

Лекція 6. Методи відновлення функцій окорухових м'язів.

1.1 Основні фізіологічні відомості

Патологія окорухаючого апарату і порушення бінокулярного зору займають значну питому вагу в структурі захворювань органу зору у дітей - друге місце після аномалій рефракції. Найбільш частою формою розладу бінокулярного зору є співдружна косоокість, яка зустрічається у 1,5 - 2,5% усіх дітей.

Ефективність лікування порушень окорухового апарату ще недостатня. Літературні данні свідчать про те, що хірургічне виправлення неакомодаційної косоокості ефективне в 30 - 65% випадків, при цьому одночасний і бінокулярний характер зору вдається отримати у 1/3 хворих. У половини хворих після оперативного втручання відсутній повний косметичний ефект, а у 2/3 хворих не виникає функціонального одужання. Тому проблема удосконалення існуючих і пошуку нових методів лікування хворих з цією патологією має велике медичне і соціальне значення.

Окрім монокулярних і бінокулярних порушень в усіх випадках співдружньої косоокості страждають і окорухові м'язи з порушенням їх електрозбудливості, що не враховується в більшості випадків лікування [1].

1.1 Використання електричних імпульсів для стимуляції роботи окорухових м'язів

Для лікування косоокості без оперативних втручань застосовуються спеціальні оптичні пристрої і електронні стимулюючі апарати [2]. Використання електричних імпульсів для стимуляції роботи окорухових м'язів дозволяє відновити ослаблені скорочувальні функції м'язів і отримати позитивний терапевтичний ефект [3].

Електростимуляція (електрогімнастика) - складова частина комплексного лікування - це посилення діяльності органів або систем організму шляхом роздратування їх електричним струмом. У офтальмології її застосовують як метод дії імпульсним електричним струмом, що викликає скорочення м'яза [4].

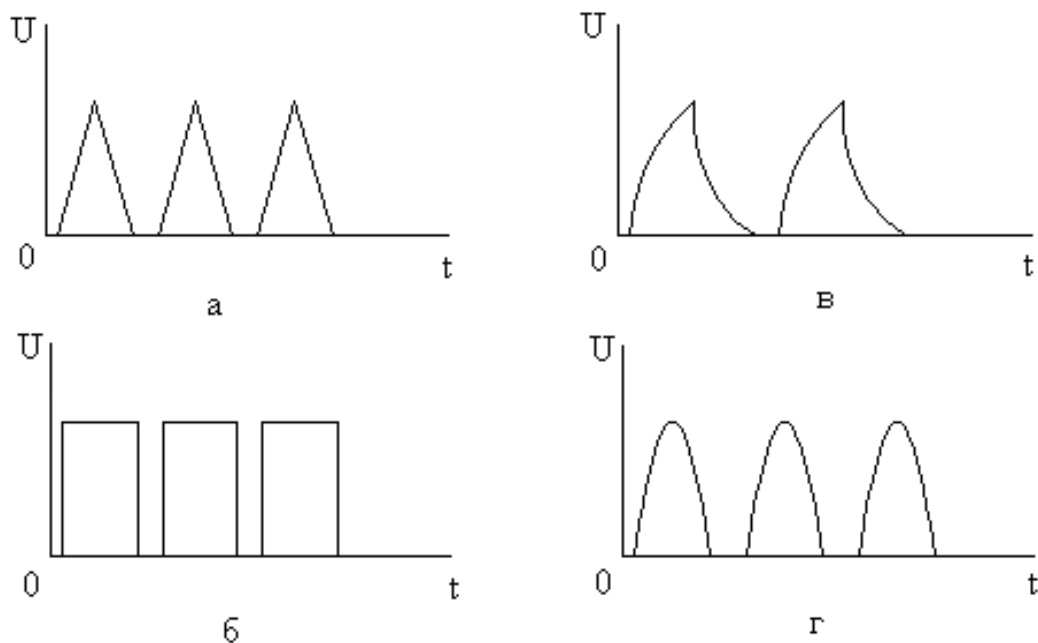
Суть методу електростимуляції полягає в дії електричного струму на фізіологічні точки, що підвищує гостроту зору. При цьому покращується провідність зорового нерва, який передає інформацію від ока до кори головного мозку. Електростимуляція розслабляє і циліарний м'яз ока. А це дозволяє ліквідувати спазм акомодатії, кровообіг посилюється і усі структури очного яблука краще забезпечуються поживними речовинами.

Механізм лікувальної дії електростимуляцій різноманітний. Усе що відомо про фізіологічні реакції тканин організму, у відповідь на підведення до них енергії струмів низької напруги в імпульсному режимі, дозволяє говорити про те, що стимулюючий вплив імпульсного струму не міг не відбитися на стані апарату акомодатії, а також на процесах обміну і кровообігу в сітківці і зоровому нерві, що проявляється поліпшенням гостроти зору у ряду хворих. Але провідне значення в механізмі дії належить змінам моторики, що виражаються в поліпшенні рухової функції стимульованого м'яза [3].

У основі збудливості нервово-м'язового апарату лежать складні фізико-хімічні процеси, обумовлені порушенням рівноваги іонної концентрації і зміною міри набрякання оболонок нерва і його волокон. Іони калію і натрію, досягнувши певної концентрації, викликають явище збудження, а іони кальцію і магнію, навпаки, знижують збудливість тканин. При швидкому наростанні струму концентрація іонів у полюсів клітини різко змінюється і викликає її збудження [5]. Миттєве включення і виключення постійного струму, діючого на м'яз або руховий нерв, викликає скорочення м'яза. Під впливом роздратування імпульсним струмом хвиля збудження швидко поширюється по м'язових волокнах, відбувається пасивне скорочення м'яза, спостерігається поступове відновлення ослабленої скорочувальної функції

м'язів. Одночасно з'являється властиве однонапрямленому струму судинорозширювальна дія і поліпшення кровопостачання м'язової тканини, активізація обмінних окислювально-відновних процесів. Відбувається відновлення трофіки і чутливості нервово-м'язових структур [6].

Для електростимуляції в офтальмології застосовують імпульсні струми різної форми: прямокутної, експоненціальної, загостреної, синусоїдальної (рис. 1.1) [5].



