4. Дуринян Р. А. В кн. Современные проблемы электрофизиологических исследований нервной системы. М., 1964.
5. Иванова С. Н. Механизмы компенсации двигательных функций после латеральной гемисекции спинного мозга. М., 1980.
6. Кулланда К. М. В кн. Современные проблемы электрофизиологических исследований нервной системы. М., 1964.
7. Кулланда К. М. В кн. Интегративная деятельность нервной системы в норме и патологии. М., 1968.
8. Любимов Н. Н. Успехи биол. наук, 11, 12, 3—22, 1980.
9. Ройтбак А. И. Биоэлектрические явления в коре больших полушарий. Тбилиси, 1955.
10. Ройтбак А. И. В кн. Современные проблемы электрофизиологических исследований нервной системы. М., 1964.
11. Стефанцов Б. Д. Физиол. журн. СССР, 40, 4, 1954.
12. Урганджян Т. Г. Физиол. журн. СССР, 44, 5, 1958.
13. Урганджян Т. Г. Возрастные особенности компенсаторного восстановления функций. Ереван, 1973.
14. Урганджян Т. Г., Бахчиева З. Н., Асланян В. М. Тр. II съезда Армянск. физиол. об-ва. Ереван, 1974.
15. Урганджян Т. Г., Асланян В. М. Тр. III съезда Армянск. физиол. об-ва. Ереван, 1979.
16. Урганджян Т. Г., Аветисян З. А. Биол. ж. Армении, 34, 6, 1981, 592—598.
17. Урганджян Т. Г., Арикелян С. Н. Мат-лы VIII Всесоюз. конф. по электрофизиологии ЦНС. Ереван, 1980.
18. Цаканян К. В. Тр. III конф. мол. физиол. Закавказья. Ереван, 1981.

«Биолог. ж. Армении», т. 35, № 6, 1982.

УДК 612.8:61.007

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ВЫЗВАННЫХ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ

Д. С. МЕЛКОНЯН

Предлагается метод цифровой обработки вызванных биоэлектрических реакций для выделения компонентов, связанных с различными источниками потенциалов. Применение метода иллюстрируются примерами обработки постсинаптических потенциалов, электроретинограмм и медленных отрицательных потенциалов прямого ответа коры.

Ключевые слова: нервная система, цифровая обработка, компонентный анализ биоэлектрических реакций.

Наличие мощных систем автоматизации медико-биологических исследований, построенных на базе современных средств цифровой вычислительной техники [2], предоставляет принципиально новые возможности для цифровой обработки данных физиологического эксперимента путем использования ЭВМ не только для первичного количественного анализа экспериментальной информации, но и для моделирования исследуемого процесса или системы. Благодаря этому результатами цифровой обработки могут служить не наборы числовых данных или харак-

теристики, связанные со специальными математическими и физическими понятиями, а параметры и процессы, имеющие конкретный физиологический смысл.

В ранее опубликованных работах [3—5] были представлены методы цифровой обработки вызванных биоэлектрических реакций, доведенные до построения модели процесса. Хотя исследовались различные задачи применительно к разным объектам—возбудительным постсинаптическим потенциалам [3], электроретинограмме [4], медленному отрицательному потенциалу прямого ответа коры [5]—во всех случаях в результате обработки выделялись некоторые физиологически значимые компоненты анализируемой реакции, связанные с механизмами ее формирования. В качестве обязательного элемента в алгоритмах обработки использовались численные методы, реализующие расчет прямых и обратных преобразований Фурье, что позволило исследовать процессы как во временной, так и в частотной областях.

В настоящей работе на основе отмеченных методов вырабатывается общий теоретический подход к решению задач компонентного анализа вызванных биоэлектрических реакций методами цифровой обработки.

