

Лекція 4. Дослідження бінокулярного стереозору методом бінариметрії

При сприйнятті об'єктів двома очима поле зору людини у вертикальній площині: вгору на 600, вниз приблизно 750 кутових хвилин. Заокруглено розмір зорового поля людини складає 1800×1350 . Володіння такою великою зоною сприйняття довколишньої дійсності має свої плюси і мінуси. Найбільш важливі недоліки створюють незручності при роботі з пристроями відображення інформації. Наприклад, для оператора, що працює за монітором з діагоналлю 21 дюйм, що стоїть в 70 см від нього, поле зору, що охоплює “робочу” інформацію, складає 300×230 . При цьому його погляд сприймає багаточисельні зображення сторонніх предметів.

На рисунку 1.2 функціонально представлений механізм стереоскопічного зору.

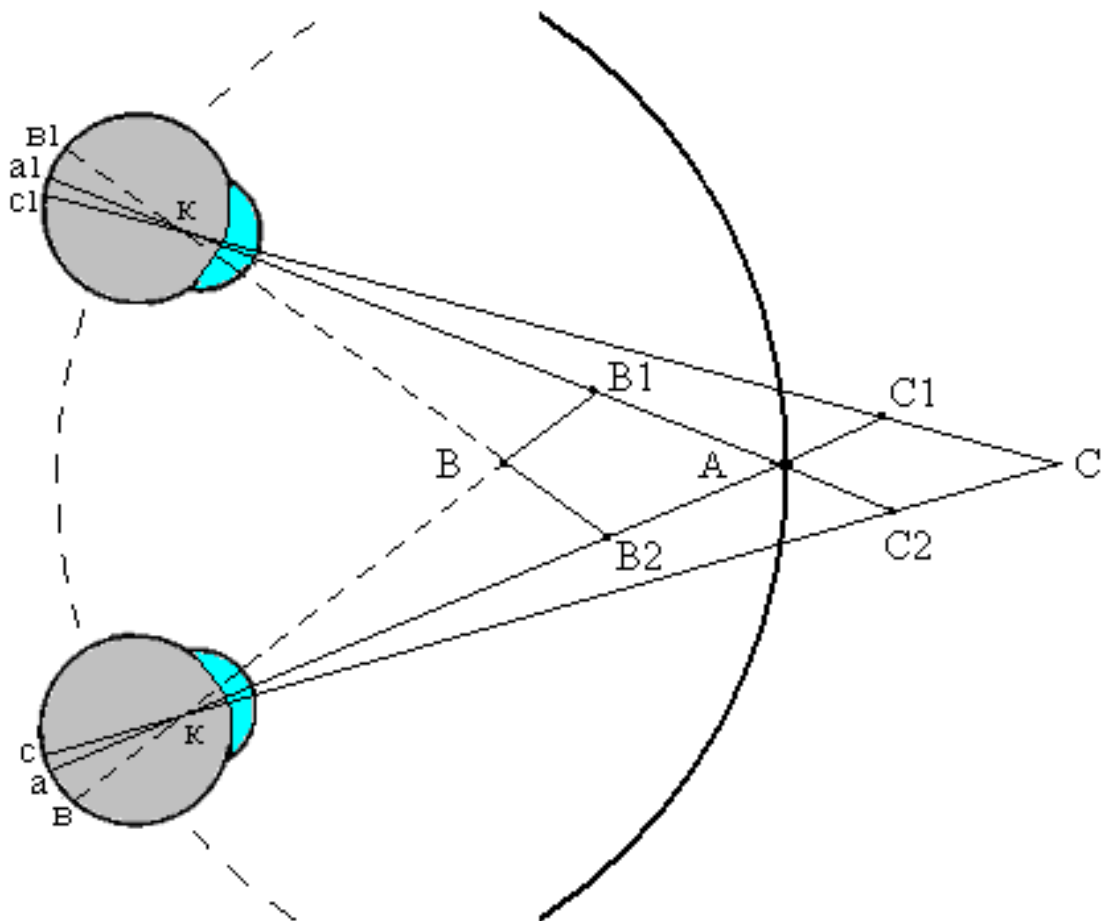


Рисунок 1.2 - Функціонування механізму стереоскопічного зору

Якщо обидва ока фіксують точку А, те її зображення фокусується на центральні ямці сітківки (a і a_1), і точка сприймається як одна. Обумовлено це тим, що плями є відповідними (ідентичними), або кореспондуючими точками сітківки. Окрім макулярних зон, до кореспондуючих точок відносяться всі точки сітківки, які збігаються, якщо обидва ока поєднати в одне, наклавши одне на одне центральні ямки, а також горизонтальний і вертикальний меридіани сітківки. Останні точки сітківки, не співпадаючи одна з іншою, називаються невідповідними (неідентичними), або диспаратними.

Якщо даний об'єкт фокусується на диспаратних точках, то його зображення передається в різні ділянки кори великого мозку, у зв'язку з чим не відбувається злиття в єдиний зоровий образ і виникає двоїння, або диплопія. Двоїння можливе і при порушенні функціонального стану кіркового аналізатора, наприклад при стомленні, інтоксикації і так далі.

При фіксації точки А у полі зору обох очей лежатимуть також точки В і С. Промені, витікаючи з точки В, впадуть в правому оці правіше за центральну ямку (b), а в лівому – лівіше (b_1), тобто на диспаратні ділянки сітківки. Внаслідок цього точка В буде видна в подвійному зображенні, причому зображення правого ока розташується лівіше точки А, що фіксується, а лівого — правіше за неї, оскільки проекція точки, що дратує скроневу половину сітківки, розташовується в носовій половині поля зору і навпаки. Така диплопія отримала назву перехресною.

Простеживши за зображенням на сітківках точки С, можна бачити, що в правому оці воно розташується лівіше за центральну ямку (c), а в лівому - правіше (c_1), тобто знову-таки в диспаратних ділянках. Отже, і точка С двоїтиметься, але тепер зображення правого ока лежатиме правіше точки А, що фіксується, а лівого лівіше. Така диплопія називається однойменною [2].

На перший погляд здається, що всі предмети, що містяться в нашому полі зору, ми бачимо з однаковою виразністю. Насправді ж виразний зір обмежується край незначною ділянкою сітківки - центральною ямкою, площа

якої не перевищує $0,3 - 0,4 \text{ мм}^2$. Якщо фіксувати одне око на букві в середині слова, то лише одна ця буква буде видима сповна виразно, тоді як всі інші виявляться декілька затьмареними. Першою умовою для виразного розрізнення предмету, таким чином, являється здобуття його зображення на fovea. Це досягається, завдяки рухливості очей, які швидко встановлюються на даній деталі.

Інколи ці рухи визначаються волею, але і сам волевий імпульс зазвичай збуджується враженням від предмету, що з'явився на периферії поля зору. Роздратування периферії сітківки хоч би одного ока заставляє обидва ока (а також голову, тіло) обернутися до предмету, який викликав це роздратування. У цьому полягає приведення в дію ретинального рефлексу на пряму і апарату одночасного зору. Це виявляється можливим завдяки тому, що характерні для чутливого відділу апарату одночасного зору нервові зв'язки, мабуть, розподілені по всьому протягу сітківки, включаючи її периферичні і центральні частини. Одночасний зір властивий головним чином периферійному зору, який певною мірою здійснює сигнальні функції.

Таким чином, властивий одночасному зору рефлекс на пряму визначається враженням від предметів, які розташовуються на периферії поля зору. І хоча, завдяки нервово-м'язовим зв'язкам (синергія), рефлекс на пряму приводить в рух обидва ока, для чого досить збудження лише однієї сітківки.

Якщо зображення предмету сформується хоч би на одній fovea, то предмет буде видимий виразно. При відсутності бінокулярного зору відсутня також рефлекторна конвергенція, зображення предмету не може вийти відразу на обох fovea і тому предмет не буде видимий виразно одночасно двома очима (утворюється так званий центральний зір, що чергується).

При бінокулярному зорі зображення, падаючи на обі fovea або по сусідству з ними, викликають ретинальний рефлекс конвергенції, який і наводить в дію апарат бінокулярного зору [3].

Таким чином, ретинальний рефлекс конвергенції пов'язаний з центральними частинами обох сітківки і відрізняється від рефлексу на пряму тим,

що, як згадувалося, вимагає одночасного збудження двох сітківки, тоді як для виконання паралельних рухів (рухи напряду) двома очима буває досить збудження лише одній сітківки.

Ретинальний рефлекс напряду має бути віднесений до безумовних (природжених) рефлексів, рефлекс же конвергенції є умовним, оскільки утворюється вже після народження і починає діяти до кінця першого місяця життя, коли дитина починає фіксувати предмети обома очима разом.

З точки зору функції і еволюції бінокулярний зір є найбільш досконалим і забезпечує уточнення зорового відчуття, особливо по відношенню до локалізації предметів в просторі.

Аби зрозуміти сенс різних способів зору, не слід обмежувати аналіз лише зоровими сприйняттями; необхідно взяти до уваги, що збудження сітківки викликає в мозку безліч очагів, що часто навіть не доходять до свідомості, збудження, які ведуть до рефлекторних рухів голови, кінцівок, тулуба, викликають реакції з боку внутрішніх органів і так далі. Ці очаги збудження значною мірою забезпечують зв'язок між зовнішнім і внутрішнім середовищем організму [3].

Повна заміна асоційованого (бінокулярного і одночасного) зору, що має місце, при двох розплющених очах чергується, може бути пояснена великим застосуванням зорового аналізатора до збудження одного характеру, чим іншого. Так, наприклад, людина сильніше реагує на появу у полі зору предмету, що має фіксовану форму, чим на дифузне світло. Це зв'язано, мабуть, з тим, що будь-який предмет, що привертає нашу увагу, зазвичай або рухається, або проектується на fovea, що дає можливість розрізняти деталі. Незліченні поєднання появи у полі зору об'єкту, що привертає нашу увагу, з проекцією його на fovea, мабуть, встановлюють зв'язки, завдяки яким сприйняття форми починає переважати над сприйняттям розсіяного світла. Можна вважати, що найбільш сильним роздратуванням для зорового аналізатора є об'єкт, що має певні форми і одночасно перебуває в русі.

Для доказу цього положення і з метою ілюстрації явищ, що спостерігаються при одночасному зорі, можна привести наступний досвід. Якщо поставити перед одним оком червоне, а перед другим - синє скло і злегка нахилити стекла, то в них розташуються слабкі віддзеркалення довколишніх предметів. Якщо потім по черзі злегка рухати ці стекла, то разом з ними переміщатимуться і предмети, що відбилися в них. Як тільки цей рух буде відмічений, то фон (наприклад, безхмарне піднебіння), на який дивляться через скло, зараз же прийме колір, відповідний рухомому склу, а світлове роздратування сітківки ока, перед яким розташоване нерухоме кольорове скло, буде пригнічено. Отже, коли сітківка одного ока отримує лише дифузне світлове роздратування, а на іншій проектується зображення предмету, зоровий аналізатор пристосовується до зору так, як ніби то кожне око зачинялося по черзі. Апарат біноккулярного зору розвився на основі апарату одночасного зору. Можна припустити, що це розвиток, що відбувається в процесі філогенезу і онтогенезу, проходить ряд стадій, першою з яких є біноккулярне злиття кольорів. Це положення підтверджується клінічними спостереженнями, що показують, що при переході від одночасного до біноккулярного зору в процесі ортоптичного лікування також спочатку виникає біноккулярне злиття кольорів, а потім вже об'єктів, що мають певні форми.

