формуванні знаків електронним променем в електронно-променевих приладах. Синтез знаків з отриманих у такий спосіб елементів називають *знакогенеруючим способом формування знаків*.

Графічні інформаційні моделі представляють кресленнями, діаграмами, схемами (структурними, функціональними, монтажними) тощо. Основними елементами графічної інформаційної моделі є лінії, точки, двовимірні області.

Найуніверсальнішими елементами відображення, з яких формуються елементи графічної інформаційної моделі є точкові елементи відображення. Кожний точковий елемент відображення, що входить в модель, що формується, має бути заданий координатами (x, y), що визначають його положення на інформаційному полі розміром $W \times H$ (рис. 19).

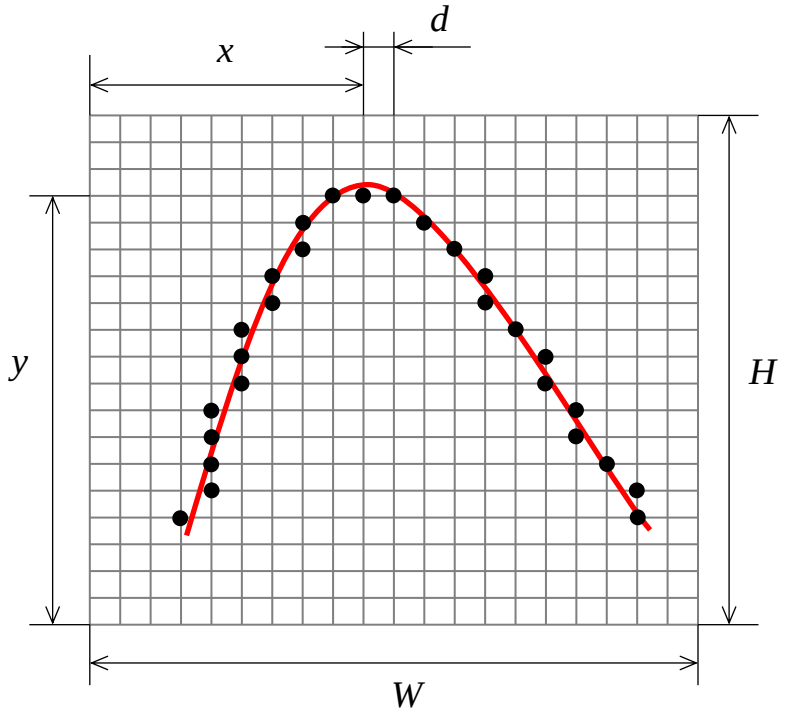


Рис. 19. Синтез графічної інформаційної моделі з точкових елементів.

На рис. 19 показана крива, що синтезована з точкових елементів відображення. Синтез з окремих елементів призводить до дискретизації зображення. Абсолютне значення похибки дискретизації лежить в межах $\pm 1/2\, d$, де d – крок дискретизації, що визначається як відстань між центрами точкового елементу відображення. Як наслідок, для зменшення похибки дискретизації необхідно зменшувати величину d, а отже і розмір самого елементу відображення.

Око не помічає дискретного характеру зображення, якщо кутовий розмір елементу відображення є близьким до граничного кута, під яким людина розрізняє дві окремі точки. Зменшення розмірів елементу відображення при збереженні розмірів інформаційного поля призводить до збільшення загальної кількості елементів відображення та відповідно до технічного ускладнення засобів відображення інформації.

Для спрощення графічних засобів відображення інформації при синтезі графічної інформаційної моделі часто використовують укрупнені графічні елементи, які називаються *графеми*. В залежності від характеру графічної інформаційної моделі як графеми можуть бути використані: відрізки прямої, дуги різної кривизни, двовимірні фігури тощо. Синтез графічної інформаційної моделі за допомогою графем полягає у розбитті моделі на окремі фрагменти з наступним підбором такого графічного елементу, що найточніше апроксимує виділений фрагмент. Зокрема, при використанні як графем відрізків прямих отримана графічна інформаційна модель представляється кусочно-лінійною апроксимацією.

З використанням напівтонових інформаційних моделей з широким діапазоном градацій яскравості можна забезпечити візуальне зменшення різких переходів між дискретними елементами, що створює наочний, картинний характер зображень, що формуються.

2.5. Фізичні принципи відображення інформації та види індикаторів

Розрізняють два основних класи індикаторних елементів: *світловипромінюючі* (випромінюють світло) та *світломодулюючі* (модулюють світло, тобто змінюють параметри середовища, через яке він проходить). У

відповідності з цим можна класифікувати основні типи елементів, що відрізняються за фізичними принципами, які використовуються, наступним чином:

1) Елементи світловипромінюючого типу:
   а) електронно-променеві індикатори;
   б) електролюмінісцентні індикатори;
   в) світловипромінюючі діоди;
   г) газорозрядні індикатори;
   д) електричні лампочки.
2) Елементи модулюючого типу:
   а) рідкокристалічні індикатори;
   б) електрохімічні індикатори;
   в) електромеханічні та електромагнітні індикатори.