- а - струм трикутної форми;
- б - струм прямокутної форми;
- в - струм експоненціальної форми;
- г - струм синусоїдальної форми

Рисунок 1.1 - Графічне зображення основних видів імпульсних струмів, використовуваних для електростимуляції

Їх характеристики наступні: тетанізуючий струм загостреної форми - частота імпульсів до 10 Гц, тривалість імпульсів 1 мс; експоненціальний струм - струм Лапіка, плавно наростаючою і спадаючою форми - частота імпульсів 5-80 Гц, тривалість імпульсів 3-60 мс; імпульсний струм прямокутної форми - струм Ледюка - частота імпульсів 0,1-1 мс;

синусоїдальний струм - частота імпульсів 10-150 Гц, тривалість імпульсів 1-3 мс.

Імпульсні струми по мірі зростання роздратування розташовуються так: тетанізуючої, експоненціальної, синусоїдальної, прямокутної форми.

Залежно від характеру і ступеня ураження нервово-м'язового апарату ока визначається і вибір того або іншого виду імпульсного струму для електростимуляції. При цьому виходять із здатності акомодатії м'яза або нерва (адаптація до роздратування). Чим нижче здатність м'яза до акомодатії, тим більше фізіологічними для неї будуть імпульси з поступово наростаючою крутизною - експоненціальні.

Поріг роздратування ними нижче, ніж прямокутних, дія їх менш хворобливо, не викликає виснаження м'яза.

Залежно від характеру і ступеня ураження нервово-м'язового апарату ока визначається і вибір того або іншого виду імпульсного струму для електростимуляції. При цьому виходять із здатності акомодатії м'яза або нерва (адаптація до роздратування). Чим нижче здатність м'яза до акомодатії, тим більше фізіологічними для неї будуть імпульси з поступово наростаючою крутизною - експоненціальні. Поріг роздратування ними нижче, ніж прямокутних, дія їх менш хворобливо, не викликає виснаження м'яза.

При електростимуляції слід чергувати, модулювати посилку імпульсів з паузами, оскільки тривале скорочення веде до порушення живлення м'яза, виснаження і посилення атрофії [7]. Частота модуляцій і тривалість імпульсів, як і вид струму, визначаються функціональним станом нервово-м'язового апарату. Чим глибше порушення іннервації, тим менша частота модуляцій і триваліші імпульси.

Основними свідченнями до електростимуляції очних м'язів є: співдружність косоокості, а також його форми, що виникають повторно, після оперативного втручання; прогресуюча короткозорість; паралітична косоокість.

На практиці офтальмологи застосовують три методики електростимуляції : прямих м'язів ока; м'язи що піднімає повіку і м'язи слізних каналців. Методики безпечні, що дозволяє проводити електростимуляцію не лише дорослим, але і дітям.

Методика відновлення функцій м'язів окорухового апарату. Хворий лежить на кушетці. Місцева анестезія досягається 2-3-кратним закапуванням в кон'юнктивальну порожнину 0,25 % розчину дикаїну. Позитивний електрод зі свинцевої пластини розміром 20-25 см² з вологим прокладенням прикладається на шийно-потиличну область, негативний точковий електрод - на кон'юнктиву очного яблука біля місця прикріплення прямого м'яза. Сила струму підбирається індивідуально від 0,6 до 3 мА, частота імпульсів - від 30 до 100 в секунду; частота модуляції від 12 до 36 в хвилину. Форма імпульсів прямокутна, полярність пряма. Зміна частоти модуляцій, частоти імпульсів і тривалості процедури залежно від дня лікування показано в таблиці 1.1.

[illegible]

Курс лікування складається з 10 - 15 сеансів, інтервал між курсами 2 - 3 місяці. Під час стимуляції пацієнти відчують легкі мигтіння в очі і не відмічають болів в нім або неприємних відчуттів [3].

Принцип лікування цієї методики полягає в отриманні реакцій у відповідь очних м'язів на підведений до них струм низької напруги в імпульсному режимі.

Метод імпульсної терапії (табл. 1.2) заснований на застосуванні змінного синусоїдального струму середньої частоти (5000 Гц), що модулюється синусоїдальними коливаннями низької частоти (від 10 до 150 Гц).

Таблиця 1.2 - Схема електростимуляції синусоїдальними модульованими імпульсами

Дні	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Частота імпульсів	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	100	150	150	150
Тривалість сік	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
Глибина модуляції	10	10	15	15	20	20	25	25	30	30	40	40	50	50
Сила струму, мА*10	3	5	8	10	10	10	15	15	15	15	15	15	15	15
Час, мін	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Механізм фізіологічної дії синусоїдальних модульованих струмів пояснюється таким чином. Ритмічно впорядковані імпульсації з проприо- і інте-рорецепторів, що викликаються скороченням великого числа окремих м'язових волокон і безпосередньою дією струму на численні нерви області дії, сприяє пригніченню больових відчуттів, що виходять із зони патологічного осередку. В результаті посиленого відтоку продуктів обміну з

патологічного осередку зменшується набряклість - одна з причин, що викликають біль. Припинення її приводить до відновлення регулюючої ролі нервової системи, сприяє зменшенню спазму кровоносних судин - вони розширюються, покращується живлення тканин. Діючи синхронно з нормальними власними коливаннями біострумів організму, що виникають в процесі діяльності головного мозку, нервів і м'язів (від 10 до 15 Гц), і посилюючи їх дію, синусоїдальні модульовані струми відновлюють нормальну функцію органу і тканин.

Ампліпульстерапія виявляє знеболюючу, антиспазматичну, протизапальну і розсмоктуючу дію, покращує функціональний стан як центральних відділів нервової системи, так і периферичних, підвищує біоелектричну активність нервово-м'язового апарату, покращує периферичний кровообіг, стимулює процеси регенерації і відновлення функцій. Усе це пояснює широке застосування синусоїдальних модульованих струмів.

1.3 Прилади для електростимуляції очних м'язів

Для електростимуляції зовнішніх м'язів очного яблука використовується генератор АСМ- 3 [5], який виробляє імпульсні струми прямокутної і експоненціальної форми. З огляду на те, що в комплекті до апарату АСМ- 3 не передбачено спеціальних електродів для стимуляції м'язів ока, виготовляється [7] знімна насадка з латуні.