Аби зрозуміти різні види біноккулярного злиття кольорів, можна привести ряд дослідів. Для доказу можливого злиття кольорів при одночасному зорі ставлять перед тим і іншим оком стекла різного кольору, приблизно, що мають, рівне пропускання і насиченість, і дивляться на одноманітну білу поверхню (наприклад, освітлений аркуш паперу, безхмарне піднебіння і ін.). За цих умов спостерігання виходить суміш кольорів або (коли стекла забарвлені в додаткові кольори) білий колір. При досить довгому спостереженні поступово виявляється, що один з кольорів починає переважати над іншим і настає явище біноккулярного контрасту; якщо ж у полі зору одного ока появляється який-небудь об'єкт, що привертає нашу увагу, то сприйматиметься лише колір, відповідний склу, що стоїть перед цим оком. Таким чином, суміш кольо-

рів при одночасному зорі відрізняється нестійкістю і не може бути уподібнена суміші тих же кольорів на сітківці одного ока [3].

Збуджуючи апарат бінокулярного зору, можна отримати стійкішу суміш кольорів, але вона також відрізнятиметься від суміші на одній сітківці.

Якщо отриману приставлянням для кожного ока стекол різного забарвлення бінокулярну суміш кольорів протягом деякого часу фіксувати, а потім послідовне зображення кожного ока по черзі спостерігати, дивлячись на білий екран, то на ній будуть отримані додаткові кольори до тих, які діяли на кожну сітківку окремо, неначе змішення кольорів не було.

Для бінокулярної суміші характерний так званий стереоскопічний блиск (рис. 1.3), якого не можна відмітити при суміші тих же кольорів і в тій же пропорції на одній сітківці.

У бінокулярній суміші зберігають свою дію обидва кольори (чорний і білий), а стереоскопічний блиск, що виходить при їх бінокулярному змішенні, зобов'язаний своїм походженням властивостям білого подразника. Це підтверджує, що при бінокулярному злитті кольорів або форм обох ретинальних зображень зберігають свої особливі властивості.

Досвід із забарвленими предметами в стереоскопі показує також, що існує відома незалежність між бінокулярним злиттям форм і кольорів: якщо кольори дуже різні по тону або по інтенсивності, то, не дивлячись на сприйняття рельєфу, вони чергуються між собою.

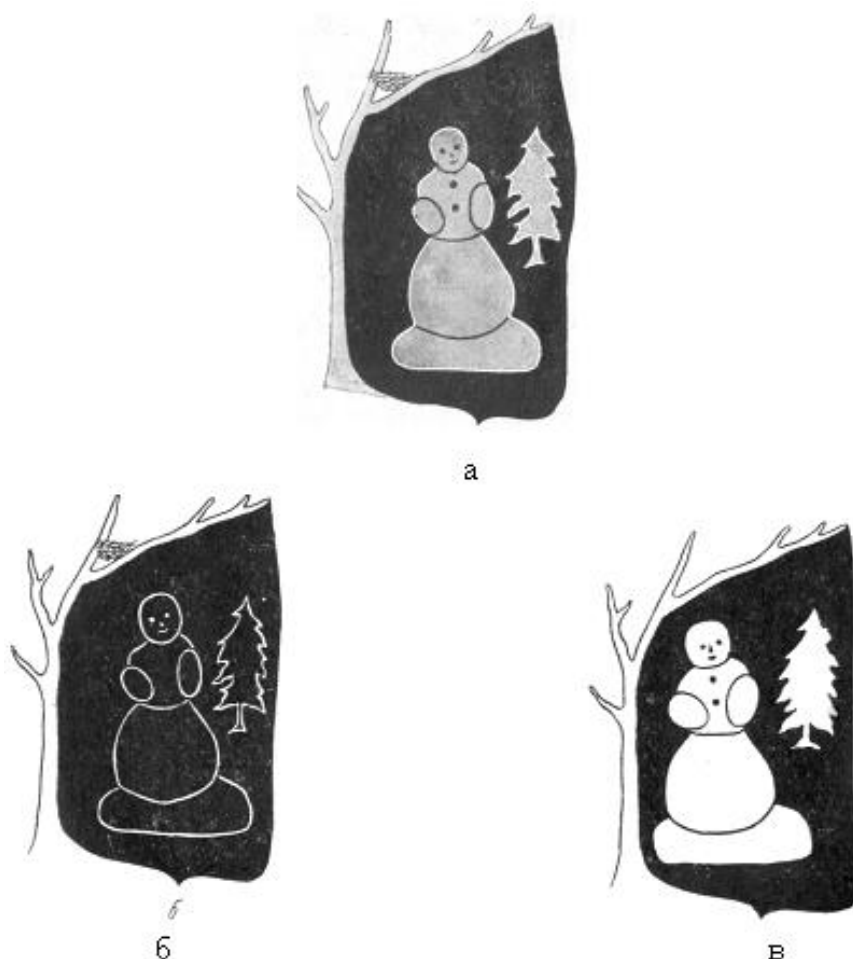


Рисунок 1.3 - Стереоскопічний блиск (а), що виходить в результаті злиття в стереоскопі чорного (б) і білого (в) зображення

Можна уявити собі, що від монокулярного зору до бінокулярного веде ряд рівнів, і погано урівноважені очі в тих випадках, в яких вони позбавляються досконалості функції, можуть зупинитися на будь-якому з цих рівнів. За бажання знову відновити бінокулярний зір необхідно знову пройти всі бракуючи рівні.

Найбільш простим є монокулярний зір: лише одно око за допомогою своїх м'язів направляє зорову лінію на предмет; як тільки вона встановилася, вступає в дію акомодация і забезпечує виразність зображення.

Наступний рівень займає одночасний зір, при якому обидва ока функціонують в один і той же час, але з роздільними полями зору. Одне око дивиться на один пункт простору, інше око — на іншій. Зір «у загальних рисах»

задовільний, але як тільки людина починає розглядати один з цих пунктів, вступає в дію гальмівний рефлекс і виключає з поля зору інший об'єкт спостереження.

Найбільш досконалим способом зору є бінокулярний [2].

Бінокулярний зір характеризується злиттям в одній площині (наприклад, в диплоскопі), стереоскопічний — злиття одночасно в трьох площинах, лежачих одна за одною (наприклад, в стереоскопі).

Перше можливо на будь-якій відстані і тому вимагає роботи конвергенції в повному об'ємі, друге — лише при установці для далечини і не потребує позитивної частини конвергенції.

Нормальна робота конвергенції і нормальний бінокулярний зір знаходяться у взаємній залежності. Тому сприйняття третього виміру на будь-якій відстані не може бути без бінокулярного зору і доводить його існування.

Сприйняття ж третього виміру в стереоскопі цілком можливо і без бінокулярного зору і тому стереоскоп не може служити для доказу існування бінокулярного зору. Стереоскоп доводить лише існування здібності до злиття при установці удалину, але не здібності зливати на будь-якій відстані, яка характеризує бінокулярний зір.

1.2 Дослідження стереоскопічного зору за допомогою електронного дисплея

Поява високопродуктивних ЕОМ і графічних відео контролерів для відтворення стереоскопічних зображень типа ASUS V3800 Ultra Deluxe і ASUS V6800 GeForce створила передумови для розробки автоматизованого комплексу для дослідження характеристик стереоскопічного зору. У основі вказаних графічних відео контролерів використовується принцип тимчасового розділення зображень лівого і правого каналів зору за допомогою спеціальних окулярів, затемнення лінз яких здійснюється покадровий по сигналах персональної ЕОМ. Роздільне формування і сприйняття тестових зображень лі-

вого і правого каналів, синтезованих з врахуванням просторового паралакса створює ефект стереоскопічного зору. Вживання персональної ЕОМ для оцінки характеристик стереоскопічного зору забезпечує переваги, якими не володіють відомі системи для дослідження стереоскопічного зору. Це стосується автоматизації досліджень, спрощення синтезу тестових зображень, реєстрації у відповідь реакції, обробки і аналізу результатів досліджень. Проте особливості формування тестових зображень на екрані дисплея (дискретна структура растру, дискретність пред'явлення тестових зображень в часі) і їх сприйняття (об'єкт фіксації і площа фокусування зорового аналізатора на тест-об'єктах знаходяться на поверхні екрану) вимагають обліку цих особливостей при розробці методик оцінки характеристик стереоскопічного зору.

Гострота стереоскопічного зору в нормі складає 10-30 кутових секунд для центрального поля зору і зростає до 2 кутових градусів на периферії. Кордони латентного стереопсису знаходяться в межах горизонтальної диспаратності 10-30 кутових хвилин, а кордони якісного стереопсису - 30-60 кутових хвилин. Для периферичного зору ці кордони збільшуються. Слід також брати до уваги те, що для забезпечення якісного стереоскопічного зору інтервал пред'явлення стереопари має бути в межах 30 до 40 мілісекунд.

Проблеми розробки методик оцінки перерахованих характеристик стереоскопічного зору пов'язані з тим, що для забезпечення високої точності оцінки необхідно збільшувати формат дискретного растру, тобто зменшувати просторову дискретність тестового зображення. Графічні контролери V3800 Ultra Deluxe і ASUS V6800 GeForce забезпечують формування зображення у форматі 1024×1024 елементи. Формат растру може бути збільшений і до 1600 елементів, проте при цьому зменшується частота кадрів тестового зображення. При форматі 800×600 елементів вона складає 160 Гц, а при форматі 1600×1024 - 75 Гц. При частоті кадрів 75 Гц частота пред'явлення елементів стереопари кожному каналу зору складає 37,5 Гц. Це наводить до відчутних пульсацій яскравості тестового зображення і погіршення якості тестового зображення. Задовільної якості стереоскопічного зображення можна досягти

при частоті кадрів не менше 100 Гц. Формат зображення, відтворного з такою частотою, не повинен перевищувати 1024×1024 елементи. Зниження кроку просторово-кутової дискретизації тестового зображення досягається видаленням екрану від спостерігача і збільшенням розміру екрану. Розрахунки показують, що для забезпечення високої точності оцінки порогів стереопсису необхідно використовувати електронні дисплеї з розміром екрану не менше 19 дюймів.

Відомо, що стереоефект посилюється при спостереженні за рухливими об'єктами. В зв'язку з цим, для оцінки кордонів диспарантності доцільно використовувати рухливі тест-об'єкти, які наближаються або віддаляються від спостерігача.

1.3 Дослідження бінокулярного стереозору методом бінаріметрії

Бінаріметрія наближає умови дослідження до природніших [4] в порівнянні з комп'ютерними методами, де візуалізація зображень відбувається на екрані монітора. Основним параметром бінаріметрії є наявність бінокулярного зорового образу (БЗО) – результату взаємодії подвійних зображень в умовах фізіологічного двоїння, який має певну просторову локалізацію, що підтверджується «ефектом глибини».

Параметри локалізації БЗО в просторі можуть бути використані для оцінки бінокулярного глибинного зору у здорових людей, а також для діагностики його порушень при косоокості.

Бінаріметр, як і кольоротест [4], який широко використовується у клінічній практиці, можна віднести до приладів, дослідження бінокулярного зору на яких задовольняє наступним основним вимогам:

- прилад має об'єкти, що дозволяють диференціювати участь кожного ока в акті зору;

- БЗО, будучи результатом бінокулярної взаємодії, виконує роль загального об'єкту для обох очей і стимулює фузію;
- умови дослідження максимально наближені до природних (без оптики і роздільників полів зору).

Тим часом, визначення бінокулярного зору на чотирьохточковому кольоротесті дозволяє лише констатувати наявність або відсутність бінокулярного зору, не характеризуючи його якості.