Разложение на компоненты. Пусть $y(t)$ анализируемая реакция, вызванная одиночным стимулом, приложенным в момент $t=0$. Предположим, что генез реакции осуществляется под действием N источников, начинающих реагировать под действием стимула в моменты времени $t_n \geq 0$ ($n=1, \dots, N$). Пусть изменение тока или напряжения источника под действием стимула описывается функцией времени $x_n(t)$, в отношении которой принимается:

$$x_n(t) = 0 \text{ при } t < t_n.$$

Будем считать, что в месте регистрации суммарной вызванной реакции n -й источник вызывает процесс (компонент)

$$z_n(t) = T_n \{x_n(t)\}, \quad (1)$$

где $T_n \{ \}$ —оператор, то есть определенный закон, определяющий поведение динамической системы с входной функцией $x_n(t)$ и выходной— $z_n(t)$.

С учетом (1) разложение на компоненты представим в виде:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N z_n(t). \quad (2)$$

Это уравнение осуществляет разложение суммарной вызванной реакции на временные компоненты в классическом понимании: вызванная реакция образуется путем алгебраической суммации компонентов; каждый компонент соответствует той же точке регистрации, что и суммарная реакция (функции $y(t)$ и $z_n(t)$ относятся к одной и той же пространственной координате).

Согласно уравнению (1) компонент $z_n(t)$ является опосредованным результатом действия источника $x_n(t)$. Именно источники, пространственно локализованные, в общем случае вне области, в которой производится регистрация, определяют закономерности генеза суммарной ре-

акции. Поэтому целесообразно, помимо (2), ввести компенсаторное разложение.

$$y(t) = \sum_{n=1}^N T_n \{x_n(t)\}, \quad (3)$$

рассматривая функции $x_n(t)$ так же, как некоторые компоненты-источники реакции.

Задачей рассматриваемой методологии цифрового компонентного анализа является представление исходной суммарной реакции в виде разложений (1) и (3). Возможности решения такого рода задач, а также методы решения зависят от ряда факторов. Из них отметим следующие: 1) особенности стимула и реакции, 2) данные о числе и характеристиках источников, 3) данные о свойствах операторов $T_n \{ \}$.

Возможности получения такого рода данных неразрывно связаны с особенностями исследуемых физиологических задач, которые, как правило, не могут решаться с помощью идентичных расчетных процедур. Тем не менее возможно построение достаточно общих расчетных алгоритмов, предусматривающих реализацию различных вычислительных схем в зависимости от характера исходных данных.

Как показали результаты ранее выполненных исследований [3—5] основным различительным свойством компонентов вызванных биоэлектрических реакций нервной системы, использование которого позволяет успешно решать рассматриваемые задачи, является различие в частотных характеристиках компонентов. Поэтому первым этапом в рассматриваемом подходе является этап цифрового спектрального анализа с помощью которого в рассмотрение вводятся частотные характеристики исследуемых процессов.

Цифровой спектральный анализ. С помощью методов цифрового спектрального анализа на ЭВМ реализуется приближенный расчет комплексного спектра, определяемого прямым преобразованием Фурье

$$Y_T(jf) = R_T(f) - jI_T(f) = \int_0^T y(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (4)$$

где $j = \sqrt{-1}$, f —частота, $[0; T]$ —интервал, на котором анализируется функция $y(t)$.

Непосредственно вычисляются действительная $R_T(f)$ и мнимая (I) частотные характеристики, по которым рассчитываются амплитудная, логарифмическая амплитудная, фазовая и другие типы частотных характеристик.

Исходными данными для цифрового спектрального анализа служат дискретные отсчеты $y_k = y(t_k)$, заданные в конечном числе точек на интервале $[0; T]$. Вопросы выбора шага дискретизации и рационального расчетного алгоритма при обработке вызванных реакций рассматривались в работе Газаряна, Мелконяна [1]. С учетом последующих результатов [4] представляется рациональным следующий принцип цифрового расчета спектральных характеристик.

Над массивом исходных данных, представляющих равноотстоящие отсчеты функции $y(t)$ (данные с выхода аналого-цифрового преобразователя, цифрового осциллографа или усреднителя), с помощью одного из стандартных методов [6] выполняется процедура сокращения избыточности данных, использующая для восстановления по дискретным отсчетам метод кусочно-линейной аппроксимации сопрягающимися отрезками прямых. По неравноотстоящим отсчетам с помощью алгоритма, реализующего метод кусочно-линейного преобразования Фурье (КЛПФ), для логарифмических шкал частот рассчитываются частотные характеристики. Предусматривается возможность расчета частотных характеристик по интервалам разной длины (текущие спектры—интеграл вида (4) при разных значениях T), взятым от начала регистрации процесса.

