

Академія наук України
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова

На правах рукопису

ЗАРУБІН Сергій Юрійович

УДК 51-76+612.813

**КЛАСИФІКАЦІЯ РОЗТАШУВАННЯ АКТИВНИХ
СИНАПТИЧНИХ ВХОДІВ НЕЙРОНІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ
РЕЄСТРАЦІЇ ВНУТРІШНЬО- І ПОЗАКЛІТИННИХ
ПОТЕНЦІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ**

05.13.09 — управління в біологічних і медичних системах
(включаючи застосування обчислювальної техніки)

Автореферат дисертації на здобуття ученого ступеня
кандидата технічних наук

Київ 1993

Ab 26.797

Робота виконана на кафедрі експериментальної фізики Дніпропетровського державного університету.

Науковий керівник: кандидат біологічних наук
КОРОГОД С. М.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ВАСИЛЬЄВ В. І.,
доктор біологічних наук
ДЕГТЯРЕНКО О. М.

Провідна організація: Інститут проблем штучного інтелекту
АН України, м. Донецьк.

Захист відбудеться «17» вересня 1993 р. о 14
годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 016.45.05
при Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова АН України
за адресою:

252028 Київ 28, проспект Науки, 41.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічному
архіві інституту.

Автореферат розіслано «11» лютого 1993 р.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00826212 (L)

спеціалізованої вченої ради

КОЗАК Л. М.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ДВ-26.797 - 1 -

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. На сьогоднішній день одним із багатьох завдань дослідження механізмів діяльності кори є задача вивчення природи процесів, що лежать в основі корекції рухової активності. Сьогодні уяви про нейрофізіологічну основу корекції з боку кори головного мозку мають досить загальний уявляючий характер. Одним із проблем вияснення механізму сенсорної корекції тонких рухів є те, як збудження по ланцугу зворотного зв'язку аферентів, що входять до кори, взаємодія з корковими нейронами, контролює виникнення рухових команд в ланцугу прямого зв'язку кора-спинномозковий шлх - м'язові волокна.

Першим кроком у вирішенні вказаної проблеми є визначення в якій області групуються активні синаптичні закінчення аферентів в корі. Від правильного вирішення цієї задачі критично залежить висновок про те, які структури контролюють виникнення рухових коротко-опинальних команд.

Відомий метод пошарового аналізу визваних потенціалів (ВП) (Nicholson, Freeman, 1975; Freeman, Nicholson, 1975), котрий досить поширений в нейрофізіології для визначення дільності джерел і стоків струму, але він заснований на внутрішньокорковому відведенні ВП. Тому розроблений і поданий в даній роботі метод класифікації розташування активних синаптичних входів нейронів за результатами реєстрації ВП з поверхні кори, тобто з мінімальним порушенням цілісності вивчаючої системи, може бути достатньо перспективним.

Мета роботи: розробка методу, алгоритмів і програм вирішення задачі класифікації розташування активних синаптичних входів нейронів при наявності різного об'єму і різного роду інформації про класи за результатами реєстрації внутрішньо- і позаклітинних потенціалів в присутності завдань з використанням математичного моделювання.

Основні завдання дослідження:

1. визначити умови, які допускають перехід від вирішення задачі класифікації в просторі невиміральної ознаки θ (координата активного синаптичного входу) до вирішення задачі класифікації в просторі виміральної ознаки U (величина внутрішньоклітинного потенціалу сами або позаклітинного потенціалу) і довести можливість рішення із заданою точністю при наявності різного об'єму і різного роду інформації про класи.

2. Побудувати критерії рішення задачі класифікації для різних об'єктів априорної інформації про класи при наявності або відсутності завад.

3. Провести аналіз умов коректного застосування обраного методу обробки потенціалів, що ресструється, для підвищення відношення сигнал/шум з метою не допустити зниження імовірності правильної класифікації.

4. Провести аналіз адекватності вибраних математичних моделей системи, що вивчається, і завад, оцінити прийнятність ідеалізацій та допущень, що приймаються.

5. Розробити комплекс програм рішення поставленої задачі класифікації на ЕОМ на основі сумісної цифрової обробки результатів обчислювальних і натурних експериментів.

6. Розробити процедуру і виробити умови коректного застосування результатів рішення модельних завдань класифікації і отриманих критеріїв на практиці для рішення нейрофізіологічних завдань, зокрема, визначення розташування активних синаптичних входів на дендритах пірамідних нейронів моторної кори з точністю, яка дозволить віднести їх локалізацію до однієї із двох обласей.

Наукова новизна

Запропоновано новий метод визначення області розташування активних синаптичних входів на дендритах пірамідних нейронів за результатами ресстрації ПП з поверхні кори в присутності завад.

Новизна роботи полягає у постановці задачі визначення області локалізації активних синаптичних входів на дендритах нейронів як задачі класифікації, де класифікаційна ознака – координата активного синаптичного входу – є невимірвальним параметром.

Оцінка розташування вищевказаної області визначається за побудованими імовірностно-статистичними критеріями. Ці критерії враховують такі фактори: низьке відношення сигнал/шум; мінімальна априорна інформація про класи невимірвальної ознаки; істинне значення параметрів системи, що вивчається, невідомі, але відомі діапазони їх варіабельності.