Великим і вказівним пальцями лівої руки розкривається очна щілина хворого, в правій руці чотирма пальцями утримується ручка електроду, великим пальцем регулюється сила струму.

При косоокості співдружності, що сходиться, стимулюються зовнішні прямі м'язи, при тому, що розходиться - внутрішні.

Фізіотерапевтичні відділення в основному оснащені апаратами "Ампліпульс - 3Т" [4]. Нині випускається модельний ряд

електростимуляторів від "Ампліпульс - 4" до "Ампліпульс - 10" [10]. Їх особливість синусоїдальні модульовані струми - ампліпульстерапія [7]. Такий метод імпульсної терапії заснований на застосуванні змінного синусоїдального струму середньої частоти (5000 Гц), що модулюється синусоїдальними коливаннями низької частоти (від 10 до 150 Гц).

Апарати "Ампліпульс" генерують чотири види модульованих струмів (рис. 1.2)[4].

Струм ПМ (постійна модуляція), є безперервними модульованими коливаннями; струм ПН - посилок модульованих і не модульованих коливань; струм ПЧ (частоти, що перемежаються), є чергування двох частот модуляцій (одна - 150 Гц, інша в межах 10 - 150 Гц); струм ПП (посилка-пауза) - чергування коливань з паузами.

Струм ПП викликає рухове збудження, тому застосовується для електростимуляції м'язів. Для посилення збуджуючої дії його застосовують у випрямленому режимі, що дозволяє призначати його при значній поразці рухового нейрона.

Для зменшення адаптації і звикання організму до таких струмів, підвищення ефективності лікування застосовують струми, що модулюються частотами, що безперервно чергуються.

Одна з них залишається постійною - 150 Гц, а друга регулюється в межах 10 - 150 Гц з роздільним регулюванням їх тривалості 1,5 - 5 с.

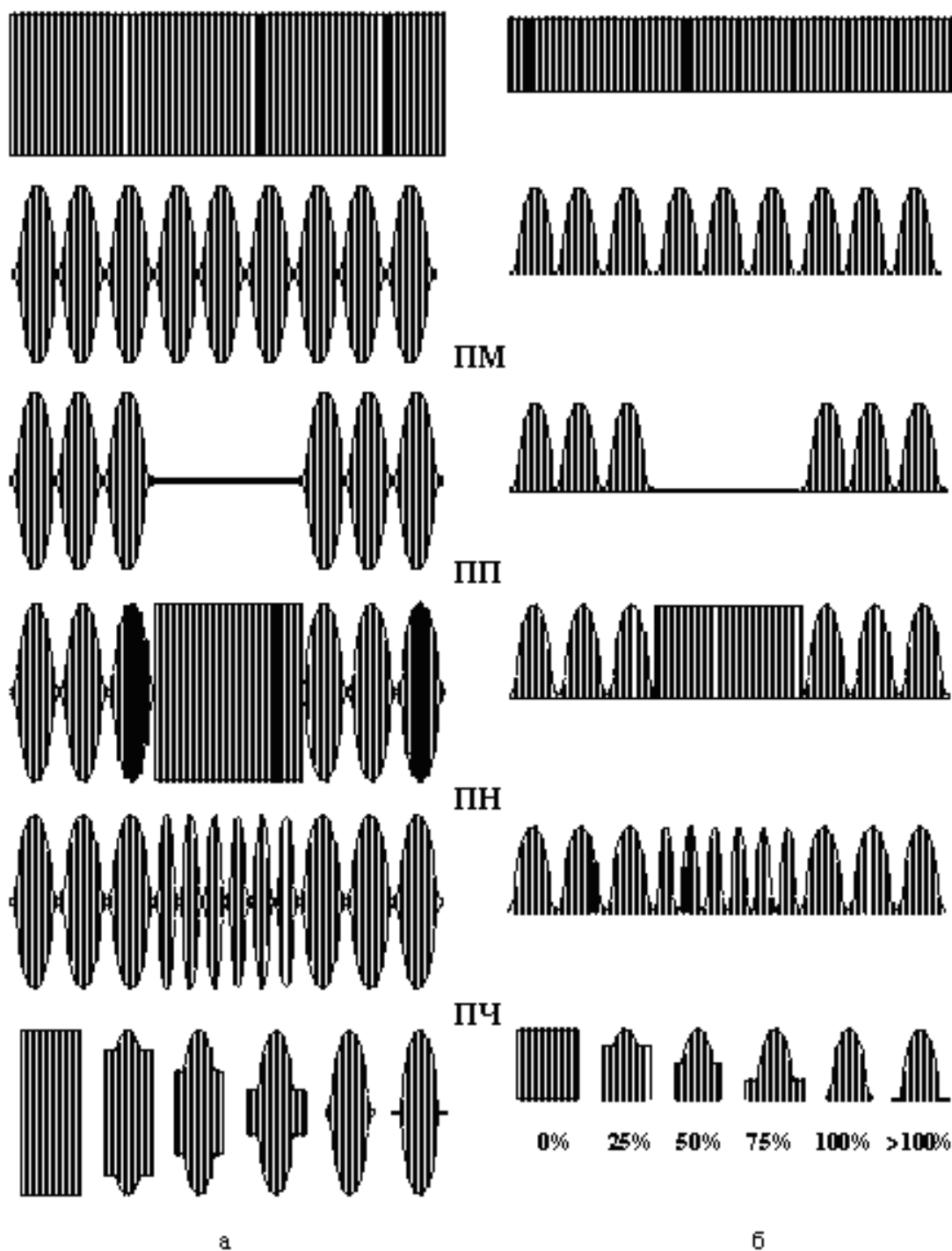
Можливо і чергування модульованих коливань струму з паузами, а також модульованих і немодульованих коливань.

Методика лікування "Ампліпульсом", аналогічна "АСМ". Відмінності лише в схемі лікування.

1.4 Методи дослідження окорухового апарату

Клінічні методи дослідження окорухового апарату в основному застосовують для діагностики початкових стадій парезу нервів, що

іннервують м'язи ока, особливо в тих випадках, коли хворі скаржаться на двоїння, але при цьому відзначається помітне відхилення ока.