Выделение компонентов в частотной области. Различные компоненты реакции, как правило, соответствуют резонансным пикам для разных частот в картинах частотных спектров [3—5]. Для разделения компонентов в работе Мелконяна и др. [4] предложена компонентная функция следующего вида:

$$\xi(f) = \mu(f) + \sum_{j=2}^{N-1} \xi_j(f) + \nu(f), \quad (5)$$

где

$$\mu(f) = \alpha(f; f_1; n_1), \quad \nu(f) = \beta(f; f_{N-1}; n_{N-1}),$$

$$\xi_j(f) = \beta(f; f_{j-1}; n_{j-1}) + \alpha(f; f_j; n_j),$$

$$\beta(f; f_j; n_j) = 1 - \alpha(f; f_j; n_j),$$

$$\alpha(f; f_j; n_j) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_j} \right)^{2n_j} \right]^{-\frac{1}{2}} - \text{функция Баттерворта,}$$

$$f_j > f_{j-1} \quad (j = 2, \dots, N)$$

Умножение компонентной функции на частотную характеристику обеспечивает разложение на компоненты, принадлежащие различным частотным диапазонам. При этом параметры фильтров, входящих в (5), выбираются согласно диапазонам частот, соответствующих различным резонансным пикам.

Анализ компонентов-источников. Расчет n -го компонента—источника может быть выполнен, если задан соответствующий оператор. Действительно, обозначим частотную характеристику, соответствующую n -му оператору (n -й системе) через $T_n(j\omega)$. Тогда, если система линейна и стационарна, комплексный спектр n -го компонента-источника

$$X_n(j\omega) = Z_n(j\omega)/T_n(j\omega), \quad (6)$$

где $Z_n(j\omega)$ —комплексный спектр функции $z_n(t)$.

Математическое описание n -го оператора, а также некоторые параметры передаточной функции могут уточняться по логарифмическим амплитудным частотным характеристикам, соответствующим компоненту $z_n(t)$ [3].

Другой круг задач возникает, если компонент-источник задан в виде известной функции времени. Тогда на основании его комплексного спектра может быть вычислена частотная характеристика системы (принимается линейной, стационарной), описываемой n -м оператором

$$T_n(j\omega) = Z_n(j\omega)/X_n(j\omega). \quad (7)$$

Расчет компонентов во временной области. Расчет временных компонентов $z_n(t)$ и $x_n(t)$ осуществляется по мнимым составляющим комплексных спектров $Z_n(j\omega)$ и соответственно $X_n(j\omega)$ путем численного расчета обратного синус-преобразования Фурье. Процедуры расчетов строятся на основе алгоритма, реализующего метод КЛПФ [1].

Примеры. Проиллюстрируем конкретные применения рассмотренных цифровых методов для типовых задач обработки вызванных биоэлектрических процессов.

Разложение на компоненты согласно (1). К этой задаче сводится разделение электроретинограммы (ЭРГ) человека, вызванной вспышкой света, на осцилляторный потенциал (ОП) и низкочастотный компонент [4]. В процессе компонентного анализа в частотной области выполняется разделение частотной характеристики ЭРГ на два диапазона, сопрягающихся при частоте 100 гц. Далее по этим компонентам рассчитываются временные составляющие. Высокочастотный компонент соответствует ОП, выделенному в «чистом виде».

Расчет компонента-источника. Эта задача может быть проиллюстрирована примером расчета постоянных времени и субсинаптических токов по кривым постсинаптических потенциалов [3]. Обработываемой функцией является кривая возбудительного постсинаптического потенциала $U(t)$, отводимого методом внутриклеточной регистрации. Искомым является субсинаптический ток $I(t)$. Передаточная функция системы, связывающей $I(t)$ (вход) и $U(t)$ (выход), хорошо аппроксимируется апериодическим звеном (параллельное соединение элементов R_m и C_m). С помощью рассматриваемого метода рассчитывается постоянная времени мембраны $T_m = R_m \cdot C_m$ и кривая субсинаптического тока $I(t)$ (компонент-источник).

