

синаптических входов последовательностью импульсов близких частот. В те моменты времени, когда суммарный ВПСП превышает порог (а это происходит, когда корковый ВПСП предшествует мозжечковому), на выходе нейрона имеем спайк.

Смоделированный механизм детектирования информации, поступающей по корковому и мозжечковому входам, способен обеспечить нейрону КЯ возможность избирательного выделения паттернов сигналов, поступающих по разным входам и отличающихся определенными временными соотношениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барсегян В. Д., Городнов В. А. Биолог. ж. Армении, 11, 3, 1988.
2. Мелконян Д. С. Переходные процессы в нейронных системах 108, Ереван, 1987.
3. Фанарджян В. В. О нейронной организации эфферентных систем мозжечка 76, Л., 1975.
4. Finkel A. S., Redman S. J. Physiol., 312, 615-632, 1983.
5. Jack J. J. F., Noble D., Tsien R. W. Electric current flow in excitable cells. 502 Oxford, Clarendon Press, 1975.
6. Koch C., Poggio T. J. Neurosci. Meth., 12, 4, 301-315, 1985.
7. Lux H. D., Pollen D. A. J. Neurophysiol., 29, 2, 207-220, 1966.
8. Massion J. Physiol. Rev., 47, 353-436, 1967.
9. Rall W. Biophysical J., 2, 1, 145-167, 1962.
10. Tsukahara N., Fuller D. R. G., Brooks V. B. J. Neurophysiol., 31, 467-481, 1968.
11. Tsukahara N., Murakami F., Hultborn H. Exp. Brain Res., 23, 49-64, 1975.

Поступило 25.VI 1990 г.

Биолог. журн. Армении, № 8.(43).1990

УДК 612.8.61.007

К ТЕОРЕТИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ КОМПОНЕНТ ВЫЗВАННОГО ПОТЕНЦИАЛА ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ

М. В. АВЕТИСЯН, А. Р. САРКИСЯН, А. С. ЧОБАНИЯ

Институт физиологии им. Л. А. Орбели АН АрмССР, Ереван

Описывается модель многокомпонентного ВП, каждая из компонент которой моделируется внутриклеточным потенциалом, а также алгоритм, осуществляющий эту модель и позволяющий выделять компоненты ВП. Приведен пример, подтверждающий адекватность модели ВП.

Արհեստական մեկ նկարագրվում է բազմակոմպոնենտային հրահրած պո-
տենցիալի (ՀՊ) մոդել, որի ամեն մի կոմպոնենտ մոդելավորվում է ներքնային
պոտենցիալով, նկարագրվում է այդ մոդելին իրականացնող ՀՊ-ի կոմպոնենտ-
ների տարանջատող ալգորիթմը, բերվում է ՀՊ-ի մոդելի նույնականությունը
հաստատող օրինակ:

A model of multiple component EP, where each of its components is mo-
delated by the intracellular potential, is described in the work. It is desc-

Сокращения: ВП—вызванный потенциал, МЧХ—минная частотная характеристика, АЧХ—амплитудная частотная характеристика; ДЧХ—действительная частотная ха-
рактеристика; ПДПФ—прямое дискретное преобразование Фурье; ОПФ—обратное
преобразование Фурье; БФ—базисная функция; КФФ—косинус-преобразование
Фурье; СПФ—синус-преобразование Фурье.

ribed an algorithm, realising this model, permitting to separate the component of EP. An example is brought proving the adequateness of the model.

Модель клетки — компонентный анализ.

Электрическая активность отдельных подкорковых структур возникает под действием афферентной импульсации, вызванной периферическим раздражением. Зависимость ВП мозга от множества факторов, таких как тип синапсов нейронов регистрируемой области коры, состояние нейронов этой области коры, характер синаптических связей афферентных волокон, внутрикорковые передачи и другие факторы, затрудняет выявление механизмов генеза ВП и его компонент.