За способом формування зображень пристрої відображення інформації поділяються на дискретні (дискретно-знакові, дискретно-матричні) та неперервні (растрові, функціональні). В дискретних способах формування дискретний знак (буква, цифра тощо) або елемент відображення (точка, сегмент) формуються окремим індикаторним елементом. Більшість пристроїв такого виду реалізується у формі плоских панелей на базі електролюмінісценції, газового розряду, ламп розжарювання, рідко-кристалічних індикаторів, електромеханічних індикаторів тощо. Інші два способи формування зображень відносяться, головним чином, до індикаторів на базі електронно-променевих трубок. Тут можливо будувати зображення як шляхом довільного відхилення променя (функціональний спосіб), так і шляхом растрового відхилення, але з підсвіткою променя в певні моменти часу синхронно з розгорткою.

Розглянемо стисло фізичні принципи роботи основних типів індикаторних елементів (детальніше можна подивитись у [18-24]).

Електронно-променеві індикатори або, як їх частіше називають, електронно-променеві трубки (ЕПТ) [19], відомі вже доволі давно та використовувались спочатку в осцилографах, радіолокації, телебаченні, а пізніше і як пристрої відображення вводу і виводу даних в ЕОМ. Фізичний принцип роботи ЕПТ оснований на створенні керованого сфокусованого пучка електронів, що діє на вкритий люмінофором екран, що викликає світіння його окремих ділянок. ЕПТ бувають монохромні та кольорові. Також вони поділяються на:

- ЕПТ з електростатичним фокусуванням та електростатичним відхиленням електронного променя;
- ЕПТ з магнітним фокусуванням та магнітним відхиленням електронного променя;
- ЕПТ з електростатичним фокусуванням та магнітним відхиленням електронного променя (комбіновані).

Будова електронно-променевої трубки з магнітним керуванням показано на рисунку 20. Керуючи роботою електродів-модуляторів цієї трубки, сигнал змінює інтенсивність електронного променя, який, у свою чергу, під впливом магнітного поля відхиляючої системи потрапляє на внутрішню поверхню екрана трубки, що має спеціальне покриття у вигляді шару люмінофора. Світіння екрану є наслідком передачі енергії від прискорених електронів променя електронам, що пов'язані з кристалом люмінофора, в результаті чого останні переходять у збурений стан. При їх поверненні до нормального стану надлишкова енергія виділяється як світло. Це фізичне явище називається *катодною люмінісценцією*.

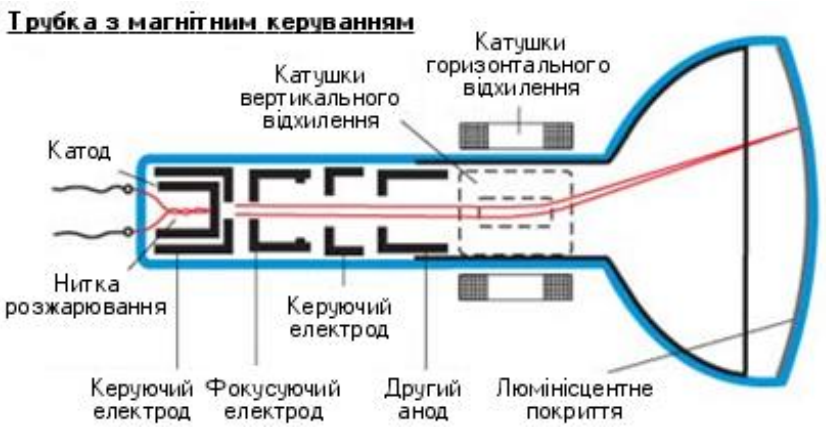


Рис. 20. Будова електронно-променевої трубки.

Системи відображення на основі ЕПТ можуть бути знакомодулюючими або знакогенеруючими. Знакомодулюючі системи в площині екрану формують електронний промінь, переріз якого має конфігурацію обраного знаку. Такі системи не отримали широкого практичного застосування. У більшості випадків використовують знакогенеруючі системи, в яких переріз сфокусованого на поверхні екрану електронного пучка приймає форму кола малого діаметра. В кожен момент часу це коло займає певне положення на екрані. Повне зображення формується послідовно у часі з відтворенням усіх його елементів.

Таке послідовне поелементне відтворення зображення у часі називається *розгорткою*. Зображення, отримане у процесі розгортки, називається *кадром*.

За принципом організації розгортки зображення методи формування знаків діляться на *растрові* та *функціональні*. При растрових методах закон розгортки, а отже й траєкторія переміщення променя по екрану, не залежить від інформаційної моделі, що формується. Формування зображення здійснюється модуляцією яскравості променя при його проходженні відповідних елементів інформаційної моделі. При функціональних методах траєкторія переміщення променя співпадає з контурами елементів інформаційної моделі, що відображаються, тобто закон розгортки в цьому випадку визначається інформацією, що відображається.

Електромеханічні та електромагнітні індикатори зустрічаються з елементами відображення барабанного, щиткового (пелюсткового) та кулькового типів (рис. 21).

Барабанний індикатор

Пелюстковий індикатор

Кульковий індикатор

Рис. 21. Електромеханічні та електромагнітні індикатори.