а - не випрямлений режим;

б - випрямлений режим

Рисунок 1.2 - Графічне зображення основних видів синусоїдальних модульованих струмів

При косоокості співдружності застосування цих методів обмежене, їх використовують для визначення участі паретичного компонента в його походженні. Слід пам'ятати, що при тривало існуючій косоокості симулювати ознаки пареза можуть вторинні зміни в м'язах ока. Диференціювати ці стани дуже важко, тому при виявленні таких ознак краще говорити про недостатність м'яза, маючи на увазі, що за цим терміном можуть ховатися як її істинний парез, так і вторинна слабкість.

У дітей дошкільного віку про стан окорухового апарату судять по мірі рухливості очей в різні боки (визначення поля погляду). У дітей більш старшого віку з цією метою можна використовувати методи координетрії і "спровокованій" диплопії [11].

Спрощений спосіб визначення поля погляду полягає в наступному. Хворий сидить навпроти лікаря на відстані 50.60 см. Лікар фіксує лівою рукою голову обстежуваного і пропонує йому по черзі стежити кожним оком (друге око в цей час прикрите) за переміщенням в 8 напрямках предмета (олівець, ручний офтальмоскоп і т. д.), який тримає в правій руці. Про недостатність м'язи судять по обмеженню рухливості ока в ту або іншу сторону. При цьому користуються правилами, приведеними в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Правила визначення ураженого м'яза при обмеженні рухливості очей

Рухливість	Уражений м'яз	
	правого ока	лівого ока

Управо	Зовнішня пряма	Внутрішня пряма
Вліво	Внутрішня пряма	Зовнішня пряма
Вгору	Верхня пряма	чи нижня коса
Вниз	Нижня пряма	чи верхня коса
Вгору управо	Верхня пряма	Нижня коса

За допомогою цього методу можна виявити тільки виражені обмеження рухливості очей. Чіткіші результати полегшений спосіб визначення поля погляду дозволяє отримати при недостатності м'язів вертикальної дії.

При видимому відхиленні одного ока по вертикалі для виявлення паретичного м'яза можна використовувати простий спосіб абдукції - аддукції. Він заснований на тому, що піднімаюча і опускаюча дія косих м'язів найбільш виражена в положенні аддукції ока, а прямих - в положенні абдукції. Хворому пропонують дивитися на який-небудь предмет, переміщають його управо і вліво і спостерігають за тим, збільшується або зменшується вертикальна девіація при крайніх відведеннях погляду. Правила визначення ураженого м'яза приведені в таблиці 1.4

1.4.1 Метод комп'ютерної координетрии

Метод координетрии заснований на розподілі полів погляду правого і лівого ока за допомогою червоного і зеленого фільтрів, забарвлених в додаткові кольори.

Таблиця 1.4 - Правила визначення ураженого м'яза за способом абдукції-аддукції

Напрямок відхилення ока	Положення, при якому відхилення ока збільшується	Уражений м'яз
-------------------------	--	---------------

Догори	Абдукція	Нижній прямий
	Аддукція	Верхній косий
Донизу	Абдукція	Верхній прямий
	Аддукція	Нижній косий

При накладенні цих цвє-тов один на одного виникає ефект повного гасіння зображення. Метод дозволяє судити про локалізацію в просторі зображення обох очей при косоокості (рис. 1.3) [11].

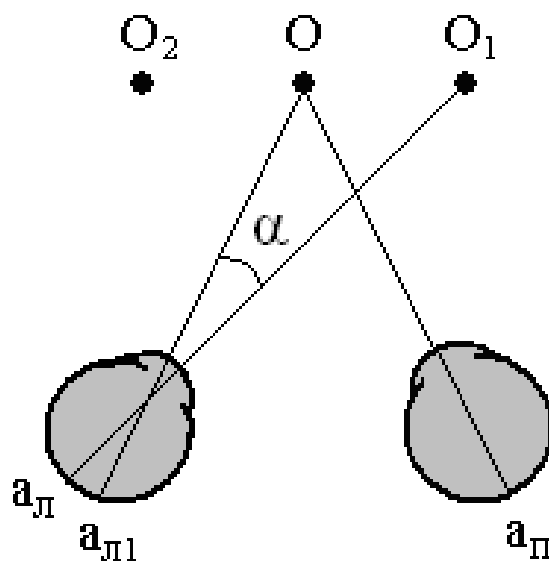
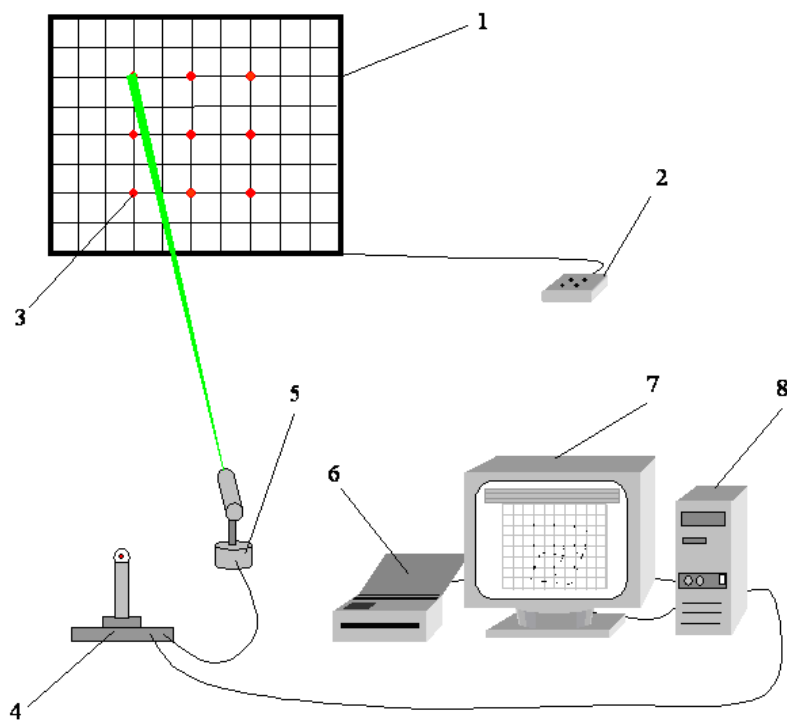


Рисунок 1.3 - Варіант локалізації зображення косячим оком

Праве око фіксує ту, що світиться точку O . Зорова лінія лівого, косячого, очі відхилена від точки фіксації управо на 20° і спрямована в точку $O1$. Очевидно, зображення точки $Про$ розташується в носовій половині сітківки косячого ока в 20° від центральної ямки. Як відомо, при нормально функціонуючому зоровому аналізаторі зображення, що знаходиться в 20° кнутри від центральної ямки сітківки, проектується в просторі на 20° кзовні від точки фіксації. За асоціацією з цими звичними просторовими співвідношеннями хворий помилково відносить лівим оком зображення

точки Про на відповідний кут у бік скроні, і воно виявиться розташованим в точці О2. Приставимо тепер до правого ока хворого червоне скло, а до лівого - зелене. Потім направимо в точку Об зелений пучок світла, дамо в руки хворому червоний ліхтарик і попросимо поєднати його промінь з точкою О. Щоб це сталося, хворий, очевидно, повинен направити пучок червоного світла на точку О2. Вказаний принцип і покладений в основу координетрії.