Порівняльний аналіз результатів, отриманих при дослідженнях на приладах з різною дисоціюючою дією: бінариметр, кольоротест, синоптофор, показує необхідність комплексної оцінки стану бінокулярних функцій з використанням всіх цих приладів [3].

Бінариметрія забезпечує сприятливіші умови для бінокулярної сенсорної співпраці очей, що розширює лікувальні можливості методу.

2 Розробка високоточної мікропроцесорної системи для діагностики бінокулярного стереоскопічного зору

Існує апарат "Бінариметр" (рис. 2.1). В принципі його роботи використовується фізіологічне двоїння, що дозволяє оцінювати стан фузійних резервів у вільному просторі.

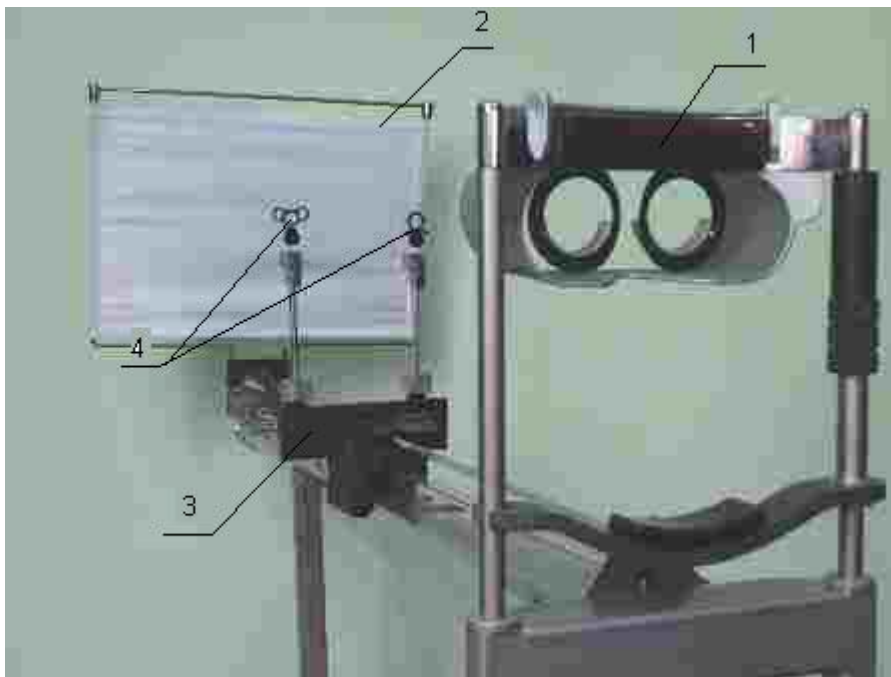


Рисунок 2.1 - Пристрій для діагностики стереоскопічного зору

Просторові зорові ефекти отримують при здвоюванні ідентичних зображень (на основі феномену біологічного двоїння) у вільній гаплоскопії (без оптики і роздільника полів зору). Два просторові зорові ефекти використано для оцінки стану стереоскопічного зору. Перший просторовий зоровий ефект виходить при злитті двох ідентичних об'єктів. Для того, щоб ефект виник потрібно девергувати або конвергувати зорові осі, тобто область бифіксації повинна знаходитися за або перед площиною, на якій знаходяться два ідентичні зображення. При їх злитті з'являється відчуття трьох гуртків, причому середнє зображення гуртка локалізується певним чином в просторі: при дивергенції - за площиною тексту, а при конвергенції - перед нею. Другий просторовий зоровий ефект багатоплощини. Тест є площиною, на яку нанесений ряд ідентичних зображень, побудованих за принципом регулярності (рис. 2.2). Зорові умови такі ж, як і в першому випадку, область фіксації знаходиться за або перед площиною зображень. При злитті відповідних елементів картини виникає відчуття відносної віддаленості між рядами зображень.

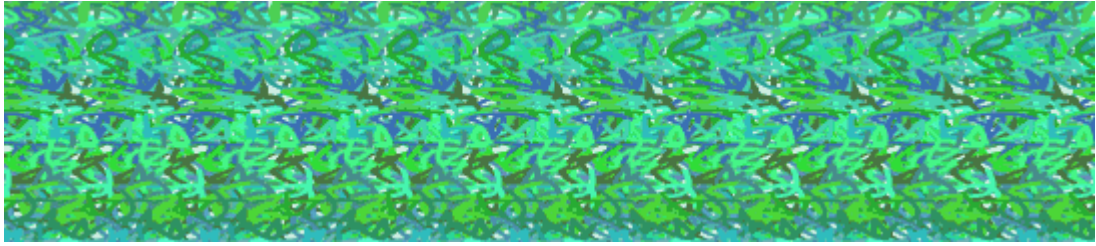


Рисунок 2.2 - Тест побудований за принципом регулярності

У існуючому варіанті "Бінариметр" є механічним пристроєм для реалізації вимірювальних функцій. Більш перспективним являється електромеханічний апарат з мікропроцесорним керуванням [6] (рис. 2.3), який дозволяє реалізувати і лікувальні функції.

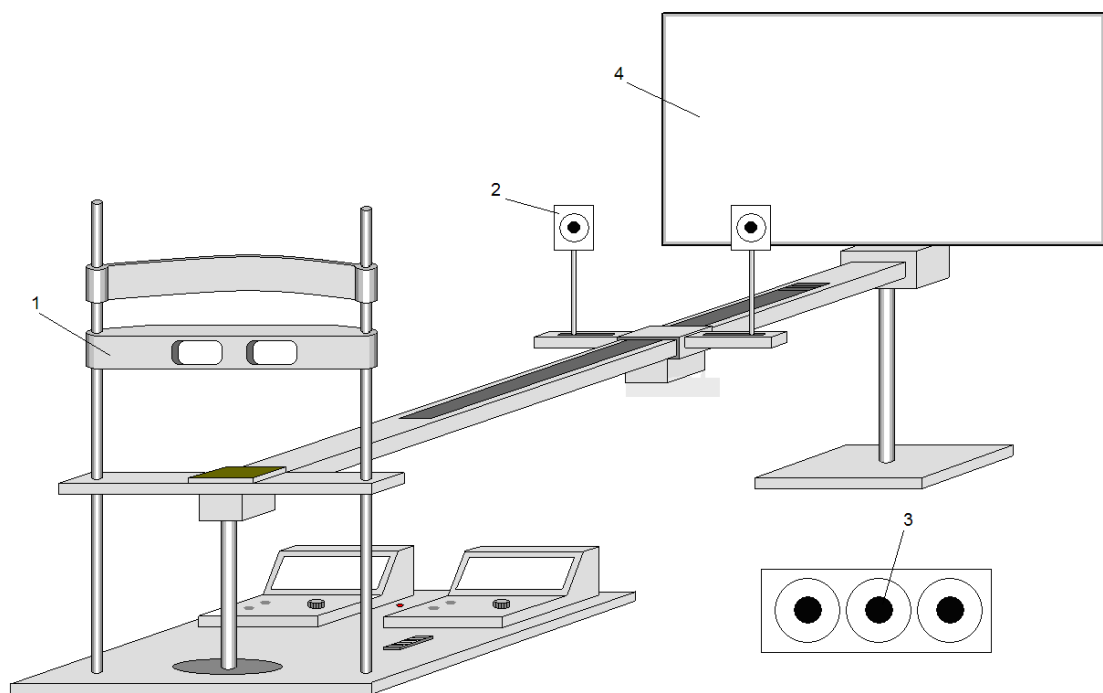


Рисунок 2.3 – Високоточна мікропроцесорна система "Бінариметр"

Суть дослідження на розробленому апараті полягає в тому, що пацієнт дивиться на білий екран 4 через прозорі пластини теста 2. В результаті злиття зображень 2, виникає відчуття трьох кругів 3, що становить основу стереопсису, є уявним.

З метою відтворення стереопсису у вигляді стійкого отримання третього - уявного зображення у осіб з нормальним бінокулярним зором, а так само отримання аналогічного ефекту у пацієнтів з косоокістю, в поле погляду вве-

дені призмові компенсатори 1, кожен керований кроковим двигуном. При цьому в результаті безперервного процесу з плавним збільшенням призматичності, досягається чітке бачення уявного зображення на усьому протязі від ока пацієнта до екрану.

У апараті можливе плавне регулювання відстані до тест-об'єктів, і відстані між тест-об'єктами, за допомогою маніпуляторів, розташованих на панелі управління. Поперечне і подовжнє зміщення тест-об'єктів стимулює розгляд двох різних зображень, які зливаються так, що виникає третє уявне зображення.

Застосування в схемі управління мікроконтролера дозволяє передавати інформацію на персональний комп'ютер, з подальшою документацією результатів діагностики і лікування.

2.1 Розробка мікропроцесорної схеми електричної принципової управління "Бінариметром"

У відмінності від існуючих аналогів в розробленому пристрої використовуються підсвічені світлодіодами тест-об'єкти, що полегшує отримання стереоефекту у пацієнтів молодшого віку.

Пристрій управляється за допомогою ПК. Для зручності також передбачений виносний пульт управління. Світлодіоди працюють в режимі перемикання, що задається, і з регульованою частотою. Каретка з екраном і призми приводяться в дію за допомогою крокових двигунів. Таким чином, завданнями функціонального модуля є:

- управління світлодіодами в послідовності, що задається, з різною частотою і часом свічення.
- управління кроковими двигунами з достатньою точністю позиціонування.
- обмін даними з ПК.

Основою модуля є 8-розрядний RISC - мікроконтролер AT90S8515 сімейства AVR фірми Atmel Corporation. Він має 32 лінії введення/виведення, а також інтерфейс RS – 232 обміну даними з ЕОМ.

Схема електрична принципова функціонального модуля представлена на рисунку 2.4.

Сигнали управління обмотками крокових двигунів і світлодіодами формуються на портах PA0 - PA7 і PC1 - PC7 програмно. Для комутації обмоток і світлодіодів використані мікрозборки на біполярних транзисторах. Кожен транзистор може комутувати струм 1 А. Плавний спад струму фаз забезпечується шунтуванням обмоток двигунів діодами VD15, VD18 і VD20 - VD21.

Для управління кроковими двигунами використовуються по два логічних входи на кожен двигун - вперед і назад, які підключені до роз'ємів XT1 - XT3. При подачі низького логічного рівня двигун обертається в заданому напрямі. За наявності на обох входах високого логічного рівня двигун не обертається.

Окрім командних входів, передбачено шість входів (по два на кожен двигун) кінцевих вимикачів (XT5, XT7, XT9). Кінцевий вимикач спрацьовує, якщо на відповідному вході присутній низький логічний рівень. При цьому обертання двигуна в заданому напрямі заборонене.

Мікроконтролер працює на тактовій частоті 8 МГц, стабілізованою кварцовим резонатором ZQ1.