Наприклад, в таких індикаторах можуть використовуватись пластмасові кульки з вбудованим постійним магнітом, половинки яких мають різний колір. Кульки розташовані в отворах панелі табло, трішки виступаючі з них назовні. В початковому стані усі кульки повернуті до спостерігача тою половинкою, яка пофарбована у колір панелі. При надходженні керуючого сигналу вмикається електромагніт, що змушує кульку повернутися до спостерігача іншим боком, колір якого відрізняється від кольору панелі. Сукупність усіх повернутих кульок у знакомісці при цьому формує необхідний знак. Замість кульок можна також використати пелюстки-шторки. В початковому стані шторки повернуті до спостерігача таким чином, щоб їх колір співпадав з кольором панелі табло. Коли подається керуючий сигнал, вмикається електромагніт, і шторка повертається іншим боком, колір якого відрізняється від кольору панелі. Подібні інформаційні системи можуть розміщуватись у потрібних місцях в аеропортах, залізничних вокзалах тощо.

Газорозрядні індикатори формуються з елементів, що представляють собою заповнену інертним газом, ізольовану від зовнішнього середовища комірку, всередині якої на близькій відстані один від одного розташовуються два електроди (катод і анод). Після пробою (150…200 В) у катода утворюється світловипромінююча зона, що покриває його поверхню. Форма катода може бути різною: мати вигляд знаку, що відображається, геометричної фігури, набору лінійних або точкових елементів тощо (рис. 22). Такі індикатори споживають невелику потужність, потребують порівняно невисокої напруги для роботи, є компактними та механічно надійними. Крім того, мають здатність до відображення напівтонових та кольорових зображень.

Рис. 22. Газорозрядні індикатори.

Область застосування газорозрядних індикаторів значно розширилась з появою матричних панелей (плазмових). Вони мають вигляд плоского екрану, на якому будь-яке зображення створюється великою кількістю світловипромінюючих газорозрядних елементів, утворених на перетині горизонтальних (рядки) та вертикальних (стовбці) електродів-шин. Світіння виникає при подачі на відповідну пару електродів, що перетинаються, робочої напруги запалювання. Подаючи по черзі імпульси запалювання на потрібні стовбці та рядки, можна здійснювати розгортку, формуючи (при достатній частоті розгортки) стійке зображення знаку, фігури або зображення. Детальніше про газорозрядні індикатори можна прочитати також у [20].

Електролюмінесцентний індикатор є плоским конденсатором, однією з обкладок якого є суцільний прозорий електрод, а іншою — електрично розділені металеві площадки. Між електродами розміщується тонкоплівкова структура із суміші люмінесцентного порошку, змішаного з епоксидною смолою або керамікою. Люмінофор є фосфором на основі сульфіду цинку (ZnS) або селену, легованого спеціальними активаторами. Структура електролюмінісцентного індикатора та його зовнішній вигляд показані на рис. 23.

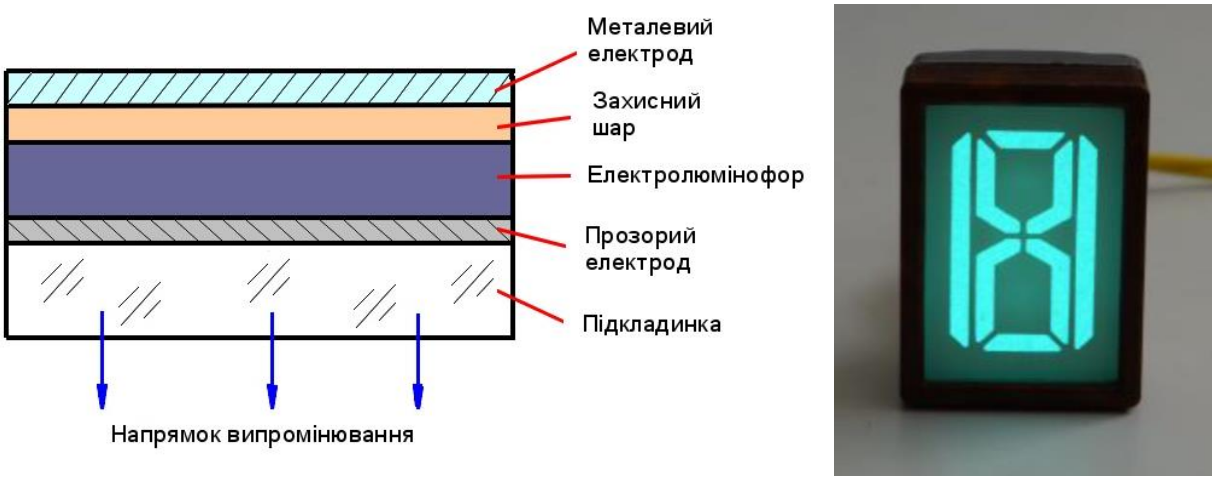


Рис. 23. Електролюмінісцентний індикатор та його структура.

Спектр світла, яке випромінюється електролюмінесцентним джерелом, лежить у видимій частині випромінювання (400-600 нм). Значною мірою спектр випромінювання визначається типом активатора, що застосовується. Так, добавка до люмінофору міді викликає блакитне світіння (максимум випромінювання знаходиться на довжині хвилі 455 нм), міді та алюмінію — зелене світіння (510 нм) і т. д. Електролюмінесцентні індикатори бувають порошкового та плівкового типу.