Для проведення дослідження необхідно мати розграфлений екран (1), червоний (2) і зелений (3) ліхтарики і червоно-зелені окуляри(рис. 1.4) [11].



1 - електронний екран, 2 - пульт управління і динамічної індикації екрану, 3 - червоно-зелені світлодіоди, 4 - джойстик управління променем світлової гармати, 5 - світлова гармата, 6 - принтер, 7 - монітор, 8 - системний блок

Рисунок 1.4 - Комп'ютерний координетричний комплекс

Дослідження виконують в напівтемній кімнаті, на одній із стін якої укріплений екран, поділений на маленькі квадрати. Розміри екрану 2×2 м,

кожного квадрата $5,25 \times 5,25$ см. При таких співвідношеннях дослідження проводять з відстані 1,15 м. В цьому випадку сторона кожного квадрату дорівнює трьом кутовим градусам.

У центральній частині екрану виділено дев'ять міток, розміщених у вигляді квадрата, положення яких відповідає ізольованій фізіологічній дії окорухаючих м'язів.

Хворий в червоно-зелених окулярах сидить на відстані 1 м від екрану. Для дослідження правого ока хворому дають в руку червоний ліхтарик (червоне скло перед правим оком). У руках у лікаря зелений ліхтарик, промінь світла, від якого він по чергову направляє в усі дев'ять точок і пропонує хворому поєднати з ним світлову пляму від свого червоного ліхтарика. При спробі поєднати обидві світлові плями обстежуваний зазвичай помиляється на якусь величину.

Положення зеленого, що фіксується, і червоного, що підрівнюється, плям лікар реєструє на схемі (аркуш міліметрового паперу), що є зменшеною копією екрану.

Результати координетричного дослідження одного ока не дозволяють судити про стан окорухового апарату. Необхідно зіставити результати координетрии обох очей з положенням усіх дев'яти точок фіксації.

З цією метою лікар і хворий обмінюються ліхтариками, і дослідження повторюють.

Аналізуючи отримані дані, необхідно пам'ятати, що недостатчність діяльності якого-небудь м'яза призводить до зміни поля погляду одного або обох очей, тому воно відрізняється від квадрата фіксації.

Поле укорочене у напрямі дії ослабленого м'яза. Одночасно зазвичай спостерігається компенсаторне збільшення поля стеження другого ока у бік синергиста ураженого м'яза. Приклади реєстрації результатів координетрического дослідження представлені на рисунках 1.5 і 1.6 [11].

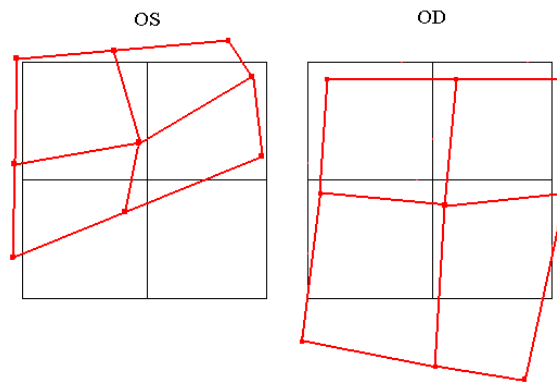


Рисунок 1.5 - Результати координетричного дослідження з діагнозом: парез верхнього косого м'яза лівого ока

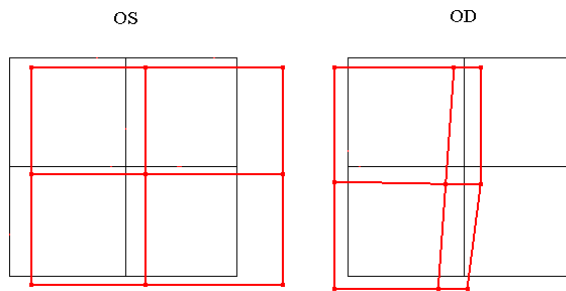


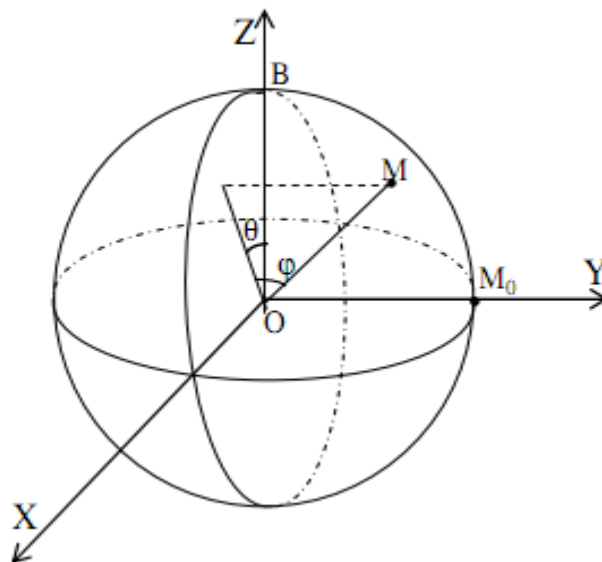
Рисунок 1.6 - Результати координетричного дослідження з діагнозом: парез зовнішнього прямого м'яза правого ока

1.5 Математична модель дії окорухових м'язів при обертаннях ока

Створення моделі дії окорухового апарату залишається серйозною проблемою в офтальмології. Така модель дозволила б хірургу прогнозувати результати операції і тим самим покращити ефект від операції та запобігти можливих ускладнень.