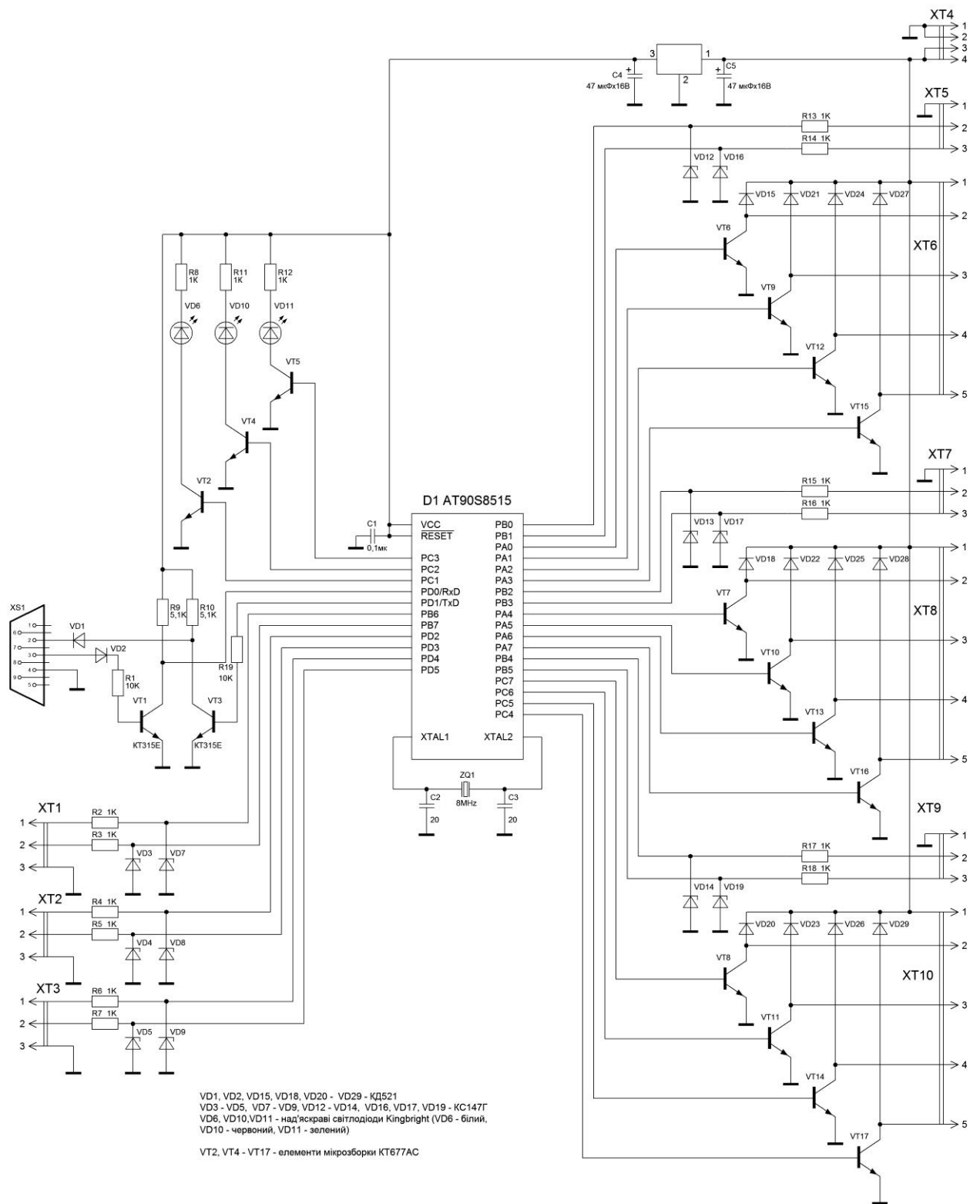


Рисунок 2.4 - Схема електрична принципова пристрою для діагностики стереоскопічного зору

Живлення мікроконтролера і світлодіодів формується за допомогою мікросхеми стабілізатора КР 142 ЕН5А або аналогічного, який має напругу стабілізації 5В. Живлення на плату подається через 4-контактний роз'єм ХТ4, контакти якого спарені.

Як світлодіоди використовуються над яскраві світлодіоди фірми Kingbright. [8]

Зв'язок з ПК здійснюється через інвертори на транзисторах VT1 і VT3. [9]

2.2 Розробка топології печатної плати пристрою

Конструктивно пристрій виконується на двосторонній печатній платі з фольгованого склотекстоліту завтовшки 1,5 мм. Для спрощення технологічного процесу використовується склотекстоліт FR - 4, який поставляється із вже нанесеним шаром позитивного фоторезиста, захищеним спеціальною захисною плівкою.

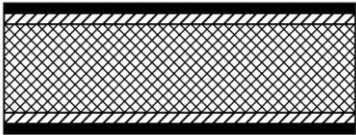
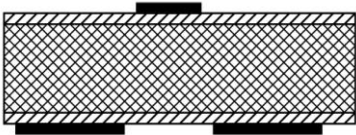
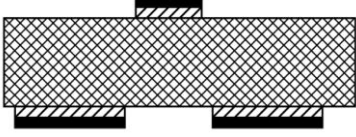
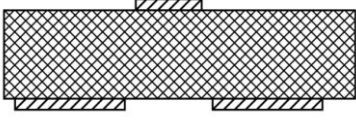
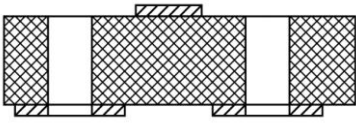
Технологічний процес виготовлення печатної плати функціонального модуля представлений в таблиці 2.1.

Фотошаблони для виготовлення печатної плати друкуються на лазерному принтері з роздільною здатністю не менше 600 dpi (точок на дюйм) на прозорій плівці або папері з наступною обробкою освітлювачем TRANSPARENT 21

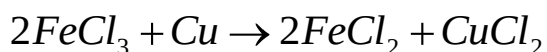
Після експонування плати проявляються в 0,7% розчині NaOH. Час прояву – 30...60 секунд залежно від експозиції і температури розчину.

Травлення міді проводиться в розчині хлориду заліза (III), який набув поширення завдяки низькій вартості і високій швидкості травлення. Розчин має наступний склад: 500 г/л FeCl_3 , 4...6% HCl [15].

Таблиця 2.1 - Технологічний процес виготовлення печатної плати функціонального модуля

Графічне зображення	Найменування операції	Режими	Матеріали
	Вирізування заготівель		Двосторонній фольгований скло-текстоліт FR - 4 з нанесеним шаром позитивного фоторезиста
	Експонування		
	Прояв шару фоторезиста		0,0,7% - NaOH
	Травлення міді	35...50 °C ~ 1 хв.	500 г/л FeCl ₃ + 4-6% HCl
	Зняття фоторезиста	40...50 °C	3% - NaOH або 3% - KOH
	Свердління отворів		

При температурі 35...50 °C швидкості травлення міді складає 50 мкм/хв. Розчинення міді відбувається відповідно до реакції:



Травлення призводить до повного видалення міді з незахищених фоторезистом ділянок.

Топологія печатної плати розроблена на ПК за допомогою програми Sprint Layout 4.0. Безпосередньо з неї виготовляються фотошаблони. Креслення топології пристрою для відновлення стереозору представлено на рисунках 2.5 - 2.6. Розмір плати 85×85 мм.

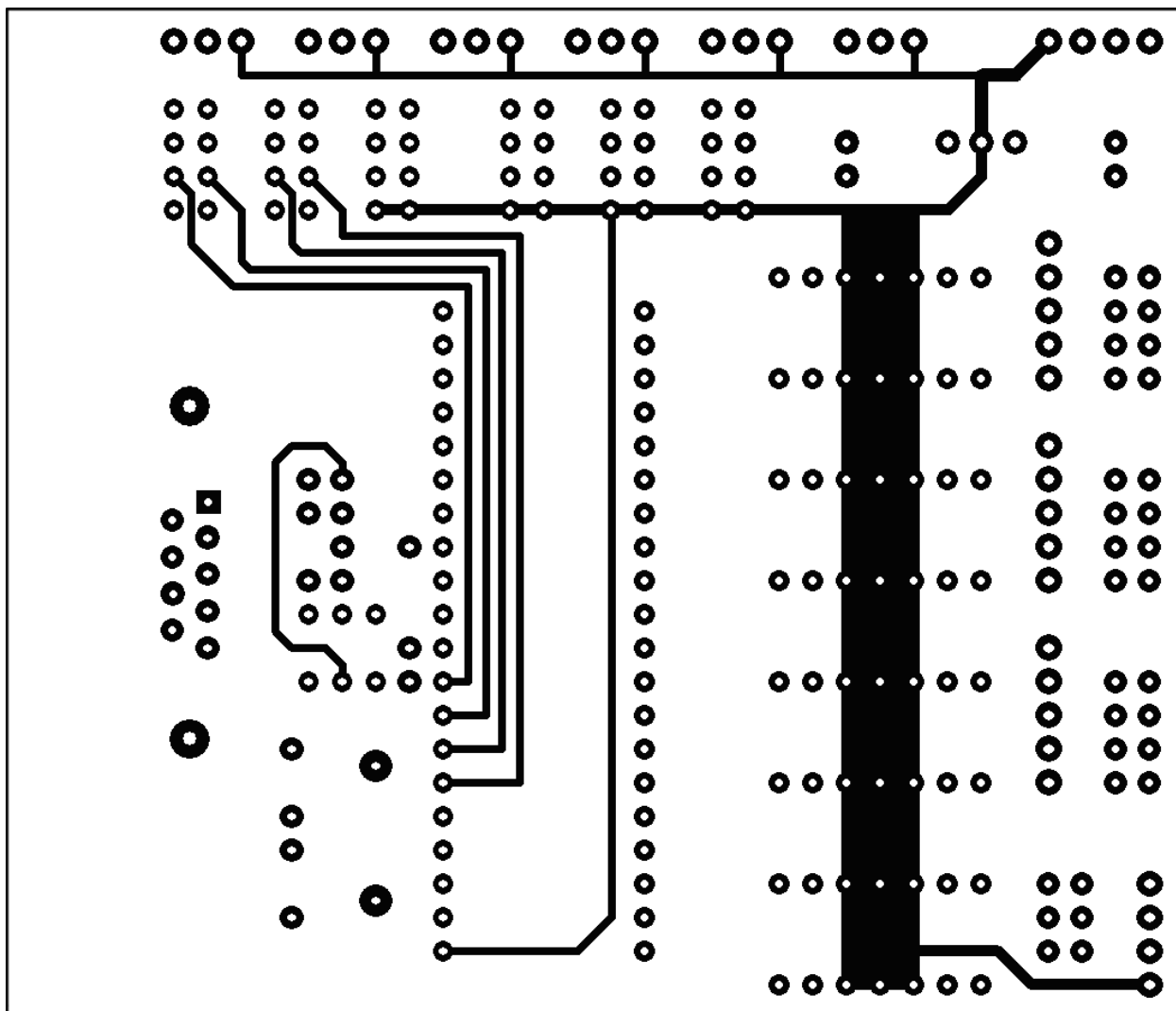


Рисунок 2.5 - Сторона монтажу навісних елементів печатної плати

Монтаж навісних елементів здійснюється відповідно до рисунку 2.7. Мікроконтролер вставляється в навісну панель для забезпечення процесу програмування.