Показана можливість рішення задачі класифікації із заданою точністю на випадок повністю або частково описаних класів з використанням вибраної математичної моделі нейрону (нескінченний однорічний пасивний кабель) при наявності або відсутності завад; визначені необхідні умови та обмеження, які допускають цю можливість.

Теоретична значимість. Розроблено метод, алгоритми і програми рішення задачі класифікації розташування активних синаптичних входів на дендритах нейронів, яка формально може бути представлена як задача класифікації розташування входів лінійних систем з детермінованими параметрами у випадку, коли класифікаційна ознака встановлена і недосяжна прямому вимірюванню випадковим параметром функції впливу на систему, що вивчається.

Розроблений алгоритм може бути використаний для вирішення деяких фізіологічних задач, які зводяться до визначення належності активних синаптичних входів до однієї із груп, про які відомо, що вони розподілені на дендритах в різних областях, що частково перетинаються, причому дано експертні оцінки центрів групування на кожній із областей. Подібні задачі виникають при вивченні природи процесів, що лежать в основі корекції рухової активності.

Практична значимість. Розроблені алгоритми визначення області локалізації активних синаптичних входів на дендритах нейронів на основі числових методів аналізу та інтерпретації біоелектричних сигналів орієнтовані на застосування ЕОМ, що дозволяє використовувати одержаний комплекс програм як частину системи автоматизації нейрофізіологічного експерименту.

Сумісне застосування існуючих способів визначення області активних синаптичних входів на основі пошарового аналізу ЕП і запропонованого методу, порівняння отриманих результатів дозволять одержати більш точну картину біоелектричних процесів в синаптично деполаризованій ділянці кори, уточнити значення параметрів математичної моделі.

Положення, що виносяться на захист:

1. Розроблений метод визначення розташування активних синаптичних входів на дендритах нейронів кори з точністю, яка дозволить віднести їх локалізацію до однієї із двох областей, із врахуванням відомої апріорної інформації про класи і з використанням теорії класифікації та математичного моделювання.
2. Сформульовані умови, які допускають перехід від вирішення задачі класифікації у просторі невиміральної ознаки як координати активного синаптичного входу до рішення задачі класифікації в просторі виміральної ознаки як величини внутрішньо- або позаклітинного потенціалів на основі математичних моделей нейронів і пасивних електричних процесів у них.

3. Вирішена задача класифікації розташування активних синаптичних входів нейронів за результатами реєстрації ВП з поверхні кори із заданою точністю для різних об'ємів априорної інформації про класи при наявності або відсутності завад.

Впровадження в практику. Матеріали дисертації були впроваджені на кафедрі експериментальної фізики Дніпропетровського державного університету при підготовці курсів зі спеціальності "Біотехнічні та медичні апарати і системи", а також в лабораторії моделювання нейрофізіологічних процесів Інституту фізіології ім. Богомольця АН України як частина автоматизованої системи нейрофізіологічних досліджень.

Апроба ія роботи. Матеріали дисертації доповідались і обговорювались: на науково-технічній конференції "Застосування обчислювальної техніки і математичних методів в наукових дослідженнях", м.Севастополь (1990 р.); на засіданні семінару "Управління в біології та медицині" наукової ради АН України з проблеми "Кібернетика", м.Київ (1991 р.); на засіданнях семінару "Проблеми моделювання в ергатичних, імітаційних і самоорганізуючих системах" наукової ради АН України з проблеми "Кібернетика", м.Київ (1991, 1992 р р.).

По темі дисертації опубліковано 3 статті і тези доповіді.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, закінчення, висновків, додатку і бібліографії. Загальний обсяг дисертації складає 155 сторінок, включаючи 140 сторінок машинописного тексту, 3 таблиці, 11 малюнків. Список літератури складається з 118 найменувань (29 вітчизняних і 89 іноземних авторів).

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показана актуальність теми дослідження, її наукова новизна, практична і теоретична значимість, визначені мета і завдання дослідження.

Об'єктом дослідження вибрана сенсомоторна кора кішки, оскільки, з одного боку, досить добре вивчена її морфологія, а з іншого - припускається застосування отриманих результатів дослідження для вивчення генеза рухових команд пірамідними нейронами моторної кори. Відомо, що синаптичні закінчення, які збуджуються і надходять в моторну кору, специфічних і неспецифічних аферентів, розташовані

на дендритах пірамідних клітин в різних областях, які частково перетинаються. Тому завдання у постановці його з боку нейрофізіології можна сформулювати таким чином.

Необхідно визначити розташування активізованих (в результаті приходу аферентного залпу) синаптичних закінчень на дендритах пірамідних нейронів моторної кори з точністю, яка дозволить віднести їх локалізацію до однієї з двох областей.

Для зручності рішення завдання вводитья поняття активного синаптичного входу з координат θ , яка має зміст середньоарифметичного від усіх координат θ^* синаптичних закінчень, збуджених одним аферентним залпом. Координата θ^* не піддається прямому вимірюванню через методичні обмеження і тому θ - невимірювальна ознака, хоча може бути оцінена за результатами вимірювання локальних потенціалів (М) кори мозку.

Приймаються такі положення:

1. Інтенсивність локальної синаптичної дії однакова впродовж дендритного дерева і величину визваного постсинаптичного потенціалу (ВПС) визначає, головним чином, електронічна віддаленість активного синаптичного входу від соми нервової клітини.

2. Активні синаптичні входи, які генерують дані ВПС, групуються в компактній області $S_l, l=1,2$.

