

УДК 681.142.4 : 612.822.3

А. М. ГУЩИН, Г. В. НИКОЛАЕВ, С. С. СОКОЛОВ

(Москва)

**ПРИМЕНЕНИЕ БЕЗДИСКОВЫХ  
МИКРОКОМПЬЮТЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ  
ДЛЯ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ МУЛЬТИНЕЙРОННОЙ АКТИВНОСТИ**

**Введение.** Исследования функциональных взаимоотношений группы близкорасположенных нейронов посредством анализа сигналов мульти-нейронной активности [1] находят все большее распространение для выяснения тонких нейрофизиологических механизмов деятельности различных структур мозга.

Такие исследования предъявляют серьезные требования к надежности разделения спайковых последовательностей, генерируемых различными нейронами. Применение электронных дискриминаторов может привести к искажениям трактовки результатов опытов в силу существования неизбежных методических ошибок, обусловленных наличием субъективного фактора, так как амплитудные и временные пороги дискриминации произвольно устанавливаются экспериментатором.

Применение достаточно простых лабораторных комплексов на базе микроЭВМ, например «Электроника 60», и аппаратуры КАМАК [2] позволяет автоматизировать дискриминацию спайковых последовательностей и оценить форму составляющих их спайков, регистрируемых с помощью конкретной микроэлектродно-усилительной аппаратуры.

Возможности анализа могут быть существенно расширены при создании вычислительной сети радиального типа с достаточно мощной ЭВМ на верхнем уровне. Иерархическая структура автоматизированной системы позволяет сделать лабораторный комплекс максимально дешевым, в частности, обойтись без устройств внешней памяти на магнитных дисках. Однако должна быть обеспечена и возможность достаточно эффективной автономной работы экспериментальной установки, что определяет необходимость специальной разработки структуры системного программно-аппаратного оснащения комплекса. Такая разработка была проведена в лаборатории автоматизации нейрофизиологических исследований Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии АН СССР.

**Структура системного программно-аппаратного оснащения комплекса.** Структурная схема системного аппаратного оснащения комплекса представлена на рис. 1. За основу принят вариант 15ВМ-16-012 микроЭВМ «Электроника 60М», снабженный дополнительным каркасом. Вся периферийная аппаратура и большинство плат машины стандартные, серийно выпускаемые промышленностью. Исключение составляет плата В1, модернизированная с целью замены электрофицированной пишущей машинки «Консул-260» на алфавитно-цифровой видеотерминал (АЦВ) с параллельным интерфейсом и знаковосинтезирующее печатающее устрой-