Очне яблуко розглядається як сфера з певним радіусом r .

Введено до розгляду декартову систему координат $OXYZ$ (рис.1.7), таким чином, що точка O збігається з центром ока, вісь OY проходить через вершину рогівки ока (точка M_0), вісь OZ проходить через вершину ока (точка B). Введено до розгляду також спеціальну сферичну систему координат, яка отримала назву офтальмографічна сферична система координат (ОССК) $\varphi\theta$.



M_0 - вершина ропвки ока;

B - вершина ока;

M - довільна точка на поверхні ока;

φ і θ - координати офтальмологічної сферичної системи координат (ОССК)

Рисунок 1.7 - Схематичне зображення моделі очного яблука

При обертаннях ока ці системи залишаються нерухомими. Аналогічні системи $OX_1Y_1Z_1$ та $\varphi_1\theta_1$, $OX_2Y_2Z_2$, $\varphi_2\theta_2$ і т.д. жорстко пов'язані з оком і обертаються разом з ним.

Будемо розглядати шість основних м'язів: горизонтальні прямі м'язи MRM та MRL ; вертикаллю прямі м'язи MRS та MRI ; Косі м'язи MOS і MOI . Місце прикріплення кожного м'яза будемо розглядати у вигляді трьох точок

на поверхні очного яблука, а самі м'язи - як трійку векторів, що виходять із цих точок під певними кутами до координатних площин.

Тобто, маємо шість груп векторів, напрямків яких (згідно з прийнятими в офтальмологічній практиці положеннями) визначається наступним чином: для групи MRM та MRL приймаємо, що напрямок тяги м'яза іде по дотичній до поверхні очного яблука в горизонтальній площині; для групи MRS та MRI прийнято, що напрямок тяги м'яза іде по дотичній у точці прикріплення і у вертикальній площині, що проходить під кутом 23° до координатної площини OYZ назад і медіально (у негативному напрямку осей OX і OY); для точок прикріплення косих м'язів (MOS і MOI) приймаємо, що напрямок тяги м'яза іде по дотичній у точці прикріплення і у вертикальній площині, що має з площиною OYZ кут 51° , вперед і медіально (по осі OX у негативному напрямку, а по осі OY - у позитивному напрямку).

5. Дія окорухових м'язів визначається величиною важелів м'язів і силою тяги кожного м'яза (довжиною вектора тяги).

Реалізація основної мети роботи призводить до розв'язання двох задач: по-перше, побудова векторів сил тяги окорухових м'язів та їх моментів у первинній позиції погляду; по-друге, з'ясування того, як вони змінюватимуться в різних системах координат, при обертаннях ока.

Згідно з вищенаведеними умовами, вектор тяги будуємо як такий, що йде уздовж прямої перетину двох площин, одна з яких є дотичною в точці прикріплення м'яза, інша - визначена напрямком тяги м'яза. З цього випливає, що вектор слід шукати як векторний добуток векторів нормальних до згаданих площин:

$$\vec{F}_i = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_i & y_i & z_i \\ A_i & B_i & C_i \end{vmatrix} \cdot t_i \cdot K_i, \quad (1.1)$$

де X_i, Y_i, Z_i – координати точки прикріплення i – го м'яза, A_i, B_i, C_i – координати нормального вектора другої площини.

Для точок прикріплення м'язів MRM та MRL необхідно прийняти $A = 0, B = 0, C = 1$. Для точок прикріплення м'язів MRS та MRI $A = \cos 23^\circ, B = -\sin 23^\circ, C = 0$. Для точок прикріплення м'язів MOS та M0I з умов випливає, що $A = \cos 51^\circ, B = \sin 51^\circ, C = 0$.

Параметр t_i – нормуючий множник, який приводить довжину кожного вектора до одиниці:

$$|t_i| = \frac{1}{\sqrt{(y_i \cdot C_i - B_i \cdot z_i)^2 + (A_i \cdot z_i - x_i \cdot C_i)^2 + (x_i \cdot B_i - A_i \cdot y_i)^2}}. \quad (1.2)$$

А знак для цього параметра обираємо такий, щоб він забезпечував правильний напрям вектора тяги - зовні від поверхні очного яблука.

K - довільний позитивний множник, який уведено для того, щоб управляти довжиною вектора.

Отже, вектор тяги, позначимо його $\vec{F}_i(Fx_i, Fy_i, Fz_i)$, у первинній позиції погляду, остаточно набирає вигляду:

$$\vec{F}_i = ((y_i C_i - B_i z_i) \vec{i} + (A_i z_i - x_i C_i) \vec{j} + (x_i B_i - A_i y_i) \vec{k}) \cdot t_i \cdot K_i. \quad (1.3)$$

Отримані в такий спосіб вектори показано на рис. 1.8. Дії м'язів у первинній позиції погляду може бути описана моментами цих векторів відносно осей координат, що знаходяться за формулами:

$$\begin{aligned} Mx_i &= -Fy_i \cdot z_i + Fz_i \cdot y_i, \\ My_i &= Fx_i \cdot z_i - Fz_i \cdot x_i, \\ Mz_i &= -Fx_i \cdot y_i + Fy_i \cdot x_i, \end{aligned} \quad (1.4)$$

де Fx_i, Fy_i, Fz_i - проекції вектора сили, що діє в i -й точці, на осі OX, OY та OZ відповідно, а Mx_i, My_i, Mz_i , - моменту цієї сили відносно відповідних осей.