Большинство исследователей [2, 3] связывают возникновение компонент ВП с электрической активностью синхронно активированных групп ее клеточных элементов. Именно представление о синхронной активности элементов лежит в основе теоретических методов моделирования экстраклеточных потенциалов [7]. В работе [2] приведен ряд теоретических соображений, которые дают возможность объяснить механизмы генеза отдельных волн ВП в связи с клеточной активностью. Установлено [2], что основной вклад в ВП вносит постсинаптический потенциал клетки. Теоретический подход к вычислению поля одиночной клетки, состоящий в аппроксимации ее последовательностью точечных источников, впервые был предложен Лоренте де Но [4]. На его основе был разработан метод [7] расчета экстраклеточного поля нейрона, сводивший задачу моделирования компонент ВП к моделированию внутриклеточного потенциала. Несмотря на относительную простоту модели выделения компонент ВП, расчет компонент на ее основе представляет значительные трудности из-за необходимости расчета уравнений кабеля.

В настоящей работе эти трудности преодолеваются благодаря применению частотных методов, в соответствии с ранее опубликованной работой [1].

Алгоритм выделения компонент осуществляется в три этапа: 1. нахождение частотных характеристик исходной кривой ВП с помощью ПДФ; 2. получение частотных характеристик компонент по АЧХ и МЧХ ВП, на основе динамической модели нервной клетки; 3. выделение компонент ВП по их частотным характеристикам путем ОПФ (метод подобия базисных функций [1]).

На первом этапе по исходной кривой ВП, используя ПДФ, находят ее частотные характеристики: МЧХ, ДЧХ, АЧХ.

На втором этапе производится подстройка АЧХ к каждому из пиков частотных характеристик кривой ВП с помощью модели нервной клетки. На этом этапе используется макромодель нервной клетки в виде сферы (тело клетки) с эквивалентным цилиндром (дендритные структуры) [6].

Нервная клетка рассматривается как линейное дендритное дерево произвольной конфигурации, соединенное со сферической сомой. С учетом теоретических соображений, приведенных в работе [5], тело клетки в этой работе моделируется сферой, описываемой $R-L-C$ цепочкой.

Электрическая схема замещения модели показана на рис. 1. Произвольное линейное дендритное дерево, согласно работе [6], можно свести к эквивалентному цилиндру определенной длины. Тогда модель клетки нейрона можно представить следующим образом: эквивалентный цилиндр длиной Y , описываемый линией с распределенными параметрами с нагрузкой в виде $R-L-C$ цепочки (тело клетки). Входом данной системы является начало нервного волокна, выходом—тело клетки. На входе модели рассматривается ток, на выходе—напряжение.

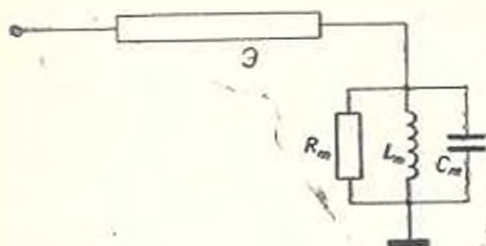


Рис. 1. Схема замещения модели: Э—эквивалентный кабель, R_m , L_m , C_m —биофизические параметры тела клетки.

Построен алгоритм, рассчитывающий частотные характеристики этой модели. Расчет частотных характеристик модели производится по формуле:

$$Z = (Z_n(1 - N))(\exp(\gamma y)) - N \exp(-\gamma y),$$

где γ , Z_n —вторичные параметры линии, соответственно коэффициент распространения и волновое сопротивление.

Коэффициент отражения N выражается соотношением:

$$N = \frac{Z_n - Z_n}{Z_n + Z_n}.$$

Сопротивление нагрузки (тела клетки) Z_n вычисляется по следующей формуле:

$$Z_n = (G + j(\omega L - \omega C))(G^2 + (\omega L - \omega C)^2).$$

Расчет частотных характеристик производится в логарифмической шкале частот.

На основе представленных расчетных формул была создана программа, вычисляющая частотные характеристики модели. Входными параметрами программы являются: 1. биофизические параметры нагрузки—емкость C , индуктивность L , проводимость G ; 2. биофизические параметры эквивалентного цилиндра R_m , C_m , G_m (параметры, заданные на единицу длины); 3. длина нервного волокна Y ; 4. количество декад и количество точек на декаду, определяющие логарифмическую шкалу частот, в которых вычисляются частотные характеристики.