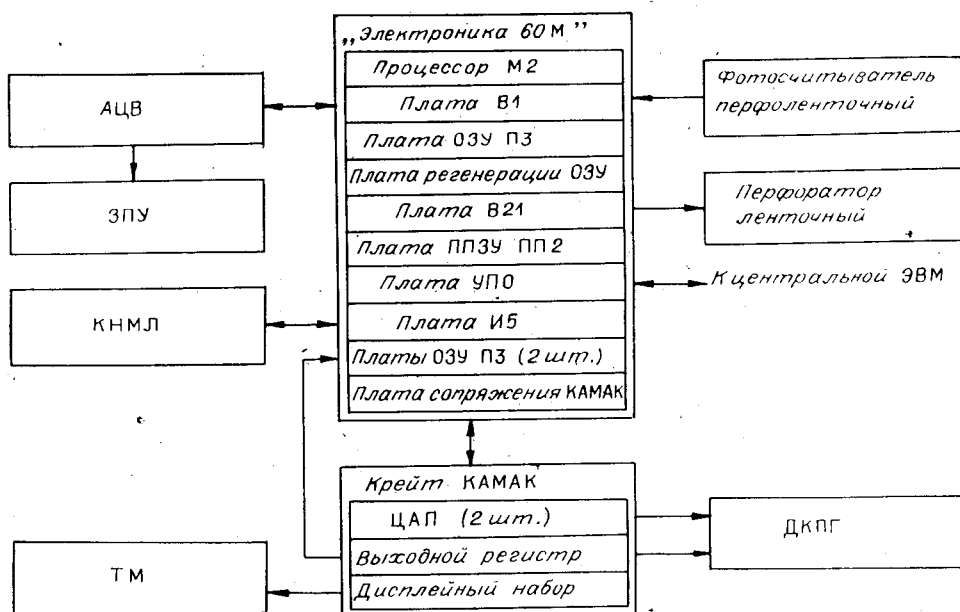


Рис. 1. Структурная схема аппаратного оснащения комплекса

ство (ЗПУ). На основе платы И5 (интерфейс пользователя) разработан контроллер устройства внешней памяти на кассетных магнитных лентах (КНМЛ). Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) построено на основе плат ПЗ (16 Кслов) и разработанного в лаборатории простого квазидиспетчера памяти, позволяющего довести объем ОЗУ до 112 Кслов. Для устранения временных пауз при анализе сигнале в реальном времени применена плата внешней регенерации динамической памяти. Для двусторонней связи с центральной ЭВМ используется устройство последовательного обмена с интерфейсом типа 20-миллиамперной токовой петли. Электрически перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ) служит для хранения системных программ, написанных на языке Ассемблер-60. Особенность применения ППЗУ в нашей разработке заключается в том, что для экономии адресного пространства используются верхние 4 Кслов, зарезервированные разработчиками для внешних устройств. С помощью схемной модернизации платы ПП2 запрещается обращение к ячейкам, адреса которых совпадают с адресами модулей в крейте КАМАК и регистрами внешних устройств, т.е. удается эффективно использовать практически все адресное пространство, с которым может оперировать процессор.

Крейт КАМАК снабжен контроллером, аналогичным СС-11, и содержит (кроме набора функциональных модулей для конкретного исследования) промышленные модули привода двухкоординатного планшетного графопостроителя (ДКПГ) и набор модулей привода телевизионного монитора (ТМ) на базе бытового черно-белого телевизора. Этот набор формирует полный телевизионный сигнал и обеспечивает отображение графиков в поле  $256 \times 256$  точек; вертикальной реперной линии, программно устанавливаемой в любую из 256 точек по горизонтали; 32 строк символов по 64 символа в строке; мерцающего курсора, программно перемещаемого в поле  $32 \times 64$  позиции.

Для обеспечения возможности программно обрабатывать выделенную область двумерного графика нами была произведена модернизация одного из модулей с целью получения дополнительной горизонтальной реперной линии с программной установкой в любую из 256 точек по вертикали.

При отсутствии внешних системных накопителей (например, накопителей на магнитных дисках) основой программного обеспечения явля-

ется перфоленточная система QUASIC, разработанная в НИВЦ АН СССР. Эта система, занимающая около 8 Кслов оперативной памяти, включает достаточно развитый монитор, транслятор компилирующего типа для языка, по синтаксису очень близкого к широко распространенному языку Бэйсик, но имеющего операторы КАМАК-программирования, и позволяет легко обращаться к подпрограммам, написанным на языке Ассемблер-60 [3].

В ППЗУ находятся три программы:

1. Программа начальной инициализации, запускаемая при включении питания и обеспечивающая загрузку программы с высокоскоростного перфоленточного фотосчитывателя, с кассеты КНМЛ или с центральной ЭВМ.

2. Программа-драйвер КНМЛ, находящаяся в том же ППЗУ и позволяющая осуществлять операции с файлами, структура которых совместима с файловой структурой операционной системы РАФОС.

3. Программа связи с центральной ЭВМ, состоящая из совокупности подпрограмм, обеспечивающих обмен данными и символьной информацией, а также так называемый «прозрачный режим», при котором пользователь работает как бы за терминалом центральной ЭВМ и «не чувствует» посредничества микроЭВМ. Прием и передача производятся блоками, состоящими из заголовка, тела блока и контрольной суммы. Правильность приема подтверждается передачей специального блока.

Программа-драйвер КНМЛ и программа связи с центральной ЭВМ могут быть использованы как подпрограммы для языка QUASIC.

Для вывода информации на экран телевизионного монитора и бланк двухкоординатного планшетного графопостроителя разработан интерактивный пакет графических программ. В него входят подпрограммы отображения координатных осей и масштабных сеток, графиков типа  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $y(x, t)$  и  $z(x, y)$  и символьной информации. Количество графиков и их размеры на отображаемом поле определяются входными параметрами подпрограмм, причем масштабы могут быть либо заранее заданы, либо выбираются автоматически по критерию максимального использования выделенного поля. Имеется возможность отображения нескольких видов графиков (типа гистограмм, диаграмм рассеяния или полигонов), различные типы линий (сплошная, штриховая и др.).

Пакет включает также подпрограммы управления положением горизонтальной и вертикальной реперных линий, что дает возможность экспериментатору отмечать и вводить в ЭВМ границы интересующих его зон графиков, особые точки и т. д.