Вирішується так звана зворотня задача, але з точністю, яка дозволяє визначити належність отриманого рішення до однієї із двох компактних областей S_1 чи S_2 .

Координату активного синаптичного входу θ в серії експериментів опишемо як випадкову величину $\hat{\theta}$. Сукупність всіх мыслимих спостережень $\hat{\theta}$ при даному комплексі умов утворюють генеральну сукупність. Якщо комплекс умов не змінюється, то в загальному випадку $\hat{\theta}$ можна вважати стаціонарною величиною (якщо час між аферентними залпами досить великий, щоб система, що вивчається, поверталась у початковий стан спокою). Тоді дану генеральну сукупність можна описати як клас і перейти до задачі класифікації, де класифікаційною ознакою виступає випадковий параметр θ функції впливу на систему, що вивчається. Еталонами 1-го і 2-го класів будуть відповідно значення $\theta \in S_1, S_1 \subset \{X\}$ і $\theta \in S_2, S_2 \subset \{X\}$, де $\{X\}$ - простір невимірювальної ознаки θ . S_1 і S_2 компактні на R^1 .

У другій частині аналізуються літературні дані по методах математичного моделювання і теорії класифікації в нейрофізіологічних дослідженнях синаптичних процесів у нейронах. Розглядають-

оя можливі підходи до вирішення задач класифікації в залежності від конкретної математичної моделі випадкового процесу, а також на якій вихідній інформації будується модель. Більш детально проаналізовано дискримінантний метод, який припускає знання деякої апіорної інформації про класи; проаналізовано існуючі математичні моделі пасивних електричних процесів в нейроні (Hodgkin, Rushton, 1946; Rall, 1959; Rall, 1960; Clark, Plonsey, 1966; Taylor, 1963; Ходжкін, 1965; Rall, 1977; Титомир, 1980; Гутман, 1984; Мелконян, 1987 та ін.) і позаклітинного поля синаптично деполяризованої популяції нейронів (Rall, Shepherd 1968; Nicholson Llinas, 1971; Nicholson, 1973; Llinas, Nicholson, 1974; Nicholson, Freeman, 1975; Jack, 1989).

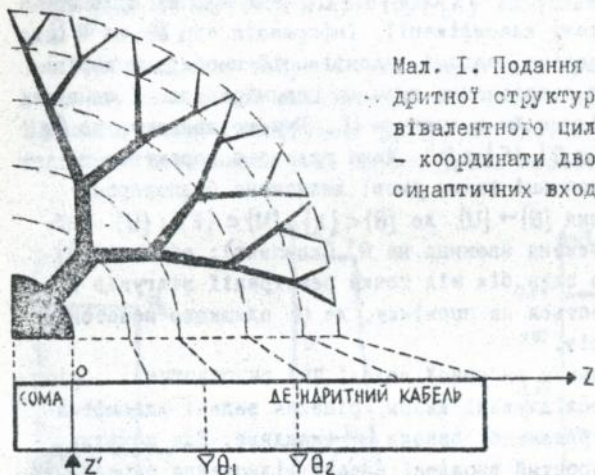
У третій частині детально розглянуто переваги і недоліки одного з існуючих на сьогодні методів обробки біоелектричної активності мозку з метою підвищення відношення сигнал/шум – методу накопичення (усереднення). Розглянуто всі можливі підходи до питання про варіабельність сигналу і характеристики шуму, так як облік саме цих факторів є визначальним в оцінці коректності застосування даного методу для попередньої обробки "виділяючого" сигналу з метою його наступної класифікації.

Класифікація розташування активних синаптичних входів нервової клітини у випадку повністю описаних класів

Четверта частина присвячена розробці алгоритму класифікації розташування входів лінійних систем з детермінованими параметрами у випадку, коли класифікаційна ознака встановлена і недоступна прямому вимірюванню випадковим параметром θ функції впливу на систему, яка вивчається. Також розглядається застосування розробленого алгоритму для вирішення сформульованої вище задачі класифікації за результатами мікроелектродної реєстрації електричних потенціалів тіла нервової клітини як демонстрація можливості вирішення вчазаної задачі класифікації із заданою точністю з використанням вибраної математичної моделі системи, яка вивчається, на основі апіорних даних про класи θ в обсязі, відповідному повністю описаним класам.

Перед тим, як приступити до вирішення задачі класифікації, необхідно вибрати придатну (адекватну поставленій задачі) математичну модель нервової клітини і пасивних електричних процесів у ній із вже існуючих та відомих моделей. Було вибрана модель, що припускає подання нейрону у вигляді соми і дендритного дерева.

Умови еквівалентного перетворення дають можливість розглядати нейрон у вигляді сфери (тіло клітини сферичної форми) з еквівалентним однорідним дендритом у вигляді циліндра (дендритне дерево, яке відповідає певним умовам симетрії) (Мелконян, 1987).



Мал. 1. Подання симетричної дендритної структури у вигляді еквівалентного циліндра (θ_1, θ_2 - координати двох різних активних синаптичних входів)

На мал. 1 показана така симетрична дендритна структура у вигляді еквівалентного циліндра, яка розглядається як система з розподіленими параметрами - одномірний пасивний нескінченний кабель. Цю математичну модель можна вважати придатною, так як вона дозволяє розглядати відростки нейронів лінійними системами з детермінованими параметрами і відображає в собі класифікаційні ознаки θ і u , де в даному випадку u - величина внутрішньоклітинного потенціалу соми.