Індикатори порошкового типу збуджуються постійним струмом, а плівкового типу – змінним струмом. Елемент електролюмінісцентного індикатора постійного струму є шаром порошку люмінофора між двома металевими електродами, один з яких напівпрозорий. До електродів підводиться збуджуюча напруга близько 100 В. Елемент змінного струму не має гальванічного зв'язку плівки люмінофора з електродами, які ізольовані від плівки шарами діелектрика. Напруга збудження становить тут 150...250 В, причому світіння люмінофора виникає з порога в 100 В і крутість характеристики яскравості підвищується зі зростанням напруги, тобто. змінюючи напругу можна змінювати яскравість світіння елементів. На основі електролюмінісцентних індикаторів можна створити плоский екран, що за характеристиками не поступається ЕПТ.

Світловипромінюючі діоди – це твердотільні напівпровідникові пристрої, що працюють на p-n переходах та мають ту особливість, що за своїми характеристиками є сумісними з транзисторною та мікросхемною елементною базою. Вони мають малу інерційність (менше 50 нс) та невеликі габарити. Надійність світлодіодів значно перевершує надійність як індикаторних ламп розжарювання, так і газорозрядних індикаторних ламп. Світлодіоди складніше розбити, тому що їх корпус зазвичай виконаний з прозорої пластмаси, а їх вага незначна. Коефіцієнт корисної дії світлодіодів, особливо сучасних, значно перевищує аналогічний показник для індикаторних ламп. Основна причина – це принципова відсутність теплового випромінювання. Електричний струм безпосередньо перетворюється на світлове випромінювання. Ці особливості сприяють їхньому застосуванню в обчислювальній техніці як засобів індикації стану вузлів. Виготовляється світлодіодні індикатори як дискретні елементи, як монолітні полосково-сегментні прилади, а також у вигляді невеликих матриць з X – Y адресацією (рис. 24).

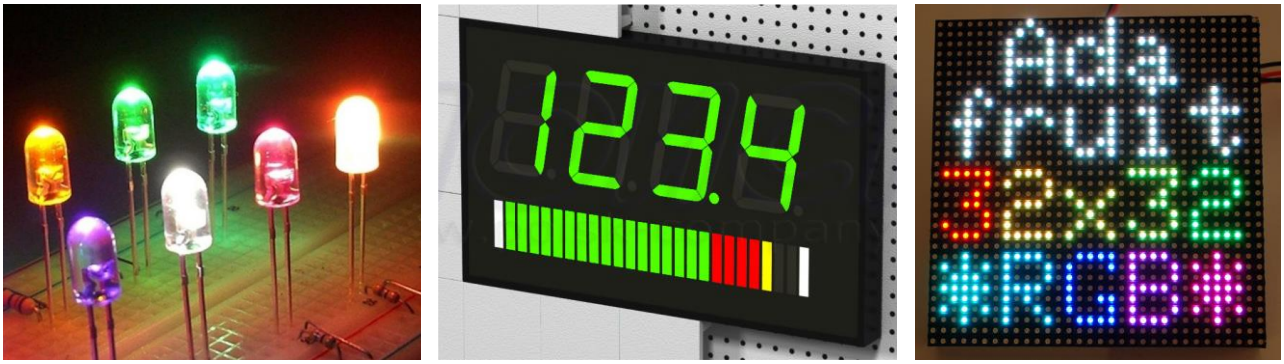


Рис. 24. Світлодіодні індикаторні елементи.

Перші напівпровідникові світловипромінюючі прилади (на основі карбіду кремнію – SiC) були створені радянським ученим О.В. Лосєвим у 1922р [21]. Фізичні принципи роботи таких випромінювачів основані на інжекційній електролюмінісценції, що виникає при проходженні струму через прямозміщений p-n перехід. В таблиці 4 наведені характеристики деяких матеріалів, що здатні створювати випромінювання в області видимого спектра. Для створення світлодіодних індикаторів широко застосовується твердий розчин потрійного з'єднання $GaAs_{1-x}P_x$. Змінюючи значення x можна регулювати ширину забороненої зони у напівпровіднику та отримувати матеріали з різним кольором світіння.

Таблиця 4. Деякі матеріали, що використовують при виробництві світлодіодів [22].

Матеріал	**Колір випромінювання**	**Довжина хвилі, *нм***
GaAs:Si	Інфрачервоний	850
$GaAs_{0.60}P_{0.40}$ або **$Al_{0.25}Ga_{0.75}As$**	Червоний	670-690
$GaAs_{0.35}P_{0.65}$ або **$Al_{0.07}Ga_{0.43}In_{0.50}P$**	Помаранчевий	630
$GaAs_{0.15}P_{0.85}$ або **$Al_{0.15}Ga_{0.35}In_{0.50}P$**	Жовтий	590-600
GaP: N	Зелений	550
SiC або **$In_{0.06}Ga_{0.94}N$**	Блакитний	450

Можливості зміни кольору світіння у світлодіодних індикаторних елементів досить широкі і досягаються такими способами:

1. Змішання двох або декількох кольорів. Для цього напівпровідниковий прилад повинен містити хоча б дві p-n - структури, що генерують випромінювання різних кольорів, та бути прозорим у заданому діапазоні довжин хвиль.
2. Зміною струму однoперехідної двополюсної p-n - структури. При збільшенні струму колір світіння змінюється завдяки насиченню одного кольору та збільшення інтенсивності іншого кольору.
3. Зустрічним включенням паралельних діодів із різним кольором світіння. При зміні полярності напруги живлення змінюється колір випромінення.
4. Використання антистоксового люмінофора для перетворення інфрачервоного випромінювання. У цьому випадку, наприклад, червоний колір може

створюватися випромінюванням $GaAs_{0.60}P_{0.40}$, а зелений – випромінюватися люмінофором $NaYF_4$: Y_B, Eu, що перетворює інфрачервоне випромінювання від структури GaAs:Si.