Предполагается, что компонент ВП описывается вышеприведенной моделью и поэтому можно подобрать параметры модели таким образом, чтобы ее АЧХ совпала с компонентом АЧХ исходной кривой.

Подстройка модели под одну из компонент производится по МЧХ и

АЧХ модели и исходной кривой ВП. Критерием для выбора параметров модели является минимум среднеквадратичного отклонения характеристик модели от характеристик ВП в том интервале частот, который, как предполагается, соответствует данной компоненте.

По частотным характеристикам подстроенной модели с помощью ОПФ рассчитывается переходный процесс, который и является компонентом во временной области.

Для расчета компонент ВП во временной области можно применять различные алгоритмы ОПФ. Поскольку частотные характеристики обычно рассчитываются в логарифмической шкале частот, расчет ОПФ производится по ДЧХ или МЧХ с использованием эффективного алгоритма, описанного в [1] и основанного на использовании подобных базисных функций. Этот алгоритм применим в тех случаях, когда исходная функция (в нашем случае МЧХ или ДЧХ) задана в неравноотстоящих отсчетах, расположенных по закону геометрической прогрессии (в логарифмической шкале).

Исходная частотная характеристика, которую обозначим через $Q(\omega)$, рассчитывается в узловых точках

$$\omega_i = \omega_0 c^i, \quad i = 1, \dots, K,$$

где ω_0 и c — константы, удовлетворяющие условиям $\omega_0 > 0$, $c > 1$ (ω_0 — первая узловая точка на оси абсцисс — начальная частота, c — логарифмический шаг дискретизации).

Для вычисления ОПФ исходная функция заменяется интерполирующим выражением:

$$S(\omega) = \sum_{i=1}^K a_i \lambda_i(\omega/\omega_i),$$

где a_i — интерполяционные коэффициенты, $\lambda_i(y)$ — так называемая БФ. При кусочно-линейной аппроксимации эти функции имеют вид треугольника. Для расчета ОПФ вводятся два типа треугольных БФ:

$$\lambda_1(y) = \begin{cases} y & y \in (0; 1), \\ (c-y)(c-1) & y \in (1; c), \\ 0 & y \in (0; c); \end{cases}$$

$$\lambda_2(y) = \begin{cases} (c-y)/(c-1) & y \in (0; c), \\ 0 & y \in (0; c). \end{cases}$$

С помощью БФ первого типа удобно аппроксимировать МЧХ, а с помощью БФ второго типа — ДЧХ.

Интерполяционные коэффициенты для этих двух типов БФ рассчитываются по следующим рекуррентным формулам:

для БФ 1-го типа

$$a_i = Q_i - Q_{i+1}/c \quad (i = 0, \dots, K, \quad Q_{K+1} = 0);$$

$$a_i + Q_i - Q_{i+1}/c \quad (i = 0, \dots, K, \quad Q_{K+1} = 0);$$

для БФ 2-го типа

$$a_i = Q_i - (c+1)Q_{i+1}/c + Q_{i+2}c \quad (i = 0, \dots, K, \quad Q_{K+1} = 0, \quad Q_{K+2} = 0),$$

где $Q_i = Q(\omega_i)$.

Для расчета ОПФ исходной функции используются значения преобразования Фурье БФ, рассчитанные в M точках $z_i = z_0 h^i$, где z_0 — начальное значение аргумента, h — логарифмический шаг дискретизации, определяемый по формуле

$$h = e^{1/r},$$

где r — задаваемое натуральное число.

Количество точек M определяется исходя из начального z_0 и конечного z_M значений аргумента по формуле:

$$M = \text{Int}(\log_h(z_M/z_0)) + 2.$$

Для расчета ОПФ исходной функции по МЧХ используется СПФ БФ 1-го типа, а для расчета по ДЧХ — КПФ БФ 2-го типа.