Пасивне поширення збурення в одномірному нескінченному пасивному кабелі описується таким диференціальним рівнянням у безрозмірних координатах (Мелконян, 1987):

$$\partial^2 \hat{u} / \partial z^2 - \partial \hat{u} / \partial \tau - \hat{u} = 0,$$

де $\hat{u} = \hat{u}(\theta, \tau)$ - трансмембранний потенціал клітини; $Z = z/\lambda$ - координата вздовж еквівалентного циліндра; $\tau = t/\tau$ - час; λ і τ - постійні довжини і часу еквівалентного дендриту.

Відомий загальний вигляд виразу для імпульсної перехідної характеристики моделі у вигляді нескінченного одномірного пасивного кабеля:

$$\hat{u}(\theta, \tau) = 0.5 \cdot u_s / \sqrt{\lambda \cdot (\tau - \eta)} \cdot \exp(-(\tau - \eta) - 0.25 \cdot (Z' - \theta)^2 / (\tau - \eta))$$

(Fatt, Katz, 1951), де Z' - координата точки реєстрації; U_S - напрута, яка створюється синаптичним струмом у точці $Z = \theta$; η - відрізок часу між аферентними залпами.

Випадковий процес $\hat{U}(\theta, T)$ є стаціонарним і вважаємо, що його розріз у деякий момент часу $T = T^*$: $\hat{U}(T^*, \theta) = U(\theta) = U$ має ту ж, з точки зору вирішення задачі класифікації, інформацію про θ , що й \hat{U} .

Для вирішення модельної задачі класифікації необхідно вирішити кількісне завдання розрізнення значень невимірнувальної ознаки θ за відомими відповідним їм значеннями U . Будемо вважати, що $\theta \in \{X\}$, $U \in \{F\}$, де $\{X\} \subset R^1$, $\{F\} \subset R^1$. Дана задача є коректною по Тихонову лише при виконанні таких умов: визначено безперервне об'єктивне г'дображення $\{\theta\} \rightarrow \{U\}$, де $\{\theta\} \subset \{X\}$, $\{U\} \subset \{F\}$; $\{\theta\}$ - область визначення, обмежена множина на R^1 (компакт); область $\{\theta\}$ буде завжди лежати по один бік від точки реєстрації відгуків Z' ; момент часу T^* вибирається на проміжку, де U однаково монотонна функція для обох класів.

Показано, що в рамках вибраної моделі при використанні апріорних відомостей про досліджувані класи, рішення задачі класифікації в просторі невимірнувальної ознаки $\{X\}$ можливе. Для початку розглянуто найбільш простий випадок: високе відношення сигнал/шум і відомі реальні значення параметрів системи.

Лема. Якщо у просторі $\{X\}$ існують два повністю описаних класи і відомо рівняння зв'язку θ , $\theta \in \{X\}$, с U , $U \in \{F\}$: $U = U(\theta)$, де $U(\theta)$ - безперервне взаємодіозначне відображення компакту $\{\theta\}$ в $\{U\}$, $\{\theta\} \subset \{X\}$, $\{U\} \subset \{F\}$, то і в просторі $\{F\}$ існують два повністю описаних класи (визначення повністю описаних класів по книзі (Аязязян та ін., 1974).

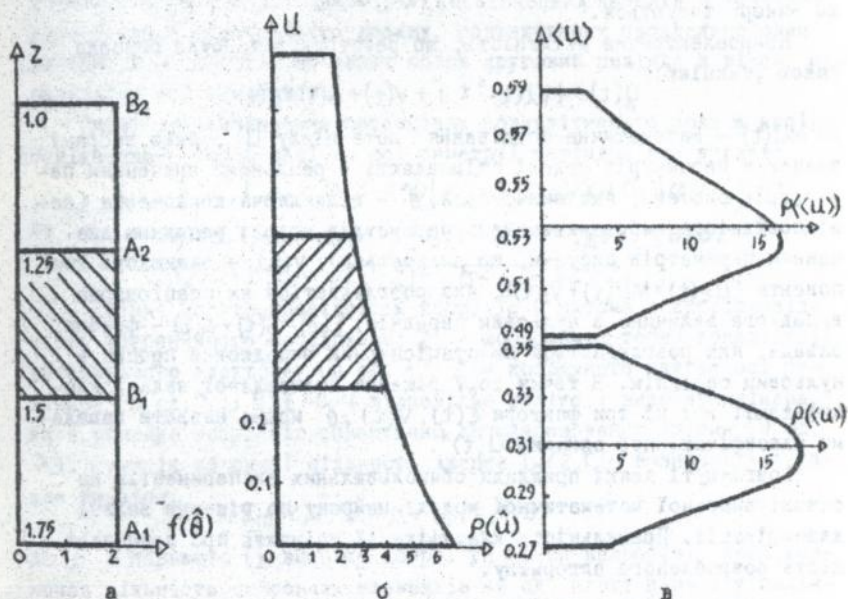
Доказ леми визначає можливість рішення поставленої задачі класифікації з деякою імовірністю P в просторі $\{F\}$. Так як з'являти при класифікації можуть бути великими і не задовольняти спостерігача, то зручніше перейти до іншої класифікаційної ознаки - математичному очікуванню MU . Для 1-го класу маємо MU_1 , для 2-го класу MU_2 . Так як $MU_1 \neq MU_2$, то можна стверджувати, що задача класифікації вирішується в $\{F\}$ з $P = 1$. Із леми виходить, що з такою ж імовірністю вона вирішується і в просторі $\{X\}$. Проте на практиці за вибірок спостережень U_1, U_2, \dots, U_N ми можемо отримати лише оцінку MU : $\langle U \rangle = 1/N \sum_{i=1}^N U_i$.