Рідкокристалічні індикатори, на відміну від активних приладів, не генерують світло, а потребують додаткової зовнішньої підсвітки. Самі ж індикатори виконують роль модуляторів, працюючи в режимі пропускання або відбиття світла. Регулювання світлового потоку досягається тим, що рідкокристалічні комірки, що розміщуються на шляху світла, змінюють коефіцієнт оптичного пропускання за рахунок прикладання до них певного електричного поля. Рідкокристалічні індикатори відрізняє надзвичайно мала потужність споживання енергії та мала керуюча напруга, що дозволяє безпосередньо узгоджувати їх з цифровими інтегральними схемами.

Рідкі кристали – це складні органічні сполуки, що характеризуються поєднанням властивостей рідини (наприклад, текучість, поверхневий натяг та в'язкість) та кристала (оптична анізотропія, впорядкована орієнтація молекул). В результаті такі макроскопічні параметри, як діелектрична проникність та показник заломлення залежать від орієнтації.

Для рідкокристалічних речовин характерна анізотропна геометрія молекул. В більшості випадків вони мають витягнуту сигароподібну форму. Впорядкованість такої структури є нестійкою, оскільки підтримується відносно слабкими силами взаємодії між молекулами та граничними поверхнями. Тому при підвищенні температури, як правило, рідкокристалічна речовина перетворюється у звичайну ізотропну рідину. І навпаки, при зниженні температури рідкі кристали переходять у твердий стан і втрачають властивість рідини. Доки структура кристалу залишається рідкою, вона легко перебудовується під дією механічних, електричних або магнітних полів.

Необхідна (але недостатня) умова існування речовини в рідкокристалічному стані полягає у тому, що молекули, які входять до її складу, повинні мати порівняно велику довжину та відносно малу ширину. Звичайно, що дія теплових флуктуацій безпосередньо впливає на орієнтацію кожної окремої молекули рідкого кристалу. Проте, у будь-якій точці чи об'ємі можна виділити деяку середню орієнтацію, що превалює та може бути представлена єдиним вектором. В залежності від напрямку цього вектору та взаємного розташування центрів тяжіння молекул розрізняють три основні фази: смектичну, нематичну та холестеричну. Розташування молекул в цих фазах показано на рис. 25.

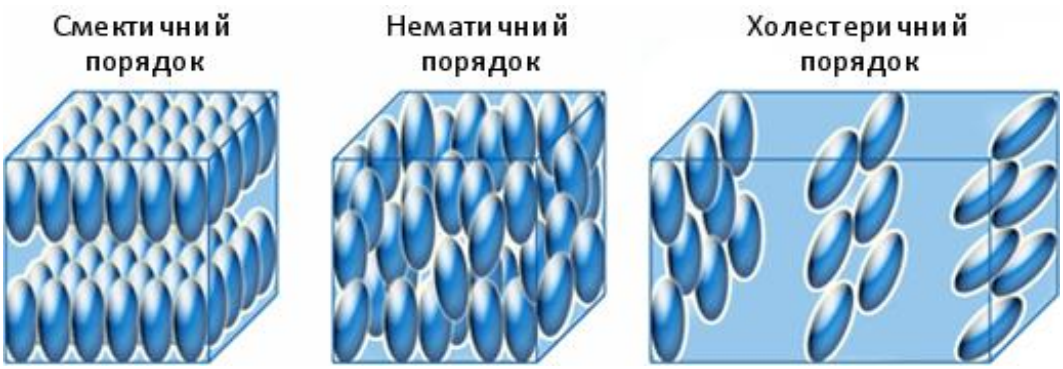


Рис. 25. Види орієнтації молекул у рідких кристалах.

Як видно з наведеного рисунку, у смектичних рідких кристалах молекули розташовані паралельно до своїх довгих осей і утворюють шари однакової товщини, близької до довжини молекул. У нематичних рідких кристалах осі молекул також паралельні, проте не утворюють окремих шарів. Довгі осі молекул лежать вздовж переважного напряму, а їх центри розташовані хаотично. У холестеричних рідких кристалах молекули розташовані в шарах, як у смектах, проте довгі осі молекул паралельні площині шарів, а напрямок їхньої переважної орієнтації монотонно змінюються від шару до шару, повертаючись на деякий кут.

За електричними властивостями всі рідкі кристали діляться на дві основні групи: до першої відносяться рідкі кристали з позитивною діелектричною анізотропією, до другої – з негативною діелектричною анізотропією. Не вникаючи у подробиці цих термінів, зазначимо, що різниця полягає в тому, як ці молекули реагують на зовнішнє електричне поле. Молекули з позитивною діелектричною анізотропією орієнтуються вздовж силових ліній поля, а молекули з негативною діелектричною анізотропією – перпендикулярно силовим лініям. Нематичні рідкі кристали мають позитивну діелектричну анізотропію, а смектичні – негативну.