Расчет характеристик операторов $T_n\{ \}$. Исследуется связь компонентов медленного отрицательного потенциала (МОП) прямого ответа коры с вероятными источниками МОП—глиальными клетками и пирамидными нейронами [5]. С помощью цифрового компонентного анализа выделены два основных компонента МОП. Кривые глиальной деполаризации и тормозных постсинаптических потенциалов рассматриваются как компоненты-источники. Исследование свойств операторов показало, что компоненты $z_1(t)$ и $x_1(t)$ глиального происхождения совпадают с точностью до постоянного множителя, то-есть система, описываемая оператором $T_1\{ \}$, осуществляет умножение входной функции на постоянный коэффициент. Между соответствующими компонентами нейронного происхождения осуществляются более сложные взаимодействия, описываемые динамическими закономерностями.

ՆՅԱՐԳԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԱՐՈՒՑՎԱԾ ԿԵՆՍԱԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ
ՌԵԱԿՑԻԱՆԵՐԻ ԹՎԱՅԻՆ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Դ. Ս. ՄԵԼԿՈՆԻԱՆ

Առաջարկվում է հարուցված կենսաէլեկտրական ռեակցիաների մշակման
թվային մեթոդ, որը հնարավորություն է տալիս առանձնացնել պոտենցիալ-
ների տարբեր աղբյուրների հետ կապված բաղադրիչներ: Մեթոդի կիրառում-
ները ցույց են տրված հետսինապսային պոտենցիալների, էլեկտրացանցե-
նագրի, կեղևի ուղիղ պատասխանի դանդաղ բացասական պոտենցիալների
մշակման օրինակներով:

DIGITAL PROCESSING OF EVOKED BIOELECTRIC REACTIONS
OF THE NERVOUS SYSTEM

D. S. MELKONIAN

The method for digital processing of evoked bioelectric reactions
is presented to pick out components related with different sources of
potentials. The applications of the method are illustrated by examples
dealing with processing of postsynaptic potentials, electroretinograms,
slow negative potentials of the direct response of the cortex.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Газарян А. А., Мелконян Д. С. Автометрия, 6, 93—100, 1979.
2. КАМАК — системы автоматизации в экспериментальной биологии и медицине. Под ред. Ю. Е. Несгерихина. Новосибирск, 1978.
3. Мелконян Д. С., Мелконян А. А., Мкртчян О. А., Саркисян Д. С., Хондकारян Н. С. В сб.: Нейронные механизмы интегративной деятельности мозжечка. 242—246, Ереван, 1979.
4. Мелконян Д. С., Адамян С. Г., Арешян Т. Г., Роолайд Х. А., Шамишинова А. М. Докл. АН АрмССР, 73, 3, 186—191, 1981.
5. Ройтбак А. А., Фанарджян В. В., Мелконян Д. С., Мелконян А. А. Нейрофизиология, 14, 1, 76—84, 1982.
6. Biomedical Telemetry. Ed. C. A. Cacers. A. P., 1965.

«Биолог. ж. Армении», т. XXXV, № 6, 1982

УДК 612.821.6

УСЛОВНЫЕ ДВИГАТЕЛЬНЫЕ ПИЩЕВЫЕ РЕФЛЕКСЫ
ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ БЕЗЫМЯННОЙ СУБСТАНЦИИ

Т. В. ХАНАМИРЯН, М. Х. МИКАЕЛЯН, Л. С. ГАМБАРЯН

Методом двигательных условных пищевых рефлексов изучалась роль и удельное значение безымянной субстанции в афферентном синтезе. Показано, что это образование принимает участие в оперативной памяти, а следовательно, в механизмах афферентного синтеза и принятия решения.

Ключевые слова: безымянная субстанция, подкорковые образования, афферентный синтез.