Була сформульована і доведена теорема, яка визначає можливість рішення задачі класифікації за ознакою $\langle U \rangle$ із задовольняючою нас

точність.

Теорема. Якщо виконуються умови леми, причому θ і U параметри лінійної системи, а також вибрана імовірність втрат α , мінімально можлива для кінцевого об'єму виборки, то задача класифікації вирішується у просторі $\{X\}$ за ознакою $\langle U \rangle$ з імовірністю $P=1-\alpha$.

У ході доказу теореми було побудовано критерій розбиття можливих значень нової класифікаційної ознаки на дві області H_1 і H_2 з точністю класифікації до α . На мал. 2 наведені результати модельних досліджень, які демонструють перехід від θ до $\langle U \rangle$.



Мал.2. Результати модельних досліджень:

- а) апіорні щільності імовірності невимірвальної ознаки θ . Заштрихована область – це зона перекриття областей S_1 і S_2 просторі $\{X\}$;
- б) діаграми щільностей імовірності відгуків $U(\theta)$, що реєструються в $Z' = 0$ і $T^k = 0.3$. Заштрихована область – це зона перекриття областей Γ_1 і Γ_2 у просторі $\{F\}$;
- в) діаграми щільностей імовірності вибірових середніх відгуків $\langle U \rangle$ при оптимальному об'ємі виборки $N = 30$

Метод у подальшому був розвинений, що дозволяє здійснити рішення вищевказаної задачі класифікації в умовах, більш близьких до реальних, коли відношення сигнал/шум низьке і істинне значення параметрів системи, яка вивчається, не відомі, але відомі діапазони їх варіабельності.

Для боротьби з фоновими завадами $\xi(t)$ (якими можуть бути апаратні завади $\alpha(t)$, спонтанний фон нейроелектричної активності $S(t)$) з метою підвищення відношення сигнал/шум вибраний метод когерентного накопичення (усереднення), який часто використовується на практиці. Він дозволяє використовувати вже розроблену процедуру класифікації з мінімальним розширенням складу засобів, що використовуються.

Нейроелектрична активність, що реєструється, була описана такою функцією:

$$y(t) = MU(t)^* \pm \delta + v(t) + s(t) + a(t),$$

де $MU(t)^*$ - математичне сподівання потенціалу U , якщо вибрані значення параметрів моделі співпадають з реальними значеннями параметрів системи, яка вивчається; δ - відхиляюча компонента (невідповідність вибраних значень параметрів моделі реальним значенням параметрів системи, що вивчається); $v(t)$ - залишкова компонента ($U_i(t) = MU(t) + v_i(t)$), яка розглядається як стаціонарна випадкова величина з нульовим середнім; $\xi(t) = S(t) + a(t)$ - фонові завади, яка розглядається як стаціонарний випадковий процес з нульовим середнім. З точки зору рішення поставленої задачі класифікації всі ці три фактори $\xi(t)$, $v(t)$, δ можна назвати завадами класифікаційної ознаки $MU(t)^*$.

Розглянуті деякі приклади обчислювальних експериментів на основі вибраної математичної моделі нейрону по рішенням задачі класифікації. Правильність класифікації свідчить про працездатність розробленого алгоритму.

Класифікація розташування активних синаптичних входів деполаризованої популяції нейронів кори у випадку частково описаних класів

У п'ятій частині розглядається можливість рішення поставленої задачі класифікації із заданою точністю з використанням вибраної математичної моделі системи, що вивчається, явищ і процесів, що в ній відбуваються, коли відомі тільки межі класів S_1 і S_2 , а також дані експертні оцінки центрів групування для кож-

ного класу, тобто на основі апріорних даних в обсязі частково описаних класів ознаки θ ; а також статистичних характеристик U . Необхідні статистики беруться із обчислювального експерименту, який імітує натурний експеримент. В цій системі, що вивчається, розглядається популяція синаптично деполяризованих пірамідних нейронів кори і, отже, необхідно вирішувати поставлену задачу класифікації за результатами реєстрації ВП на поверхні кори.

Для отримання математичної моделі позаклітинного поля синаптично деполяризованого ансамблю пірамідних клітин кори скористаємося моделлю, розвинутою Ніколсоном і Ліносом (Nicholson, Llinas, 1971). Популяція дендритів є добре організованою сукупністю вертикально орієнтованих одномірних нескінченних кабелів з точечною локалізацією синаптичного впливу, розташованих паралельно один до одного в області, що являє собою круговий циліндр з віссю, паралельною осі дендритів.