Інша чудова властивість молекул рідких кристалів полягає в їхній оптичній анізотропії. Зокрема, якщо орієнтація молекул збігається з напрямом поширення лінійно поляризованого світла, то молекули не впливають на площину поляризації світла. Якщо ж орієнтація молекул перпендикулярна до напряму поширення світла, то площина поляризації світла повертається таким чином, щоб бути паралельною до напряму орієнтації молекул.

Діелектрична та оптична анізотропія молекул рідких кристалів дає можливість використовувати їх як своєрідні модулятори світла, що дозволяють

формувати необхідне зображення на екрані. Принцип дії такого модулятора досить простий і заснований на зміні площини поляризації світла, що проходить через рідкокристалічну комірку.

Рідкі кристали знайшли своє застосування у багатьох областях науки і техніки. Застосування рідких кристалів в оптичних приладах призводить до поліпшення експлуатаційних параметрів та розширенню їх можливостей. Вони можуть працювати як в реальному масштабі часу, так і з пам'яттю. Але повний опис зазначених властивостей та технологій виходить за рамки даного курсу. Для глибшого та детальнішого ознайомлення з цими питаннями можна звернутися до відповідної літератури, наприклад, [23, 24].

В системах відображення інформації на основі рідкокрісталічних комірок будуються як окремі дискретно-знакові елементи індикаторів, так і матричні панелі відображення інформації, так звані, рідкокристалічні матриці. Існує декілька різних технологій використання рідких кристалів в індикаторних елементах. Всі вони відрізняються за своїми характеристиками, такими як кут огляду, швидкість перемикання стану, максимально досяжний контраст зображення тощо. Для порівняння стисло розглянемо тут дві поширені технології створення рідкокристалічних комірок для модуляції інтенсивності світла у системах відображення інформації, за якими рідкокристалічні комірки поділяються на комірки TN-типу та комірки IPS-типу.

Рідкокристалічна комірка TN-типу (Twisted Nematic) є багатошаровою структурою, що складається з двох поляризаційних фільтрів, двох прозорих електродів та двох скляних пластинок, між якими розташовується власне рідкокристалічна речовина нематичного типу з позитивною діелектричною анізотропією. На поверхню скляних пластин наносять спеціальні борозни, які дозволяють створити на початку однакову орієнтацію всіх молекул рідких кристалів уздовж пластини. Борозни на обох пластинах взаємно перпендикулярні, тому шар молекул рідких кристалів між пластинами поступово змінює свою орієнтацію на 90° на шляху від однієї пластини до іншої (рис. 26). Виходить, що молекули рідких кристалів утворюють скручену по спіралі структуру, через що такі матриці і отримали назву Twisted Nematic. Скляні пластини з борознами розташовуються між двома поляризаційними фільтрами, причому вісь поляризації в кожному фільтрі збігається з напрямком борозен на пластині.

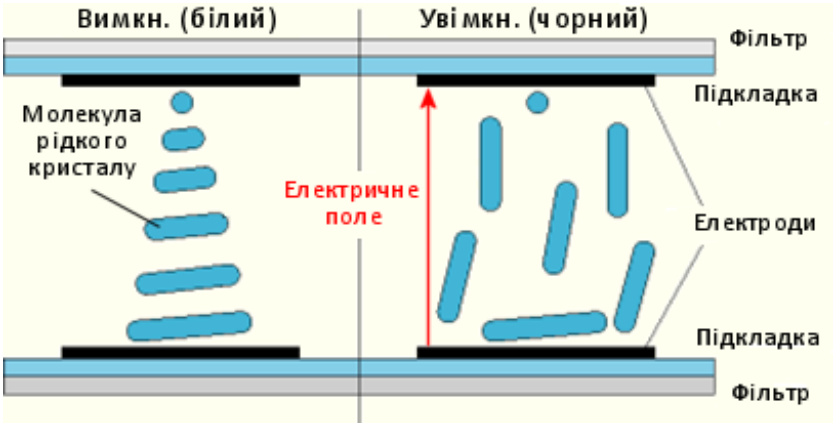


Рис. 26. TN-технология (Twisted Nematic).

З рисунку 26 видно, що у звичайному стані (вимкненому) рідкокристалічна комірка є відкритою (пропускає світло), оскільки рідкі кристали повертають площину поляризації світла, що проходить через них. Тому лінійно поляризоване випромінювання, що утворюється після проходження першого поляризатора, пройде і через другий поляризатор, оскільки вісь його поляризації буде паралельна напрямку поляризації падаючого випромінювання. Під впливом електричного поля (увімкнений стан), що створюється прозорими електродами, молекули рідкокристалічного шару змінюють свою просторову орієнтацію, шикуючись уздовж напрямку силових ліній поля. У цьому випадку рідкокристалічний шар втрачає здатність повертати площину поляризації падаючого світла, і система стає оптично непрозорою (не пропускає світло), оскільки усе світло поглинається вихідним поляризаційним фільтром. Залежно від прикладеної напруги між керуючими електродами можна змінювати орієнтацію молекул вздовж напрямку поля не повністю, а лише частково, тобто регулювати ступінь скрученості молекул рідких кристалів. Це, у свою чергу, дозволяє змінювати інтенсивність світла, що проходить через рідкокристалічну комірку. Таким чином, встановивши лампу підсвічування за рідкокристалічною коміркою і змінюючи напругу між електродами, можна варіювати ступінь прозорості цієї комірки.