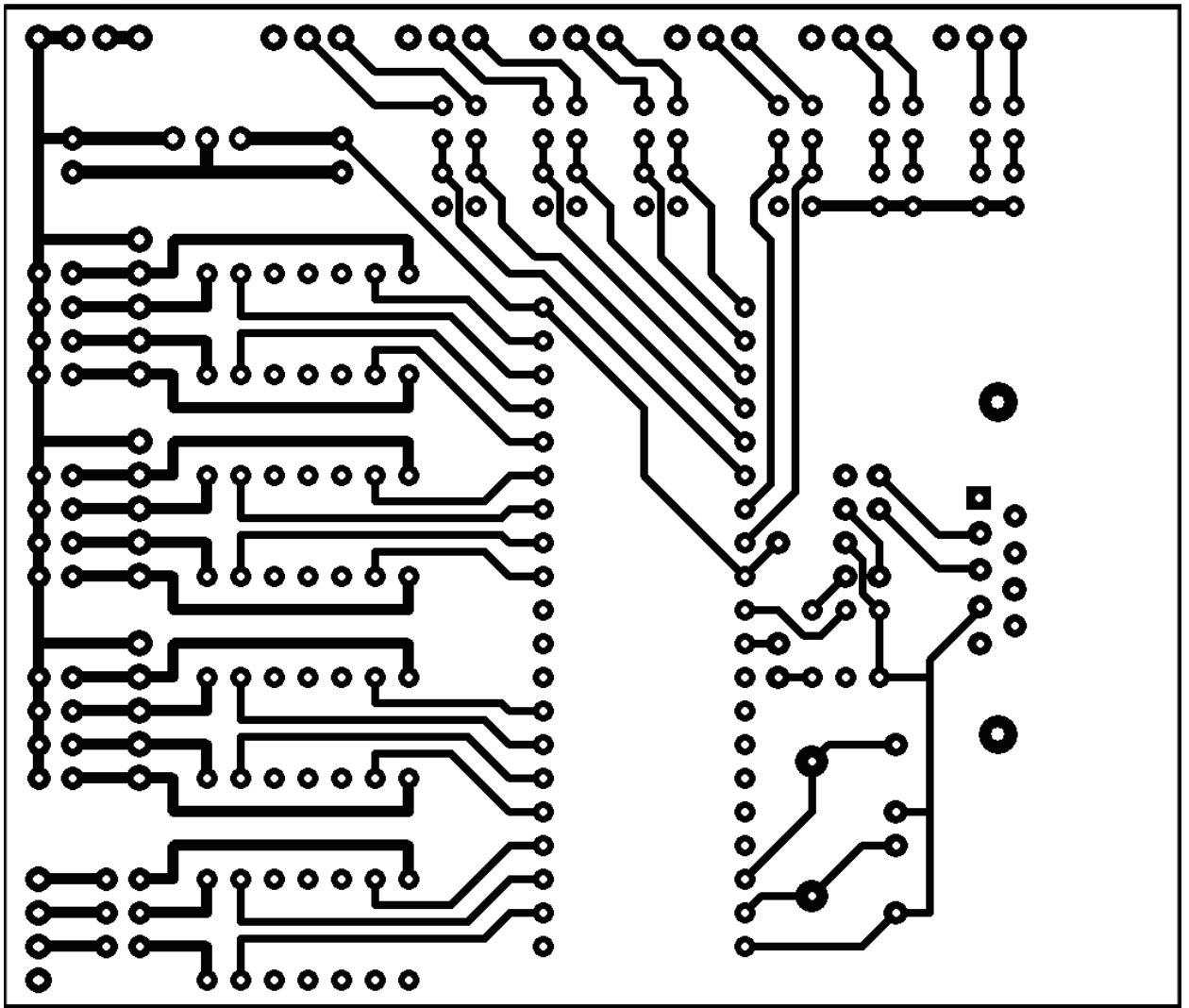


Рисунок 2.6 - Сторона пайки і струмопровідних доріжок печатної плати

2.3 Аналіз функціонування пристрою для розвитку стереозору

Після включення пристрою і запуску програми, що управляє, на ПК відбувається прив'язка модуля по кінцевих вимикачах. Корекція зору обох очей встановлюється на "0", Відстань від очей до екрану – 33 см.

Кут корекції і відстань до екрану регулюються натисненням на відповідні клавіші управління на пульті або на відповідні кнопки у вікні програми, що управляє.

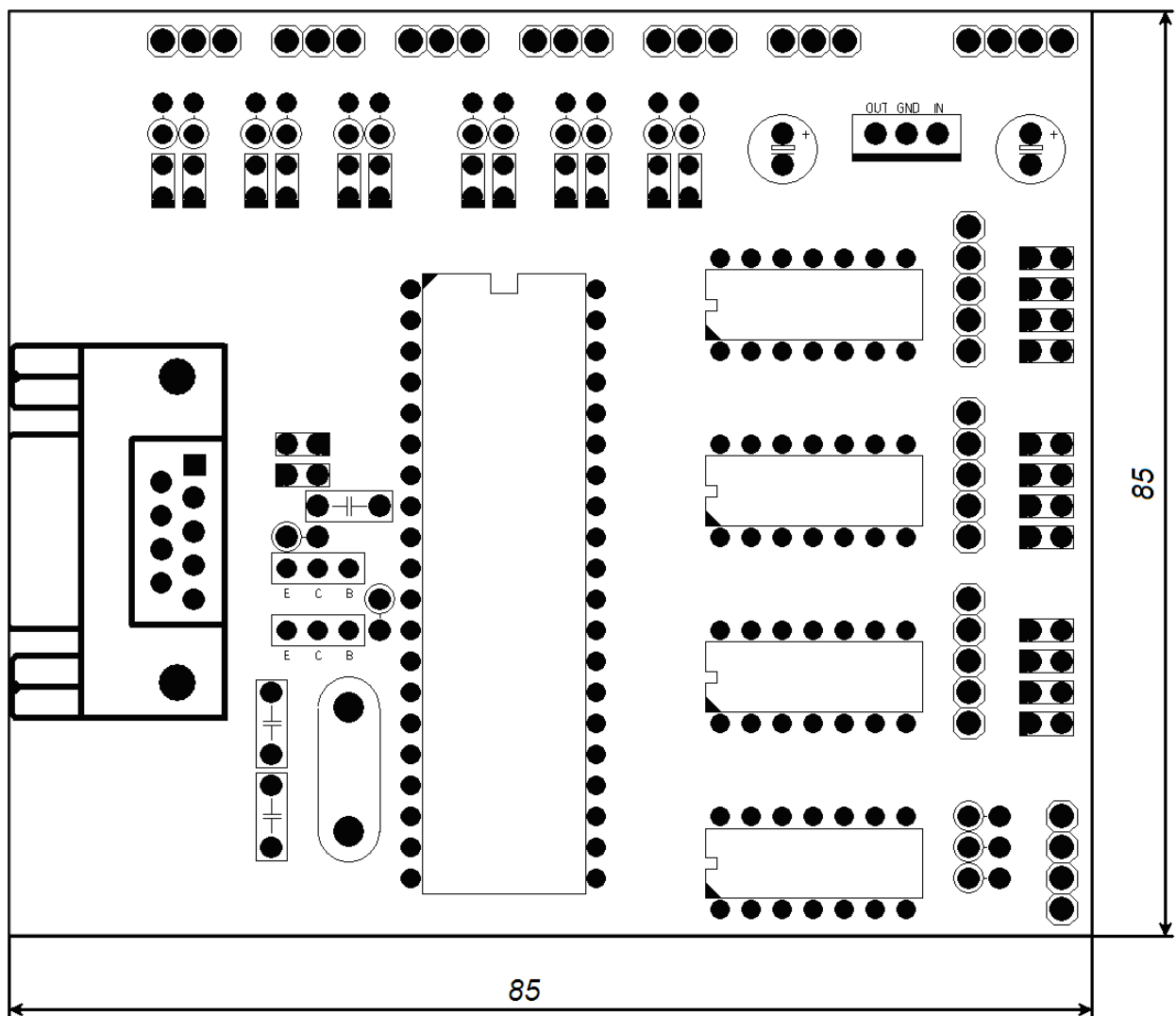


Рисунок 2.7 - Розміщення навісних елементів на печатній платі

Осцилограма струмів в обмотках крокових двигунів представлена на рисунку 2.8. Така форма імпульсів пояснюється тим, що обмотки мають індуктивність і струм набирає максимальне значення не миттєво.

2.4 Моделювання механізму переміщення тест-об'єктів

У пристрої для розвитку стереозору передбачений механізм переміщення тест-об'єктів (рис. 2.9). Конструктивно він представляє собою: консоль 1, по якій горизонтально переміщається платформа 2, від налобника до екрану по направляючих 4.