Визначення того, як змінюються вектори сил тяги при обертаннях, спирається на те положення, що при обертаннях поверхні навколо нерухомого центра, нові декартові координати точок цієї поверхні в нерухомій системі координат визначаються за формулами:

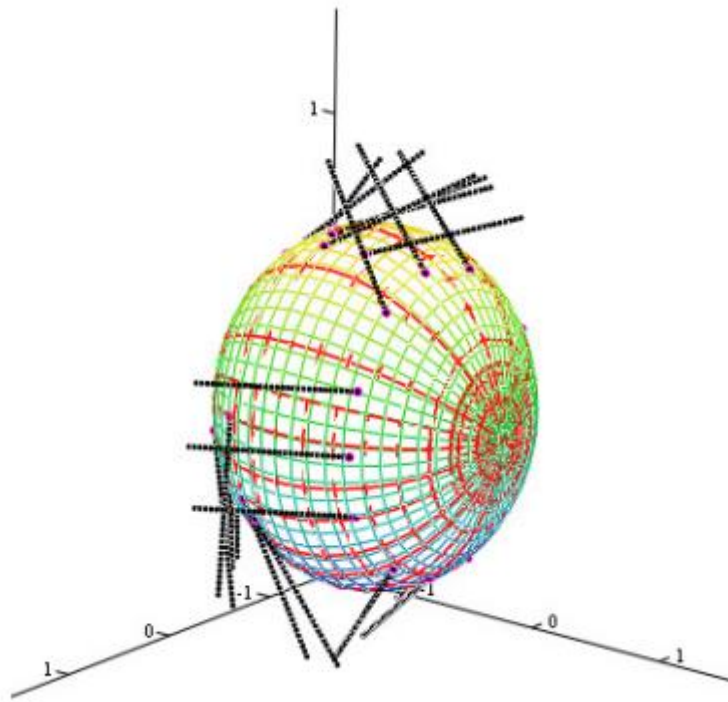


Рисунок 1.8 – Сферичне яблуко та вектори сил тяги в первинній позиції погляду

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (1.5)$$

де A - матриця перетворення координат, вигляд якої залежить від того, яким чином визначено обертання. Тоді нові сферичні координати точок прикріплення можна визначити із співвідношень

$$Q(\theta', \varphi') = A \cdot Q(\theta, \varphi), \quad (1.6)$$

де Q матриця-стовпчик.

$$Q(\alpha, \beta) = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cdot \sin \beta \\ \sin \beta \\ \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (1.7)$$

У знаходженні матриці перетворень координат A полягає основна складність цієї задачі. Її визначення може бути різним, залежно від того, які вихідні данні є в розпорядженні лікаря.

Якщо відомо, на який кут обернуто очне яблуко навколо кожної з координатних осей, то матриця A визначається як добуток матриць кожна з яких представляє перетворення координат при обертанні відповідно навколо осей OZ , OX та OY .

$$\begin{aligned} A_Z &= \begin{pmatrix} \cos \delta & -\sin \delta & 0 \\ \sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ A_X &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \eta & -\sin \eta \\ 0 & \sin \eta & \cos \eta \end{pmatrix}, \\ A_Y &= \begin{pmatrix} \cos \mu & 0 & \sin \mu \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \mu & 0 & \cos \mu \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (1.8)$$

Так, при обертанні спочатку на кут δ навколо осі OZ , а потім навколо осі OX' , у яку переходить вісь OX , на кут η і, нарешті, навколо осі OY'' - образу осі OY після двох перетворень, на кут μ (рис. 1.9), матриця A має вигляд:

$$\begin{aligned} A &= A_Z \cdot A_X \cdot A_Y = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \mu - \sin \delta \sin \eta \sin \mu & -\sin \delta \cos \eta & \cos \delta \sin \mu + \sin \delta \sin \eta \cos \mu \\ \sin \delta \cos \mu + \cos \delta \sin \eta \sin \mu & \cos \delta \cos \eta & \sin \delta \sin \mu - \cos \delta \sin \eta \cos \mu \\ -\cos \eta \sin \mu & \sin \eta & \cos \eta \cos \mu \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Слід зазначити, що в окремих випадках, коли одне або два обертання відсутні, матрицю (1.9) перетворення A можна отримати, якщо в добутку вилучити один або два з множників, наприклад: $A = A_Z \cdot A_X$, означає обертання навколо осей OZ та OX .

Якщо відомо лише, як змінюється положення якоїсь певної точки на поверхні очного яблука при його обертанні, тобто зміна її координат, тоді задача ставиться так: визначити матрицю перетворення A , що відповідає обертанню, при якому певна точка $M_1(x_1, y_1, z_1)$ перейде в положення точки $M_2(x_2, y_2, z_2)$.

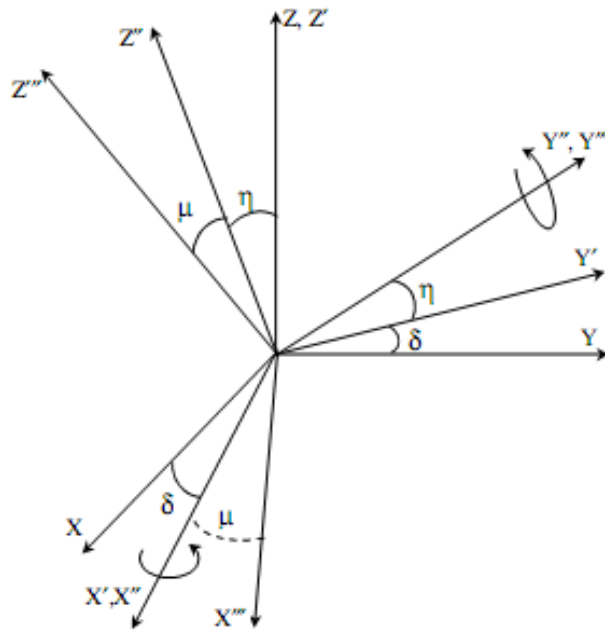


Рисунок 1.9 – Обертання навколо осей координат

Або як будуть змінюватися сферична координата точок на поверхні ока в ОССК, при обертанні, яке точку $M_1(\varphi_1, \theta_1)$ переведе в положення точки $M_2(\varphi_2, \theta_2)$.

Найбільш доцільним можна вважати обертання навколо осі, що є перпендикулярною до площини M_1OM_2 на кут $\angle M_1OM_2$ (рис. 1.10).