TN-комірки є найдешевшими у виготовленні та мають високу швидкодію. Проте, їм властиві певні недоліки. По-перше, це не дуже великі кути огляду. А по-друге, невисока контрастність між вимкненим та увімкненим станами. Справа у тому, що навіть при прикладенні максимально можливої напруги в комірці неможливо повністю розкрутити усі молекули рідких кристалів та вишикувати їх

вздовж силових ліній поля. Тому в увімкненому стані такі комірки завжди залишаються трохи прозорими.

Відмінною рисою IPS-комірок (In Plane Switch) є те, що керуючі електроди там розташовані в одній площині на нижньому боці рідкокристалічної комірки (рис. 27). За відсутності напруги між електродами молекули рідких кристалів розташовані паралельно один одному, електродам та напрямку поляризації нижнього поляризуючого фільтра. У цьому стані вони не впливають на кут поляризації світла, що проходить, і світло повністю поглинається вихідним поляризуючим фільтром, оскільки напрями поляризації фільтрів перпендикулярні один одному.

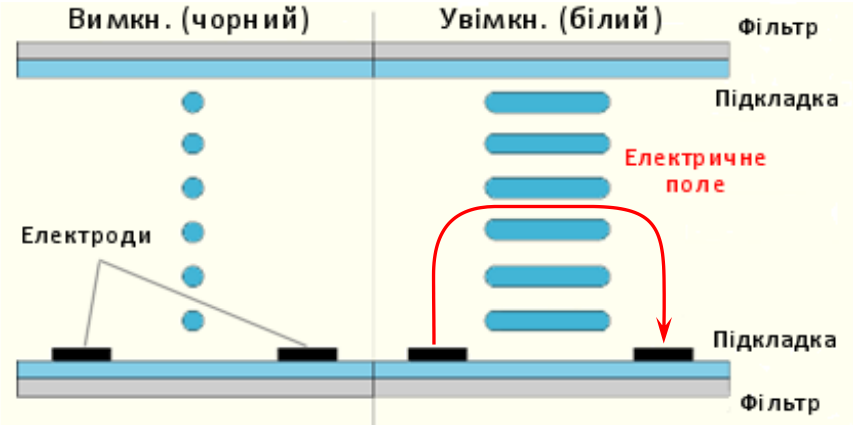


Рис. 27. IPS-технология (In Plane Switch).

При подачі напруги на керуючі електроди електричне поле, що створюється, повертає молекули рідких кристалів на 90° так, що вони орієнтуються вздовж силових ліній поля. Якщо через таку комірку пропустити світло, то за рахунок повороту площини поляризації верхній поляризаційний фільтр пропустить світло без перешкод, тобто комірка опиниться у відкритому стані. Варіюючи напругу між електродами, можна змушувати молекули рідких кристалів повертатися на будь-який кут, змінюючи цим прозорість комірки.

IPS-комірки мають як переваги, так і недоліки. До переваг можна віднести високий контраст між вимкненим та увімкненим станами, а також великі кути огляду. До недоліків можна віднести значно більший час перемикання порівняно з TN-комірками та більшу вартість виготовлення.

Існують також ще й інші типи індикаторів, які використовують інші фізичні явища: «*електронні чорнила*» (e-ink) – технологія відображення інформації,

заснована на явищі електрофарезу (керування рухом заряджених пофарбованих часток в електричному полі), *електрохромні індикатори* (керування зміною кольору або прозорістю речовини), *електрохімічні індикатори* з гальванічним осадженням атомів металу на прозорий електрод тощо. Проте, подобного типу індикаторні елементи широкого застосування не знайшли.

Контрольні запитання

1. Якими основними фотометричними параметрами характеризується світлове випромінювання та в яких одиницях вони вимірюються?
2. Яке джерело випромінювання називають ізотропним?
3. Що таке випромінювач Ламберта?
4. В чому полягає відмінність між яскравістю та освітленістю?
5. Які існують види контрасту, в чому їх відмінність? Яким має бути оптимальний контраст?
6. Що називають нижньою абсолютною межею чутливості зору?
7. Що таке адаптація ока, які існують види адаптації?
8. Що називають диференційним порогом чутливості ока?
9. Що таке пороговий контраст?
10. Які умови впевненого сприйняття зображення на певному фоні?
11. Що характеризує відносна видність ока?
12. Якими особливостями характеризується спектральна чутливість ока?
13. Що відносять до просторових характеристик зорового аналізатора?
14. Що називають порогом гостроти зору?
15. На які зони умовно розбивається все поле зору людського ока?
16. Що відносять до основних часових характеристик зорового аналізатора?
17. Як змінюється уявна яскравість джерела світла після його вимкнення?
18. До чого призводить наявність інерції людського ока?
19. Які існують рекомендації щодо розмірів інформаційних символів для їх кращого сприйняття?
20. Які типи інформаційних моделей виділяють в залежності від алфавіту, що використовується?
21. Які способи формування знаків використовуються в буквенно-цифрових інформаційних моделях?
22. Що називають графемами?