Вираз для визначення потенціалу позаклітинного поля в напівнескінченному середовищі на осі симетрії циліндра має вигляд:

$$F(Z', T, \theta) = \phi(Z', T, \theta) + \{(\sigma - \sigma_E) / (\sigma + \sigma_E)\} \phi(-Z', T, \theta),$$

де

$$\phi(Z', T, \theta) = 0.5 \cdot \sigma \cdot \int_0^H G(Z' - Z; B) * I_m(Z, T, \theta) dZ$$

$$G(Z' - Z; B) = \sqrt{(Z' - Z)^2 + B^2} - |Z' - Z|,$$

σ - питома електропровідність кори; σ_E - питома електропровідність пограничного середовища; Z' - координата точки локалізації реєструючого електроду (в од. λ); Z - координата вздовж осі циліндра (в од. λ); B і H - відповідно радіус і висота циліндра, який обмежує популяцію синаптично деполяризованих клітин (в од. λ). Функція об'ємної щільності джерел $I_m(Z, T, \theta)$ визначається таким виразом:

$$I_m(Z, T, \theta) = \beta * i_m(Z, T, \theta)$$

де β - параметр (у випадку доброї упаковки нейронів), який визначає щільність нейронних елементів на од. площі перерізу циліндра; $i_m(Z, T, \theta)$ - трансмембранний струм клітини (Freeman, Nicholson, 1975). Для $i_m(Z, T, \theta)$ використовувався вираз, одержаний в роботі (Nicholson, Llinas, 1971).

Математичною моделлю визначена багатопараметрична залежність між θ і F : $F = f(\tau, \lambda, Z', Z, T, \theta, \alpha, B, \beta, \sigma)$. Так як реєстрація потенціалу ведеться з поверхні кори, то $Z' = 0$. Було проведено дослідження по виявленню більш значимих параметрів моделі, варіабельність значень яких суттєво позначається на значеннях $F(\theta, T)$.

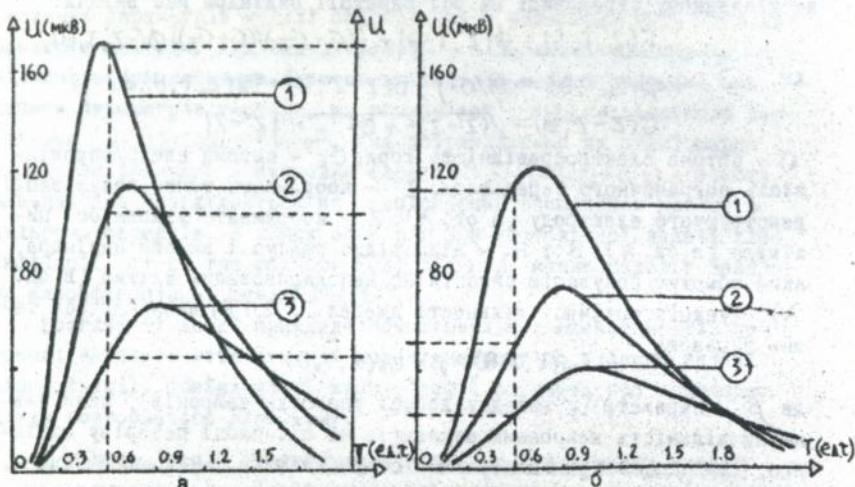
У результаті відібрані такі параметри: $\beta, \tau, \lambda, b = \beta/\lambda, \sigma$. Відомо, що вони лежать в деяких визначених межах варіабельності $[\beta_1, \beta_2], [\tau_1, \tau_2], [\lambda_1, \lambda_2], [b_1, b_2], [\sigma_1, \sigma_2]$, із яких їх значення вибираються довільним чином. Значення інших параметрів можна зафіксувати із належних їм діапазонів варіабельності. В результаті одержимо взаємодозначну безперервну залежність $F(\theta, T)$.

Як показали модельні експерименти, відгук, який реструється в точці $Z' = 0$, буде однокомпонентним. Основною класифікаційною ознакою ζ вибрана амплітуда однокомпонентного ВП в суворо зафіксований момент T^* , який встановлюється спеціальним дослідженням. Приклади цих відгуків приведені на мал. 3.

Зарєстроване у ході експерименту значення вимірювальної ознаки позначається \tilde{u} . Визначається перехід до нової класифікаційної ознаки

$$E\langle \tilde{u} \rangle = \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \tilde{u}_i^{(j)} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \tilde{u}_i$$

де M - число вибірок; N - об'єм вибірок; $K = M \cdot N$.



Мал. 3. Траєкторії реструєвої в точці $Z' = 0$ $F(\theta, T)$ і значення вимірювальної класифікаційної ознаки в момент часу $T^* = 0.6$ $\zeta(\theta) = F(\theta, T^*)$ у відповідь на прикладання синхронного впливу в точках:

- а - для 1-го класу - 1, $\theta_1 = 1.3$; 2 $\theta_1 = 1.9$; 3 $\theta_2 = 2.5$;
 б - для 2-го класу - 1, $\theta_3 = 1.8$; 2 $\theta_2 = 2.4$; 3 $\theta_4 = 3.0$

Для рішення задачі класифікації необхідно вирішити кількісну задачу розрізнення значень невимірвальної ознаки за відомим відповідним їм значенням $E\langle\hat{u}\rangle = U_f\langle\theta\rangle$. Як засіб способу наближеного рішення рівняння $E\langle\hat{u}\rangle = U_f\langle\theta\rangle$ вибрано метод добору (Тихонов, 1986). Можливість рішення даного рівняння визначається доказом коректності даної задачі за Тихоновим.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Здійснено перехід від рішення задачі класифікації у просторі невимірвальної ознаки $\{X\}$ до рішення задачі класифікації у просторі вимірвальної ознаки $\{F\}$, причому отримуване рішення визначається із заданою точністю при виконанні таких умов і обмежень:

- мінімально можлива апріорна інформація про класи така: класи компактні, існують експертні оцінки центрів групування $M\theta$ для кожного класу;

- система, що вивчається, лінійна, значення параметрів якої на протязі експерименту не змінюються;

- функція збудження стандартна, причому через визначений проміжок часу після збудження система, яка вивчається, повертається у початковий стан спокою;

- існує та відома взаємодозначна безперервна відповідність між θ і U : $U = U(\theta)$;

- вибирається мінімально можливе значення імовірності втрат для кінцевого числа реалізацій експерименту.