Расчет СПФ БФ 1-го типа и КПФ БФ 2-го типа в M точках осуществляется по следующим аналитическим выражениям:

1 тип, СПФ

$$U(z) = (c \sin z - \sin cz)/(z^2(c - 1));$$

2 тип, КПФ

$$U(z) = (1 - \cos cz)/(z^2(c - 1)).$$

Расчет значений ОПФ $F(x)$ производится по формуле

$$F(x) = \frac{2}{\pi} \omega_0 \sum_{i=0}^K a_i c^i U(\omega_i x).$$

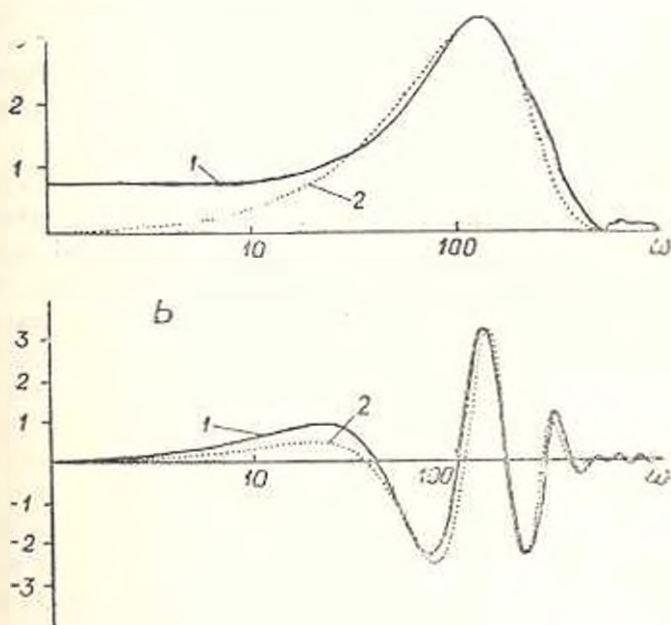


Рис 2. Частотные характеристики ВП и модели. А. Амплитудные частотные характеристики ВП (1) и модели (2). Б. МЧХ ВП (1) и модели (2).

Полное описание алгоритма приведено в работе [1].

В качестве примера выделения компонент ВП была использована экспериментальная кривая ВП, показанная на рис. 3, 1. Потенциал зарегистрирован при раздражении лучевого нерва прямоугольным импульсом тока из средней части супрасильвиевой извилины (ассоциатив-

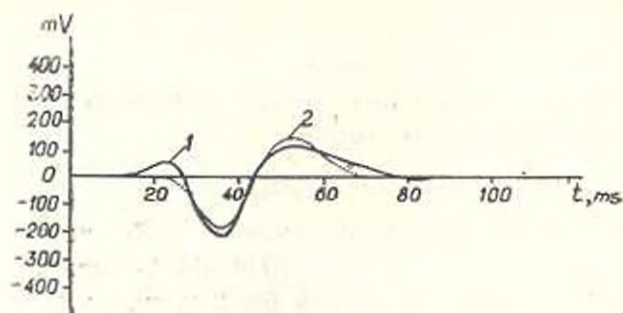


Рис. 3. Экспериментальная кривая ВП (1), кривая переходного процесса (2), рассчитанная по частотным характеристикам модели.

ная кора) и обработан на вычислительном комплексе NTA-1024-EMG-666. На рис. 2 приведены частотные характеристики ВП и пунктиром частотные характеристики модели (рис. 2 А—АЧХ, рис. 2. Б—МЧХ). Переходный процесс, рассчитанный по частотным характеристикам модели, показан на рис. 3, 2. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности модели кривой ВП. Описанный алгоритм был также использован для выделения компонент многокомпонентных ВП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелконян Д. С. Переходные процессы в нейронных системах. 407, Ереван, 1987.
2. Greitzfeldt O. D., Watanabe S., Lux H. J. *Electroencephal. and clin. neurophysiol.*, 20, 1, 1—18, 1966.
3. Klee M. R., Rall W. J. *Neurophysiol.*, 40, 3, 647—666, 1977.
4. Lorente de No R. J. *Cell Comp. Physiol.*, 207—289, 1947.
5. Mauro A., Conti F., Dodge F., Schor R. J. *gen. Physiol.*, 55, 4, 497—523, 1970.
6. Rall W. In: *Neural Theory and modelling.* 73—97, Stanford, 1964.
7. Rall W., Shepherd G. M. J. *Neurophysiol.*, 31, 6, 884—915, 1968.

Поступило 25.VI 1990 г.