23. Що таке поліграма?
24. Які види індикаторних елементів зустрічаються в системах відображення інформації?
25. Як розділяються пристрої відображення інформації за способом формування зображень?
26. Які фізичні явища використовують для формування зображень в індикаторних елементах?

Література

1. Michael J. Bok, Megan L. Porter, Allen R. Place, Thomas W. Cronin. Biological sunscreens tune polychromatic ultraviolet vision in mantis shrimp // Current Biology. – 2014. – Vol. 24, Issue 14, P. 1636–1642. – DOI: 10.1016/j.cub.2014.05.071.
2. Jamie Wong. Color: From Hexcodes to Eyeballs. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://jamie-wong.com/post/color/. 12.07.2022.
3. William David Wright. A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours // Transactions of the Optical Society. – 1928. – Vol. 30. – P. 141–164. – DOI: 10.1088/1475-4878/30/4/301.
4. John Guild. The colorimetric properties of the spectrum (англ.) // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1931. – Vol. A230. – P. 149–187.
5. Закон Грассмана (оптика) — Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Закон_Грассмана_(оптика). 12.07.2022.
6. International Commission on Illumination [Online]. Available at: www.cie.co.at.
7. J. Schanda, Colorimetry: understanding the CIE system (John Wiley & Sons, 2007).
8. Цветовая модель – Wikiwand [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.wikiwand.com/ru/Цветовая_модель. 12.07.2022.
9. Ландсберг Г.С. Оптика, Изд.6, М., Физматлит, 2006.
10. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.4. Оптика. Изд.3. М., Физматлит, 2005.
11. Яблонский Ф. М., Троицкий Ю. В. Средства отображеиня информации: Учеб. для вузов спец. «Промышленная электроника». – М.: Высш. шк., 1985. – 200 с.
12. Ломов Б. Ф. Основы инженерной психологии. – М.: Высш. школа, 1986.
13. Быков Р. Е. и др. Телевидение: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1988. — 248 с.
14. Справочник по инженерной психологии / Под ред. Б. Ф. Ломова. – М.: Машиностроение, 1982.
15. Тищенко Н. М. Введение в проектирование сложных систем. – М.: Энергия, 1976.
16. Алиев Т. М. и др. Системы отображения информации: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1988. – 223 с.
17. Костюк В. И. Ходаков В. Е. Системы отображения информации и инженерная психология. – К.: Вища школа, 1977. – 192 с.
18. Вуколов Н.И., Михайлов А.Н. Знакосинтезирующие индикаторы. Справочник. Под ред. В. П. Балашова. – М.: Радио и связь, 1987. – 576 с.

19. Кацнельсон Б. В. и др. Электровакуумные электронные и газоразрядные приборы: Справочник / Б. В. Кацнельсон, А. М. Калугин, А. С. Ларионов; Под общ. ред. А. С. Ларионова. — 2-е изд., перераб. и доп.. — М.: Радио и связь, 1985. — 864 с.
20. Гуров В.С., Круглов С.А., Солдатов В.В. Газоразрядные знакосинтезирующие индикаторы. – М: Горячая линия-Телеком, 2011. – 160 с.
21. Новиков М. А. Олег Владимирович Лосев — пионер полупроводниковой электроники // Физика твердого тела. — 2004. — Т. 46, вып. 1. — С. 5—9.
22. Light-emitting diode – Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode. 12.07.2022.
23. Каманина Н. В. Электрооптические системы на основе жидких кристаллов и фуллеренов – перспективные материалы наноэлектроники. Свойства и области применения. Учебное пособие. - СПб: СПбГУИТМО, 2008 – 137с.
24. Томилин М. Г. Фотоника жидких кристаллов / М. Г. Томилин, Г. Е. Невская. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. — 2011. — 741 с.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ..... 3

Глава 1. Людський зір..... 5

1.1. Будова людського ока 5

1.2. Процес сприйняття та обробки графічних образів 8

1.3. Око як детектор випромінювання 11

1.4. Кольорові моделі 14

Контрольні запитання 21

Глава 2. Системи відображення інформації..... 22

2.1. Основні фотометричні параметри 22

2.2. Психофізичні характеристики сприйняття зорової інформації людиною.... 29

2.3. Ергономічні характеристики систем відображення інформації..... 38

2.4. Інформаційна модель та формування її елементів 42

2.5. Фізичні принципи відображення інформації та види індикаторів..... 49

Контрольні запитання 62

Література..... 64

Навчальне видання

КОЛЄНОВ *Сергій Олександрович*

МЕДІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В РАДІОФІЗИЦІ

Частина 2

Зорове сприйняття інформації

Навчально-методичний посібник до лекційного курсу
для студентів факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем

Підписано до друку . Формат 60x84[16].
Гарнітура Calibri. Папір офсетний. Друк офсетний.
Наклад 100 примірників. Ум. друк. арк. 2.7.

Видавнича лабораторія Навчально-наукового інституту високих технологій
Київського національного університету імені Тараса Шевченка