2. Побудовані критерії рішення задачі класифікації для різних об'ємів апріорної інформації про класи, при наявності або відсутності завод, які можна показати в такому вигляді:

а) у випадку повністю описаних класів ознаки θ , при відсутності завод; якщо $\langle u \rangle$ потрапляє в область N_1 : $[Mu_1^* - \tau \cdot \sigma\langle v \rangle, Mu_1^* + \tau \cdot \sigma\langle v \rangle]$, то активні синаптичні входи лежать в області S_1 - 1-й клас, а якщо $\langle u \rangle \in N_2$: $[Mu_2^* - \tau \cdot \sigma\langle v \rangle, Mu_2^* + \tau \cdot \sigma\langle v \rangle]$, то 2-й клас; де τ - табличне число, яке визначає довірливу імовірність; $\sigma\langle v \rangle$, $\sigma^2\langle v \rangle$ - середньоквадратичні відхилення виборочних середніх фактору V від загального фактору MU для 1-го і 2-го класів відповідно;

б) у випадку повністю описаних класів ознаки θ при наявності завод; якщо $\langle u \rangle \in Y_1$: $[Mu_1(\lambda_1) - \tau \cdot (\sigma\langle v \rangle + \sigma\langle \xi \rangle)$,

- $MU_1(\lambda_2) + \tau \cdot (G(\psi) + G(\xi))$, то $\theta \in S_1$ - I-й клас, а якщо $\langle \psi \rangle \in Y_2$: $[MU_2(\lambda_1) - \tau \cdot (G(\psi) + G(\xi)), MU_2(\lambda_2) + \tau \cdot (G(\psi) + G(\xi))]$, то $\theta \in S_2$ - 2-й клас; де λ_1 і λ_2 - межі допустимого діапазону варіабельності; $G(\xi)$ - середньоквадратичний відхилення виборочних середніх фонової завади ξ ;
- в) у випадку частково описаних класів ознаки θ при відсутності завад; якщо $\langle \bar{u} \rangle \in \bar{H}_1: [U^*(M\theta_1) - \gamma(1-\alpha, M-1) \cdot \frac{S}{\sqrt{M}}, U^*(M\theta_2) + \gamma(1-\alpha, M-1) \cdot \frac{S}{\sqrt{M}}]$, то $\theta \in S_1$ - I-й клас, а якщо $\langle \bar{u} \rangle \in \bar{H}_2: [U^*(M\theta_2) - \gamma(1-\alpha, M-1) \cdot \frac{S}{\sqrt{M}}, U^*(M\theta_2) + \gamma(1-\alpha, M-1) \cdot \frac{S}{\sqrt{M}}]$, то $\theta \in S_2$ - 2-й клас; де $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\langle \bar{a} \rangle^{(i)} - E\langle \bar{a} \rangle)^2}{M-1}}$ - емпіричний стандарт; $\gamma(1-\alpha, M-1)$ - коефіцієнт розподілу Стьюдента;
- г) у випадку частково описаних класів ознаки θ при наявності завад; якщо $\langle \bar{y} \rangle \in \bar{Y}_1: [U\sigma(M\theta_1) + \gamma(1-\alpha, M-1) \cdot (S + S_\xi) / \sqrt{M}, U\sigma(M\theta_1) - \gamma(1-\alpha, M-1) \cdot (S + S_\xi) / \sqrt{M}]$, то $\theta \in S_1$ - I-й клас, а якщо $\langle \bar{y} \rangle \in \bar{Y}_2: [U\sigma(M\theta_2) + \gamma(1-\alpha, M-1) \cdot (S + S_\xi) / \sqrt{M} + \delta_2 + \varepsilon, U\sigma(M\theta_2) - \gamma(1-\alpha, M-1) \cdot (S + S_\xi) / \sqrt{M}]$, то $\theta \in S_2$ - 2-й клас; де $\delta_1 = G_2(M\theta_1) - G_1(M\theta_1)$, $\delta_2 = G_2(M\theta_2) - G_1(M\theta_2)$;
 $G_1(\theta) = U(\beta_1, \tau_1, \lambda_1, b_1, \theta)$ і $G_2(\theta) = U(\beta_2, \tau_2, \lambda_2, b_2, \theta)$ - відповідно нижня і верхня межі, в яких лежать можливі значення $U\sigma$; ε - похибка вимірювання $U\sigma$.
 Отриманий критерій, в свою чергу, накладає обмеження на розмах діапазонів варіабельності найбільш значимих параметрів.

3. Аналіз показав, що коректне застосування методу когерентного накопичення (усереднення) для попередньої обробки класифікаційної ознаки MU можливе, так як для того забезпечується виконання основних необхідних вимог.