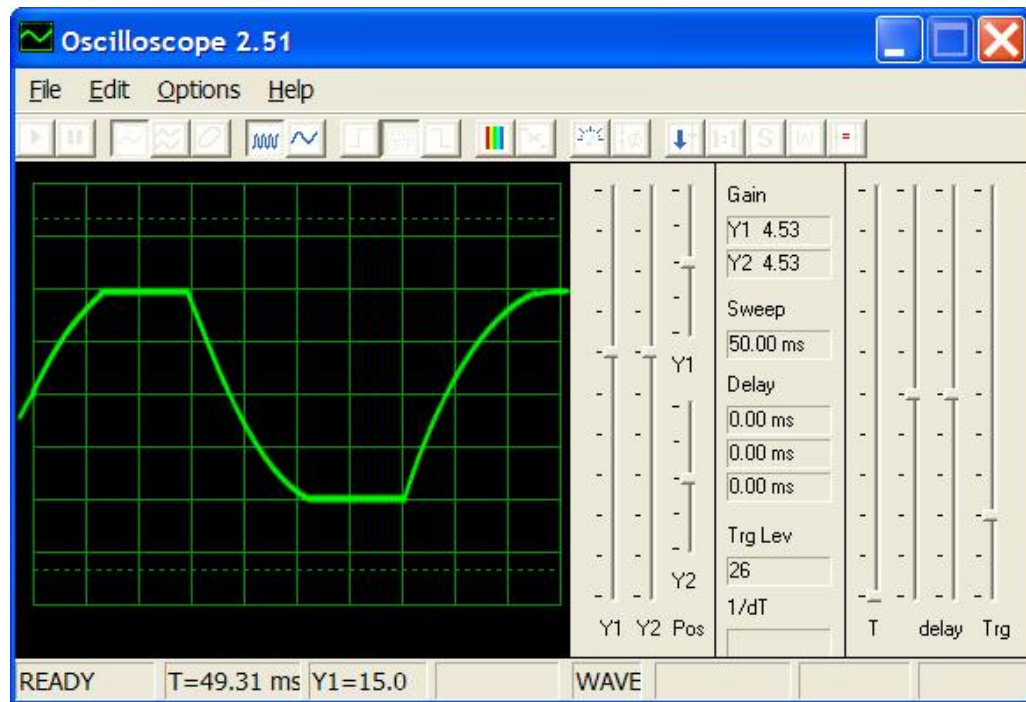


Рисунок 2.8 - Осцилограма струму в обмотках крокових двигунів

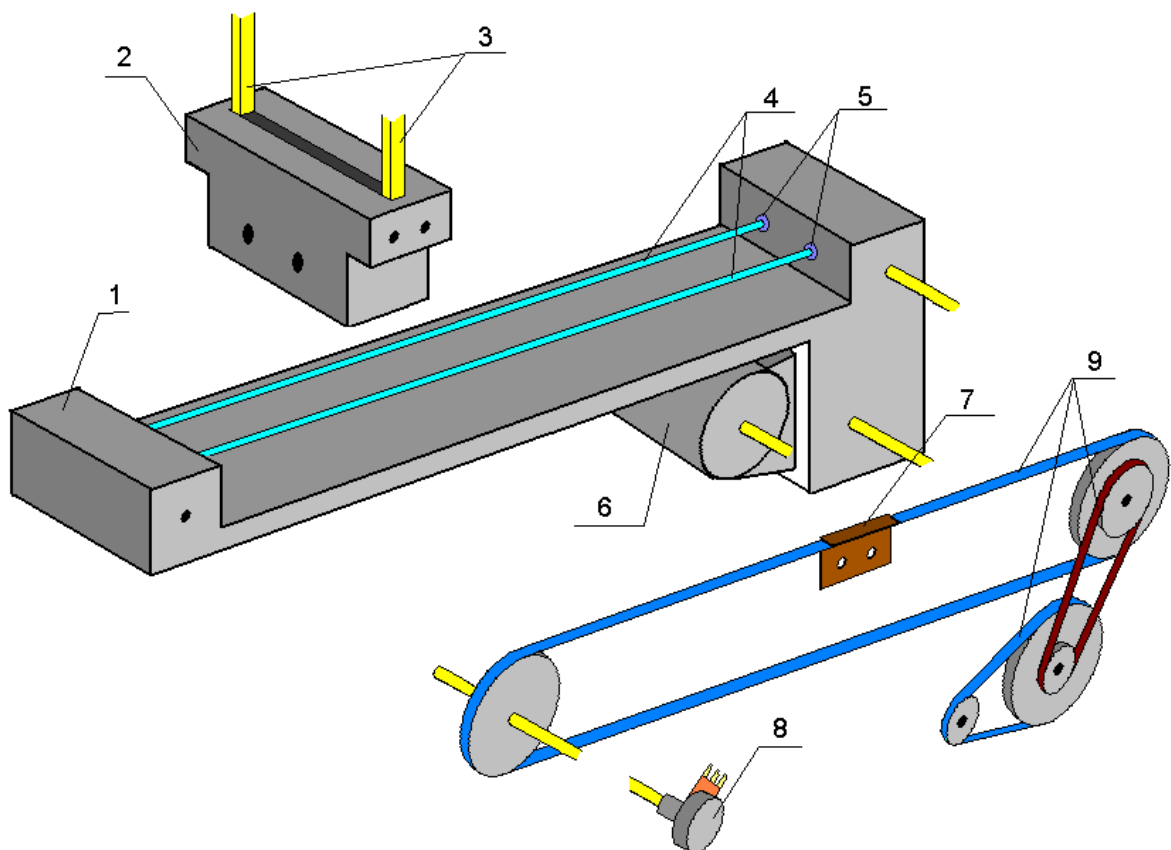
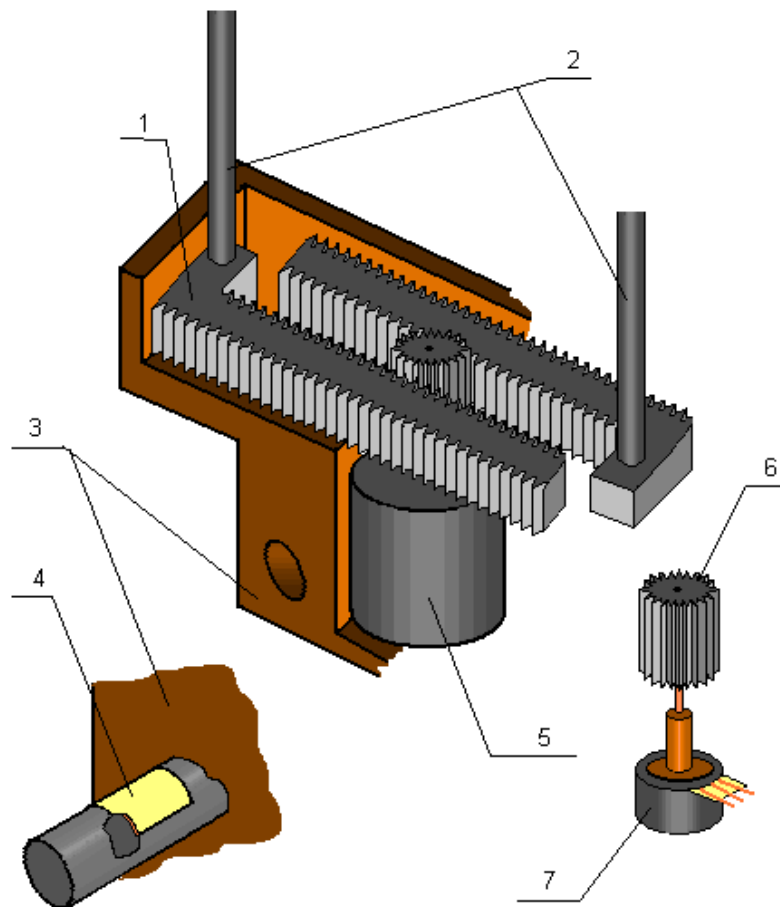


Рисунок 2.9 - Конструкція механізму переміщення тест-об'єктів

По платформі переміщаються утримувачі тест-об'єктів 3 (наближаються або віддаляться один від одного).

Переміщення платформи здійснюється двигуном 6 через механізм передачі плоским ременем 9. Вибраний механізм плавно і в будь-якому необхідному напрямі переміщає платформу, що дозволяє швидко і з високою точністю розташувати тест-об'єкти на необхідній відстані від очей.

Тест-об'єкти платформі переміщаються за допомогою зубчастої передачі (рис. 2.10).



1 - механізм зубчастого зачеплення; 2 - утримувач тест-об'єкта; 3 - корпус платформи; 4 - контакт живлення двигуна; 5 - кроковий двигун; 6 - шестерня управління движком резистора позиціонування; 7 - резистор позиціонування.

Рисунок 2.10 - Механізм управління переміщенням тест-об'єктів по платформі

Живлення крокового двигуна платформи здійснюється через направляючі 4. Одним з елементів конструкції є резистор позиціонування 7, який розміщується так, щоб його вісь приводилася в рух зубчастою, рейковою передачею через двигун 6.

Для візуального контролю за відстанню на яку пересувається платформа розроблена електрична схема, яка перетворить параметри позиціонування (рис. 2.11), що змінюються на резисторі, в необхідну відстань в сантиметрах.

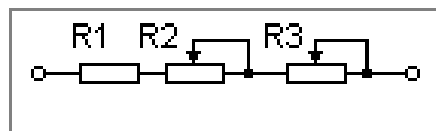


Рисунок 2.11 - Схема датчика позиціонування платформи на консолі

Постійний резистор R1 номіналом 10 Ом, змінний резистор R2 номіналом 50 Ом. Для підстроювання точнішого значення опору датчика в його схему включається додатковий резистор R3 номіналом 1 Ом.

Для виміру показань датчика використовується схема цифрового омметра (рис. 2.12). Переміщенні платформи на 1 см в будь-якому напрямі, приведе до зміни опору датчика на 1 Ом. Таким чином, рух тест-об'єктів на 1 мм приведе до зміни значення опору на 0,1 Ом.

Номінальні значення елементів схеми вимірювача відстані :

R1, R2 - 100 Ом; R3 - 820 кОм; R4 - 2 кОм; R5 - 9 кОм; R6 - 300 Ом; R7 - 200 Ом; R8 - 27 Ом; R9 - 1,2 МОм; R10 - 220 кОм; R11 - 11 кОм; R12 - 180 кОм; R13 - 1 МОм; R14 - 460 кОм; R15 - 510 кОм.

C1 - 0,01 мкФ; C2, C3 - 0,1 мкФ; C4 - 100 пФ.

VT1 - С 9013; VT2, VT3 - 201А3. F1 - 0,5 А

Живлення вимірювача відстані можна здійснити двома способами: від акумуляторної батареї або від адаптера змінної напруги 220В в постійну напругу 9В. Схема містить засоби для контролю вхідної напруги (рис. 2.13).

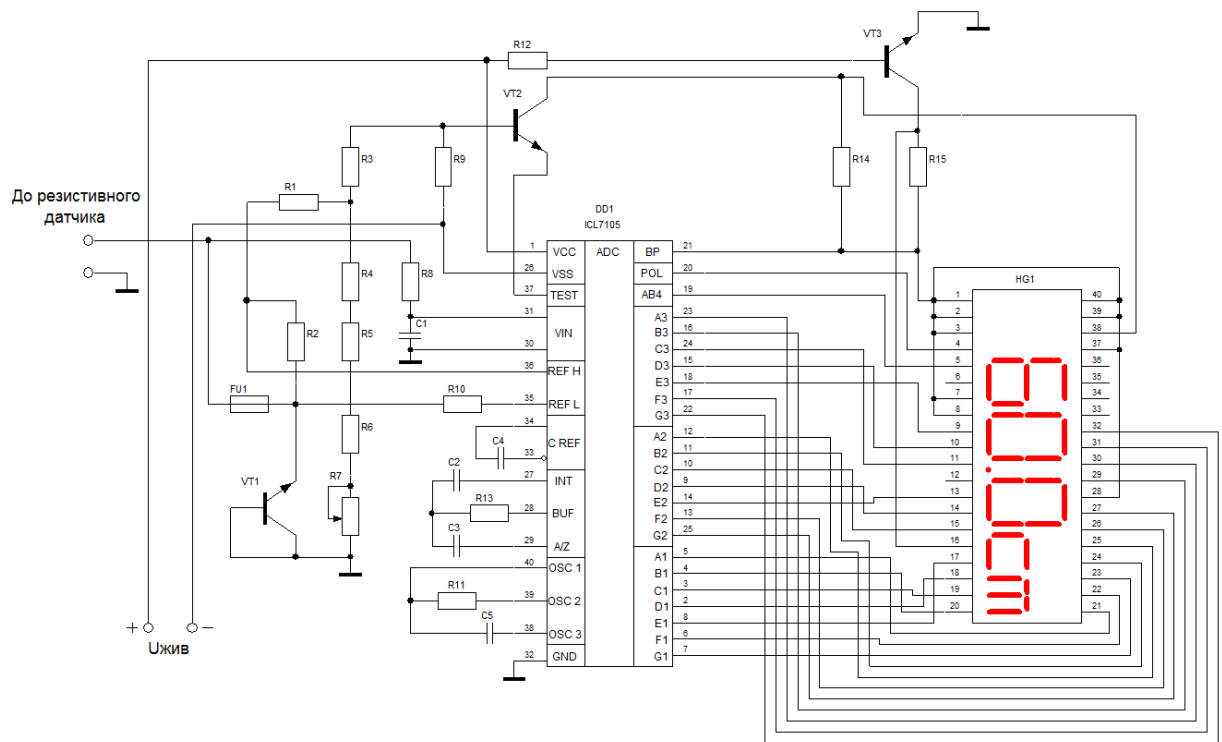


Рисунок 2.12 - Схема вимірювача відстаней

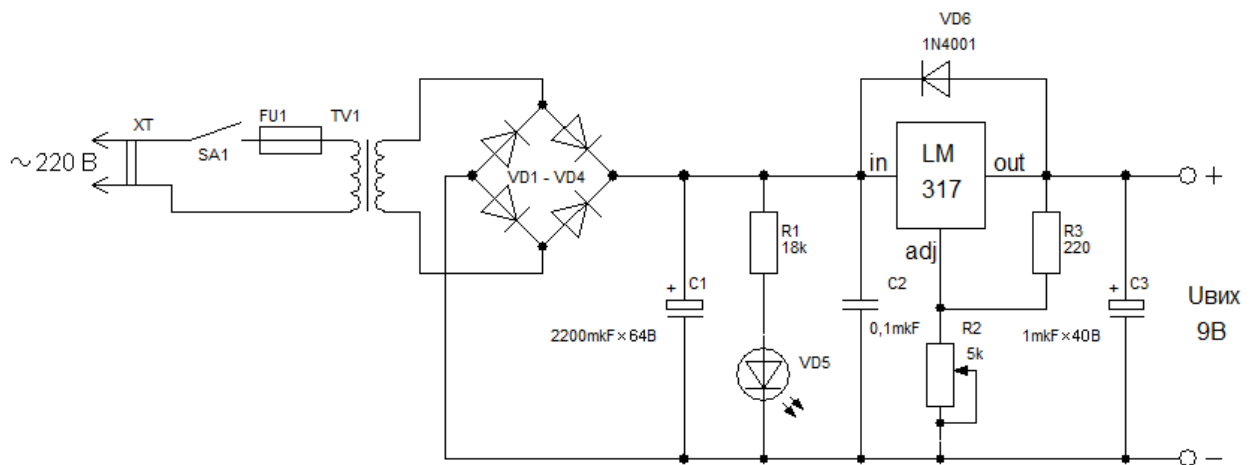


Рисунок 2.13 - Схема блоку живлення

Транзистор VT2 служить для контролю напруги живлення. Якщо напруга живлення для роботи приладу достатня, цей транзистор закритий і виведення TEST індикатора (до якого підключений символ розрядки батареї живлення) через резистор R14 сполучене з виведенням BP мікросхеми, підключене до загального електроду індикатора HG. При цьому символ розрядженої батареї не відображається. Коли напруга живлення стає нижче за до-

пустимий рівень, транзистор VT2 відкривається, і між виводами TEST і загальним елементом індикатора виникають прямокутні імпульси, висвічуючи символ розрядки батареї живлення [17].