Як відомо, при повороті на кут ω декартової системи координат $OXYZ$ навколо осі OG , що утворює кути α, β, γ відповідно з осями координат OX , OY , та OZ , координати точки змінюються за формулою:

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{pmatrix} = \tilde{A}_G \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix}, \quad (1.10)$$

$$\tilde{A}_G = \begin{pmatrix} \cos \omega + \tau \cos^2 \alpha & \cos \gamma \sin \omega + \tau \cos \alpha \cos \beta & -\cos \beta \sin \omega + \tau \cos \alpha \cos \gamma \\ -\cos \gamma \sin \omega + \tau \cos \beta \cos \alpha & \cos \omega + \tau \cos^2 \beta & \cos \alpha \sin \omega + \tau \cos \beta \cos \gamma \\ \cos \beta \sin \omega + \tau \cos \gamma \cos \alpha & -\cos \alpha \sin \omega + \tau \cos \gamma \cos \beta & \cos \omega + \tau \cos^2 \gamma \end{pmatrix}, \quad (1.11)$$

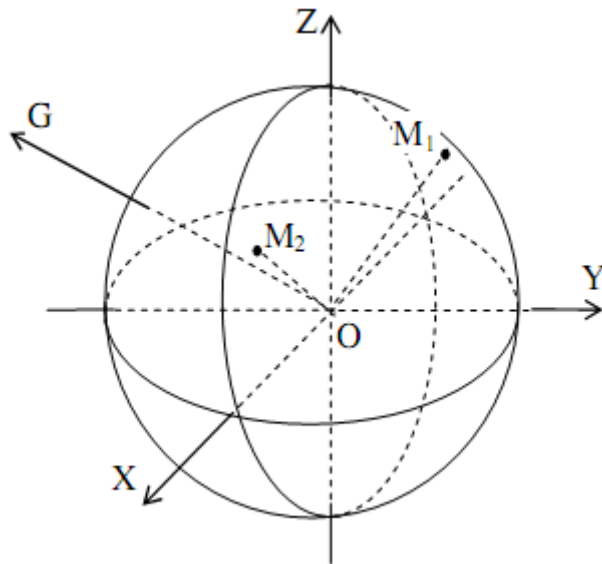


Рисунок 1.10 – Обертання навколо довільної осі

Отже, матрицю A перетворення координат точок рухомої поверхні ока в нерухомій системі координат $OXYZ$ слід шукати як обернену до матриці A_G :

$$A = A_G = \tilde{A}_G^{-1}, \quad (1.12)$$

індекс G використано задля того, щоб підкреслити, що ці матриці представляють обертання навколо допоміжної осі OG , де

$$\omega = \angle M_1 O M_2, \quad \tau = 1 - \cos \omega,$$

Направляючі косинуси осі обертання $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$ знайдемо з того, що направляючий вектор осі є векторним добутком векторів OM_1 і OM_2 , а тому:

$$\bar{N} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix}, \quad (1.13)$$

звідки після досить громіздких перетворень, з урахуванням зв'язку між декартовими та сферичними координатами, отримаємо:

$$\begin{aligned}\cos \alpha &= \frac{\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \theta_2 - \sin \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \theta_1}{|\overline{N}|}; \\ \cos \beta &= \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1) \cos \varphi_2 \cos \varphi_1}{|\overline{N}|}; \\ \cos \gamma &= \frac{\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \theta_1 - \cos \varphi_2 \sin \varphi_1 \sin \theta_2}{|\overline{N}|};\end{aligned}\tag{1.14}$$

де $|\overline{N}|$ - довжина вектора $\overline{N}$:

$$|\overline{N}| = ((\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \theta_2 - \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \theta_1)^2 + (\sin(\theta_2 - \theta_1) \cos \varphi_2 \cos \varphi_1)^2 + (\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \theta_1 - \cos \varphi_2 \sin \varphi_1 \sin \theta_2)^2)^{1/2}.\tag{1.15}$$

А $\cos \omega$ знайдемо з визначення скалярного добутку двох векторів:

$$\cos \omega = \frac{OM_1 \cdot OM_2}{|OM_1| \cdot |OM_2|},\tag{1.16}$$

або, оскільки $|OM_1| = 1$, та $|OM_2| = 1$, отримаємо:

$$\cos \omega = \cos \varphi_2 \cos(\varphi_1) \cos(\theta_2 - \theta_1) + \sin \varphi_2 \sin \varphi_1, \quad \sin \omega = \sqrt{1 - \cos^2 \omega},\tag{1.17}$$

враховуючи, що кути обертання не перевищують 180° .

Таким чином, визначаємо за формулами (1.14)-(1.17) направляючі косинуси осі обертання та кут обертання, а потім за (1.11)-(1.12) - елементи матриці перетворення декартових координат А при обертанні.

З виразів (1.11)-(1.17) можна визначити повороти ока в діагностичній позиції погляду. У такому випадку слід вказати $\theta_1 \varphi_1$ - сферичні координати переднього полюса ока в початковій позиції погляду і $\theta_2 \varphi_2$ - нові координати цієї точки після обертання. Домовимося, що полюс ока в початковій позиції має координати $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$. Наприклад, якщо узяти $\theta_1 = 0^\circ$, $\varphi_1 = 90^\circ$, $\theta_2 = 315^\circ$, $\varphi_2 = 60^\circ$, то це означає, що око повернулося так, що передній полюс ока змістився по меридіану 315° на 30° (позиція приведення-піднімання).

Але, слід зазначити, що в цьому випадку з (1.14) впливає $\beta = 90^\circ$, тобто обертання навколо осі ОУ відсутнє. Проте, коли крім зміни положення

переднього полюсу ока, має місце ще й циклодукція (обертання навколо осі ОУ), модель (1.10)-(1.17) перестає бути адекватною.

1.6 Перспектива розвитку медичного устаткування для електростимуляції очних м'язів

Перспективною є для цієї області офтальмології розробка приладу, який буде генератором експоненціальних модульованих струмів (змінний експоненціальний струм середньої частоти 5000 Гц модулюється синусоїдальними коливаннями низької частоти від 30 до 100 Гц).

У відмінності від низькочастотних струмів, що викликають сильне роздратування (відчуття паління під електродом), виражена збуджуюча дія на нервово-м'язову і судинну систему і тому погано переносимих хворими, особливо з вегетативно-судинними порушеннями, струм високої частоти не зустрічає значного опору з боку епідермісу шкіри, вільно проникає в глибину тканин, не викликає помітного роздратування шкірних рецепторів. Він добре переноситься хворими, виявляє збуджуючу дію на глибоко розташовані тканини.

Передбачається прилад виготовляти за технологією гібридних плівкових мікрозборок, що дозволить налагодити його виробництво на підприємствах електронної техніки. І як наслідок, прилад для електростимуляції очних м'язів стане доступним для лікарів офтальмологів.