4. На основі проведеного аналізу літератури (Andersen, Langmoen, 1980; Andersen et al., 1980; Brown, Fricke, Perkel, 1981; Jack et al., 1989; Walmsley, Stuklis, 1989 та ін.) встановлено, що можливо використовувати нейрон як математичну модель, яка дає адекватний опис залежності між θ і U , модель у вигляді нескінченного пасивного одномірного кабелю, яка з достатньою точністю описує реальні пасивні електричні процеси в пірамідній клітині кори. Вибрана модель позаклітинного поля синаптично деполяризованої популяції нейронів (Nicholson, Cinas, 1971; Nicholson, 1973) адекватно описує вимірвальну класифікаційну ознаку U з основних факторів, які, як встановлено у роботі (Roll, Sheppard, 1968), визначають

реєструючий потенціал позаклітинного поля.

5. Показано, що параметрами (поруч з θ), які найбільше впливають на точність рішення задачі класифікації, є постійні довжини і часу еквівалентного дендриту, радіус популяції синаптично збуджених клітин, питома електропровідність кори і щільність нейронних елементів у кори.

6. Вибрана модель завади типу "білий шум" є адекватною, а у випадку відхилення характеру завад від характеристик білого шуму спостерігається така картина: в результаті обробки реєструючого сигналу методом накопичення (усереднення) збільшення відношення сигнал/шум відбувається не в \sqrt{K} раз, як це передбачалося теорією, а дещо менше.

7. На основі отриманих алгоритмів розроблено комплекс програм рішення поставленої задачі класифікації на основі сумісної цифрової обробки результатів обчислювальних і натурних експериментів. Програми написані на мові ФОРТРАН-77 і реалізовані на ЕОМ типу СМ "Меда".

ВИСНОВКИ

1. Розроблений метод визначення області локалізації стоків позаклітинного струму в синаптично деполяризованому ансамблі пірамідних клітин кори (області активних синаптичних входів) заснований на поданні цієї задачі у вигляді так званої зворотної задачі і рішення її в рамках теорії класифікації за результатами реєстрації ВП з поверхні кори.
2. Необхідними умовами можливості рішення модельної задачі класифікації є наявність апріорної інформації про класи невиміральної ознаки (координати активного синаптичного входу) і статистичних характеристик виміральної класифікаційної ознаки (величини реєструючого ВП), а також використання відомих математичних моделей, які адекватно описують залежність між цими ознаками – параметрами лінійної системи.
3. Запропонований метод перспективний для вирішення практичних задач, пов'язаних з вивченням природи процесів, що лежать в основі корекції рухової активності з боку кори, так як допускає мінімальне порушення цілісності системи, яка вивчається. Одним з таких задач бачиться в'яснення участі синаптичних утворень на дендритах нейронів моторної кори в генеруванні ВПСР, що забезпечує виникнення рухових кортикоспинальних ко-

ЛНБ ім. В. Стефанишина
АН України

манд в системі прямого зв'язку кора - спинномозковий шлях - м'язові волокна у відповідь на аферентне збудження в ланцюгу зворотного зв'язку.

4. Теоретично обгрунтована можливість використання на практиці одержаних критеріїв для рішення задачі класифікації розташування активних синаптичних входів на дендритах нейронів, що слідує з

- встановленої адекватності вибраних математичних моделей нейрону, пасивних електричних процесів у ньому, поля поза-клітинного потенціалу;
- можливості коректного використання методу когерентного накопичення (усереднення) для підвищення відношення сигнал/шум;
- наявності мінімальної апріорної інформації, що вимагається, про класи ознаки θ в обсязі відомостей про те, що класи компактні і існують експертні оцінки математичних очікувань для кожного класу;
- облік реальних факторів, що знижують імовірність правильної класифікації, а саме: наявність помилки вимірювання ЕП і невідповідність вибраних значень параметрів моделі реальним значенням параметрів системи, яку вивчають;
- результатів обчислювальних експериментів, які показали працездатність отриманих критеріїв класифікації.

Основні положення дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Зарубин С.К. Использование моделирования и вычислительного эксперимента для решения задачи классификации синаптических входов нервной клетки //Тез. докл. Всесоюз. конф. "Применение вычислительной техники и математических методов в научных исследованиях". - Севастополь, 1990. - С.178.

2. Зарубин С.К., Корогод С.М. Применение математического моделирования для решения задачи классификации синаптических входов нервной клетки //Математическое моделирование. - 1991. - 3, № 4. - С.38-47.

3. Зарубин С.К., Корогод С.М. Решение задачи классификации синаптических входов нейрона в условиях помех с использованием методов математического моделирования. - Москва, 1991. - 31 с. - Деп. в ВИНИТИ 14.08.91, № 3459 -В91.

4. Зарубин С.К., Корогод С.М. Решение задачи классификации области активизированных входов нейронов коры на основе совместной обработки результатов вычислительного и натурального экспериментов. - Москва, 1991. - 29 с. - Деп. в ВИНИТИ 18.12.91, № 4694 -В91.

Зарубин

Підп. до друку 03.02.93. Формат 60×84/16. Папір кн.-журн. Офс. друк.
Ум. друк. арк. 0,93. Ум. фарбо-відб. 1,05. Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100.
Зам. 189.

Редакційно-видавничий відділ з поліграфічною дільницею
Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова АН України
252207 Київ 207, проспект Академіка Глушкова, 40

471225

AB 26.797

AB 26.797