За допомогою резистора R1 можна встановити необхідну напругу для живлення вимірювального приладу.

Контроль відстані переміщення тест-об'єктів на платформі здійснюється аналогічною схемою (рис. 2.12).

З технічних характеристик слідує що відстань між тест - об'єктами змінюється від 40 до 100 мм., тобто опір датчика складе 100 Ом (рис. 2.14). Постійний резистор R1 номіналом 40 Ом, змінний резистор R2 номіналом 60 Ом.

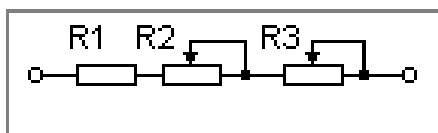


Рисунок 2.14 - Схема датчика позиціонування тест-об'єктів на платформі

Резистор R3 використовується для точнішого підстроювання опору датчика.

На рисунку 2.15 зображений зовнішній вигляд пульта управління переміщенням тест-об'єктів.

Ліва частина пульта призначена для управління переміщенням платформи, права для управління переміщенням тест-об'єктів на платформі.

Кнопками 2 і 3 здійснюється вибір напрямку руху керованих об'єктів, регулювальники 1 - дозволяють задавати швидкість пересування платформи і тест - об'єктів (кожного окремо). Кнопка 4 використовується для включення і виключення приладу.

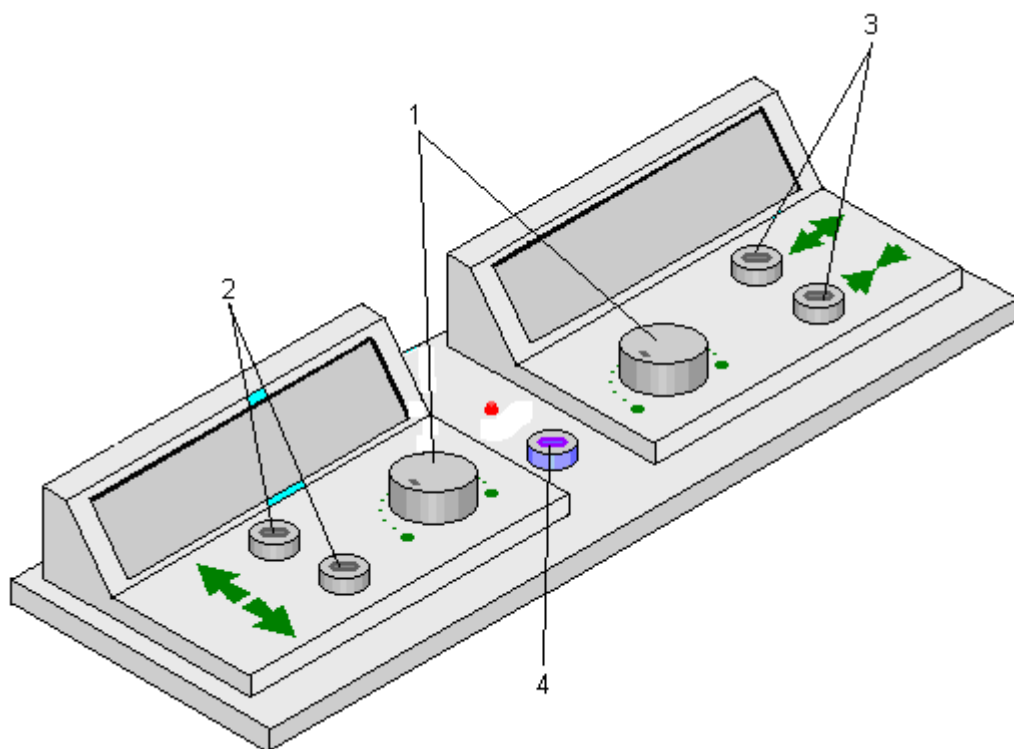


Рисунок 2.15 - Пульти управління переміщенням тест-об'єктами

2.5 Вибір крокового двигуна для призматичного компенсатора

Гібридні двигуни дорожчі, ніж двигуни з постійними магнітами і змінним магнітним опором, зате вони забезпечують меншу величину кроку, більший момент і велику швидкість. Типове число кроків на оборот для гібридних двигунів складає від 100 до 400 (кут кроку $3.6 \dots 0.9$ град.). Гібридні двигуни поєднують в собі кращі риси двигунів із змінним магнітним опором і двигунів з постійними магнітами. Ротор гібридного двигуна має зубці, розташовані в осьовому напрямі (рис. 2.16).

Ротор розділений на дві частини, між якими розташований циліндричний постійний магніт. Таким чином, зубці верхньої половинки ротора є північними полюсами, а зубці нижньої половинки - південними. Крім того, верхня і нижня половинки ротора повернені один відносно одного на половину кута кроку зубців. Число пар полюсів ротора дорівнює кількості зубців на одній з його половинок.

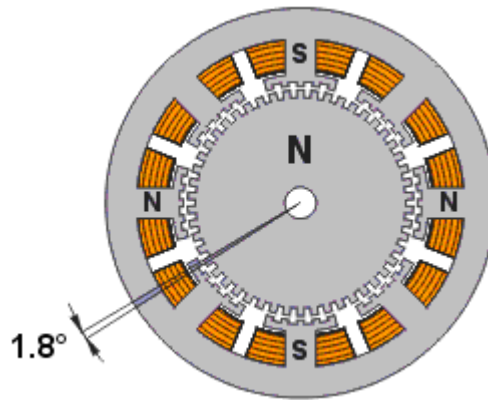


Рисунок 2.16 - Гібридний кроковий двигун

Зубчасті полюсні наконечники ротора, як і статор, набрані з окремих пластин для зменшення втрат на вихрові струми. Статор гібридного двигуна також має зубці, забезпечуючи велику кількість еквівалентних полюсів, на відміну від основних полюсів, на яких розташовані обмотки. Зазвичай використовуються 4 основні полюси для 3,6 град. двигунів і 8 основних полюсів для 1,8 і 0,9 град. двигунів. Зубці ротора забезпечують менший опір магнітного ланцюга в певних положеннях ротора, що покращує статичний і динамічний момент. Це забезпечується відповідним розташуванням зубців, коли частина зубців ротора знаходиться строго навпроти зубців статора, а частина між ними. Залежність між числом полюсів ротора, числом еквівалентних полюсів статора і числом фаз визначає кут кроку S двигуна :

$$S = 360 / (N_{ph} \times P_h) = 360 / N,$$

де N_{ph} - чило еквівалентних полюсів на фазу (число полюсів ротора), P_h - число фаз, N - повна кількість полюсів для усіх фаз разом.

Ротор показаного на рисунку двигуна має 100 полюсів (50 пар), двигун має 2 фази, тому повна кількість полюсів - 200, а крок, відповідно, 1,8 град.

Подовжній розтин гібридного крокового двигуна показаний на рисунку 2.17. Стрілками показаний напрям магнітного потоку постійного магніту ротора. Частина потоку (на рисунку показана чорною лінією) проходить через полюсні наконечники ротора, повітряні проміжки і полюсний наконечник статора. Ця частина не бере участь в створенні моменту.

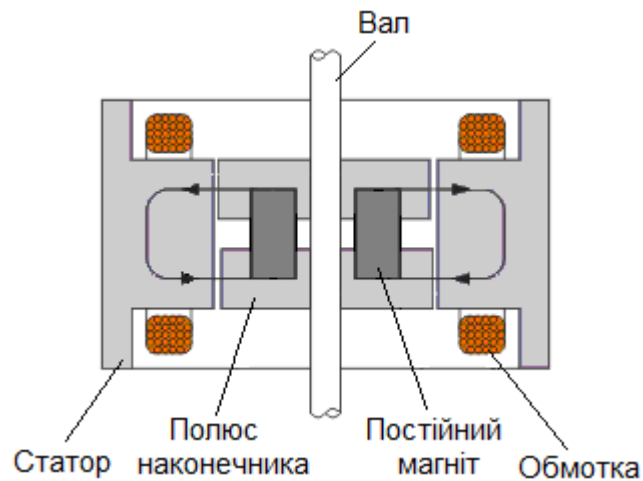


Рисунок 2.17 - Подовжній розріз гібридного крокового двигуна

Як видно на рисунку, повітряні проміжки у верхнього і нижнього полюсного наконечника ротора різні. Це досягається завдяки повороту полюсних наконечників на половину кроку зубців. Тому існує інший магнітний ланцюг, який містить мінімальні повітряні проміжки і, як наслідок, має мінімальний магнітний опір. По цьому ланцюгу замикається інша частина потоку (на рисунку показана штриховою білою лінією), яка і створює момент. Частина ланцюга лежить в площині, перпендикулярній рисунку, тому не показана. У цій же площині створюють магнітний потік котушки статора. У гібридному двигуні цей потік частково замикається полюсними наконечниками ротора, і постійний магніт його "бачить" слабо. Тому на відміну від двигунів постійного струму, магніт гібридного двигуна неможливо розмагнітити ні при якій величині струму обмоток.

Величина проміжку між зубцями ротора і статора дуже невелика - типове 0,1 мм. Це вимагає високої точності при зборці, тому кроковий двигун не варто розбирати заради задоволення цікавості, інакше на цьому його термін служби може закінчитися.

Щоб магнітний потік не замикався через вал, який проходить усередині магніту, його виготовляють з немагнітних марок стали. Вони зазвичай мають підвищену крихкість, тому з валом, особливо малого діаметру, слід поводитися з обережністю.

Для отримання великих моментів необхідно збільшувати як поле, що створюється статором, так і поле постійного магніту. При цьому вимагається більший діаметр ротора, що погіршує відношення моменту, що крутить, до моменту інерції. Тому потужні крокові двигуни іноді конструктивно виконують з декількох секцій у вигляді етажерки. Момент, що крутить, і момент інерції збільшуються пропорційно кількості секцій, а їх відношення не погіршується.

Таким чином, для електронного забезпечення точності виставляння кута відхилення променя призмою найбільш відповідним є гібридний кроковий двигун. При цьому робота його має бути забезпечена в мікрокроковому режимі.

2.6 Забезпечення мікрокрокового режиму двигунів призматичного компенсатора

Мікрокроковий режим забезпечується шляхом отримання поля статора, що обертається плавніше, ніж в повно- або напівкроковому режимах. В результаті забезпечуються менші вібрації і практично безшумна робота аж до нульової частоти. До того ж менший кут кроку здатний забезпечити точніше позиціонування. Існує багато різних мікрокрокових режимів, з величиною кроку від $1/3$ повного кроку до $1/32$ і навіть менше. Кроковий двигун є синхронним електродвигуном. Це означає, що положення рівноваги нерухомого ротора співпадає з напрямом магнітного поля статора. При повороті поля статора ротор теж обертається, прагнучи зайняти нове положення рівноваги.

Щоб отримати потрібний напрям магнітного поля, необхідно вибрати не лише правильний напрям струмів в котушках, але і правильне співвідношення цих струмів.

Якщо одночасно живлять дві обмотки двигуна, але струми в цих обмотках не рівні (рис. 2.18), то результируючий момент буде

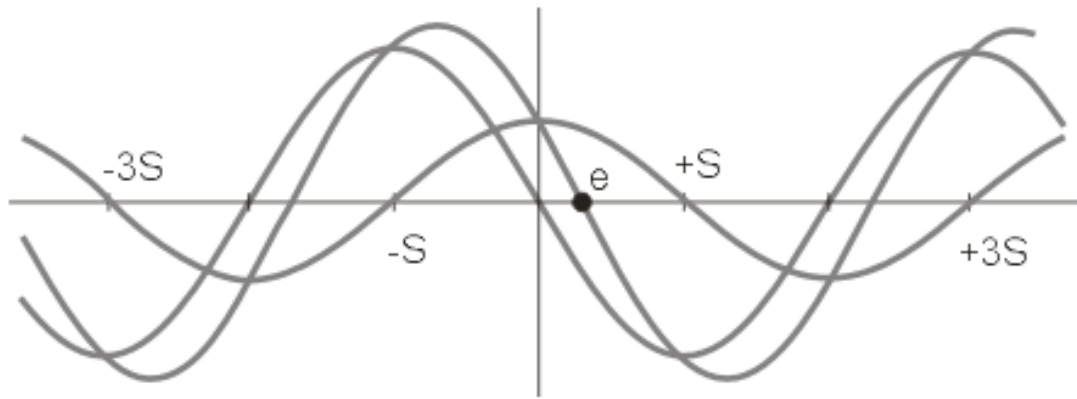


Рисунок 2.18 - Залежність моменту від кута повороту ротора у разі різних значень струму фаз

$$T_h = (a^2 + b^2)^{0.5},$$

а точка рівноваги ротора зміститься в точку:

$$x = (S / (\pi/2)) \arctan(b / a),$$

де a і b - момент, що створюється першою і другою фазою відповідно, T_h - результуючий момент утримання, x - положення рівноваги ротора в радіанах, S - кут кроку в радіанах.

Зміщення точки рівноваги ротора говорить про те, що ротор можна зафіксувати в будь-якій довільній позиції. Для цього треба лише правильно встановити відношення струмів у фазах. Саме цей факт використовується при реалізації мікрокрокового режиму.

Ще раз треба відмітити, що приведені вище формули вірні тільки у тому випадку, якщо залежність моменту від кута повороту ротора синусоїдальна і якщо жодна частина магнітного ланцюга двигуна не насичується.

У межі, кроковий двигун може працювати як синхронний електродвигун в режимі безперервного обертання. Для цього струми його фаз мають бути синусоїдальними, зрушеними один відносно одного на 90 град.

Результатом використання мікрокрокового режиму є набагато плавніше обертання ротора на низьких частотах. На частотах в 2 - 3 рази вище за власну резонансну частоту ротора і навантаження, мікрокроковий режим дає незначні переваги в порівнянні з полу- або повнокроковим режимами. Причи-

ною цього є дія інерції ротора і навантаження, що фільтрує. Система з кроковим двигуном працює подібно до фільтру нижніх частот. У мікрокроковому режимі можна здійснювати тільки розгін і гальмування, а основний час працювати в повнокроковому режимі. До того ж, для досягнення високих швидкостей в мікрокроковому режимі вимагається дуже висока частота повторення мікрокроків, яку не завжди може забезпечити мікроконтролер, що управляє. Для запобігання перехідним процесам і втраті кроків, перемикання режимів роботи двигуна (з мікрокрокового режиму в повнокроковий і тому подібне) необхідно виробляти в ті моменти, коли ротор знаходиться в положенні, відповідному одній включеній фазі. Деякі мікросхеми драйверів мікрокрокового режиму мають спеціальний сигнал, який інформує про таке положення ротора. Наприклад, це драйвер A3955 фірми Allegro.

У багатьох застосуваннях, де вимагаються малі відносні переміщення і висока роздільна здатність, мікрокроковий режим здатний замінити механічний редуктор. Часто простота системи є вирішальним чинником, навіть якщо при цьому доведеться застосувати двигун великих габаритів. Не дивлячись на те, що драйвер, що забезпечує мікрокроковий режим, набагато складніше за звичайний драйвер, все одно система може виявитися простішою і дешевішою, чим кроковий двигун, плюс редуктор. Сучасні мікроконтролери іноді мають вбудовані ЦАП, які можна використовувати для реалізації мікрокрокового режиму замість спеціальних контролерів. Це дозволяє зробити практично однаковою вартість устаткування для повнокрокового і мікрокрокового режимів.

Іноді мікрокроковий режим використовується для збільшення точності величини кроку понад заявлену виробником двигуна. При цьому використовується номінальне число кроків. Для підвищення точності використовується корекція положення ротора в точках рівноваги. Для цього спочатку знімають характеристику для конкретного двигуна, а потім, змінюючи співвідношення струмів у фазах, коригують положення ротора індивідуально для кожного кроку. Такий метод вимагає попереднього калібрування і додаткових ресур-

сів мікроконтролера, що управляє. Крім того, вимагається датчик початкового положення ротора для синхронізації його положення з таблицею коефіцієнтів, що коригують.

На практиці при здійсненні кожного кроку ротор не відразу зупиняється в новому положенні рівноваги, а здійснює затухаючі коливання навколо положення рівноваги. Час встановлення залежить від характеристик навантаження і від схеми драйвера. У багатьох застосуваннях такі коливання є небажаними. Позбавитися від цього явища можна шляхом використання мікрокрокового режиму. На рис. 2.19 показані переміщення ротора при роботі в повнокроковому і мікрокроковому режимах.

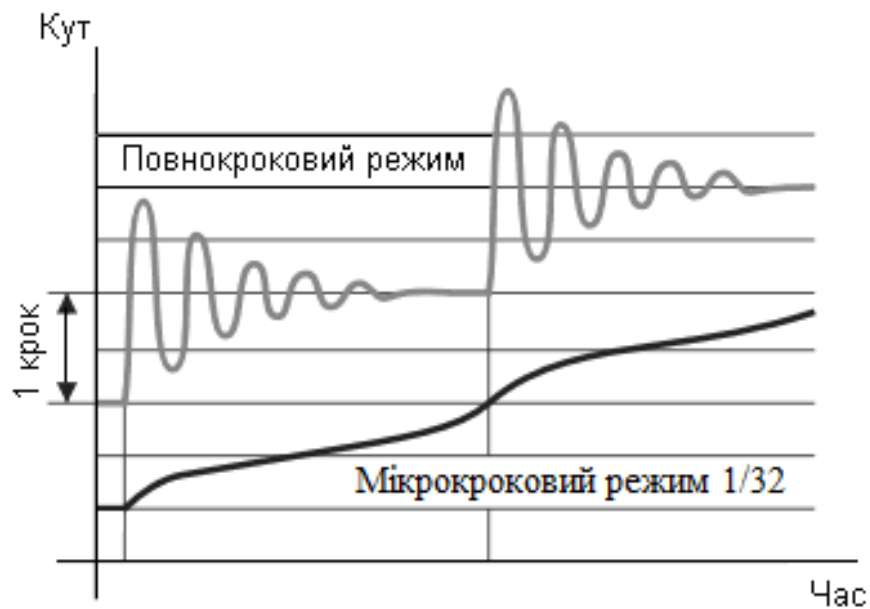


Рисунок 2.19 - Переміщення ротора в повнокроковому і мікрокроковому режимах

Видно, що в повнокроковому режимі спостерігаються викиди і коливання, тоді як в мікрокроковому режимі їх немає. Проте і в цьому режимі графік положення ротора відрізняється від прямої лінії. Ця погрішність пояснюється погрішністю геометрії деталей двигуна і може бути зменшена шляхом проведення калібрування і наступної компенсації шляхом коригування струмів фаз.

На практиці існують деякі чинники, що обмежують точність роботи приводу в мікрокроковому режимі. Деякі з них відносяться до драйвера, а деякі безпосередньо до двигуна.

Зазвичай виробники крокових двигунів вказують такий параметр, як точність кроку. Точність кроку вказується для положень рівноваги ротора при двох включених фазах, струми яких рівні. Це відповідає повнокроковому режиму з перекриттям фаз. Для мікрокрокового режиму, коли струми фаз не рівні, ніяких даних зазвичай не приводяться.

Ідеальний кроковий двигун при живленні фаз синусоїдальним і косинусоїдальним струмом повинен обертатися з постійною швидкістю. У реального двигуна в такому режимі спостерігатимуться деякі коливання швидкості. Пов'язано це з нестабільністю повітряного проміжку між полюсами ротора і статора, наявністю магнітного гістерезису, що призводить до погрешностей величини і напрямку магнітного поля і так далі. Тому положення рівноваги і момент мають деякі відхилення. Ці відхилення залежать від погрешності форми зубців ротора і статора і від застосованого матеріалу магнітопроводів.

Конструкція деяких двигунів оптимізована для найкращої точності в повнокроковому режимі і максимального моменту утримання. Спеціальна форма зубців ротора і статора спроектована так, щоб в положенні рівноваги для повнокрокового режиму магнітний потік сильно зростав. Це призводить до погіршення точності в мікрокроковому режимі. Кращі результати дозволяють отримати двигуни, у яких момент утримання в знеструмленому стані менший.

Відхилення можна розділити на два види: відхилення величини магнітного поля, які приводять до відхилень моменту утримання в мікрокроковому режимі і відхилення напрямку магнітного поля, які призводять до відхилень положення рівноваги. Відхилення моменту утримання в мікрокроковому режимі зазвичай складають 10 - 30% від максимального моменту. Треба сказати, що і в повнокроковому режимі момент утримання може коливатися на 10 - 20 % внаслідок спотворень геометрії ротора і статора.

Якщо виміряти положення рівноваги ротора при обертанні двигуна по і проти годинникової стрілки, то вийдуть дещо різні результати. Цей гістерезис пов'язаний в першу чергу з магнітним гістерезисом матеріалу сердечника, хоча свій вклад вносить і тертя. Магнітний гістерезис призводить до того, що магнітний потік залежить не лише від струму обмоток, але і від попереднього його значення. Погрішність, що створюється гістерезисом може дорівнювати декільком мікрокрокам. Тому у високоточних застосуваннях при русі в одному з напрямів треба проходити за бажану позицію, а потім повертатися назад, щоб підхід до потрібної позиції завжди здійснювався в одному напрямі.

Введення в поле зору призмових компенсаторів дозволяє відтворити стереопсис у вигляді стійкого отримання третього - уявного зображення у осіб з нормальним бінокулярним зором, а так само отримання аналогічного ефекту у пацієнтів з косоокістю.

Розроблений пристрій дозволяє документувати в електронному вигляді результати досліджень, для подальшого аналізу, проведення моніторингу і консультацій.

Розроблена топологія печатної плати дозволяє оптимально розмістити елементну базу і реалізувати пристрій в малогабаритному корпусі.

Контроль позиціонування тест-об'єктів з високою точністю визначається схемами вимірників відстаней і візуально визначається на електронному дисплеї.

Аналіз працездатності розробленого пристрою підтверджує правильність функціонування, відповідно до заданих вимог.