Особенностью данного пакета программ, как и программы связи с центральной ЭВМ, является то, что он может выполняться как на микроЭВМ без операционной системы, так и под управлением операционных систем типа RT-11.

**Алгоритм и реализация программно-аппаратного способа разделения спайковых последовательностей.** Способов машинной дискриминации спайковых последовательностей существует достаточно много, однако все они, как правило, требуют дискретизации с малым шагом по времени (10—15 мкс) сигнала, превышающего заданный амплитудный порог и считающегося спайком. Таким образом, для описания каждого спайка в память ЭВМ должно быть введено 100—150 чисел.

Потребность анализа достаточно большого количества спайков (несколько тысяч) при ограниченном объеме оперативной памяти микроЭВМ определяет необходимость предварительной аппаратной обработки исходного сигнала с целью сжатия вводимой в ЭВМ информации. Это может быть достигнуто с помощью ввода в машину только лишь значений некоторых параметров формы спайков.

Проблема параметризации формы спайков для установки критериев дискриминации рассматривается, например, в работе [4]. Авторами показано, что надежное программное разделение спайков может быть осуществлено при использовании всего лишь трех параметров их формы

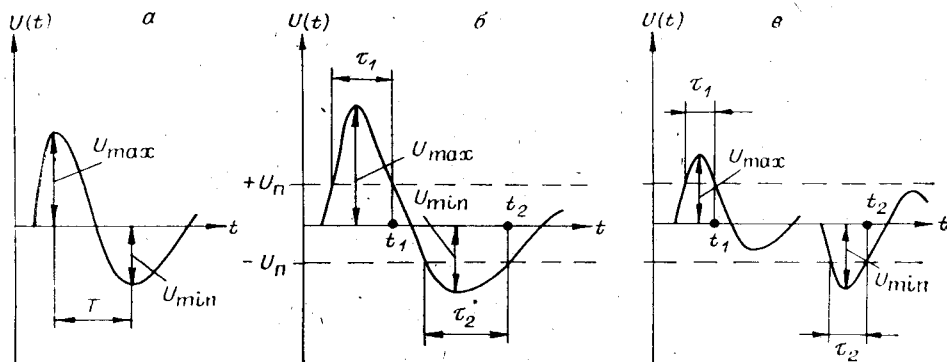


Рис. 2. Алгоритмы параметризации формы спайков

(рис. 2, а): амплитудных значений первой и второй фазы ( $U_{max}$  и  $U_{min}$ ) и отрезка времени между ними  $T$ . Однако для вычисления этих параметров авторы также используют прямое квантование сигнала с временным шагом 14 мкс. При аппаратной реализации описанного выше способа потребовались бы, кроме распространенных электронных блоков (синхрогенераторы, счетчики и т. д.), еще и высокоточный экстрематор, сравнительно быстродействующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и достаточно сложные схемы управляющей логики.

Нами разработан следующий способ параметризации формы спайков, достаточно просто реализуемый без необходимости прямого квантования исходного сигнала или применения указанных выше электронных блоков: 1) по обе стороны нулевой линии сигнала (рис. 2, б) устанавливаются одинаковые уровни пороговых напряжений  $U_n$ ; 2) фиксируются моменты пересечения сигналом амплитудных порогов, и в ЭВМ вводятся: в момент  $t_1$  знак фазы и значения  $t_1$ ,  $\tau_1$  и  $U_{max}$ , в момент  $t_2$  значения  $t_2$ ,  $\tau_2$  и  $U_{min}$ .

Таким образом, двухфазный спайк характеризуется чередованием знака фаз, четырьмя временными и двумя амплитудными параметрами, а спайк, условно названный однофазным (рис. 2, в), — полярностью, длительностью и амплитудой.

Для реализации данного способа существенно то, что значения амплитуд фаз спайков считаются значительно позже экстремумов сигналов, что позволяет использовать простой АЦП следящего типа со стробируемым пиковым детектором на входе.

В состав функциональных модулей КАМАК, необходимых для данного способа параметризации формы спайков, входят как стандартные (регистр прерываний, счетчики, синхрогенератор, таймер), так и два специально разработанных модуля (упомянутый выше АЦП следящего типа со схемами управляющей логики и масштабирующий усилитель-индикатор).

**Методика разделения спайковых последовательностей.** Инициализация начала ввода информации производится вручную или подачей стартового импульса. При этом запускается таймер, обеспечивающий заданное время анализа, и счетчик текущего времени. На счетчик длительности фаз спайков подаются стробирующие импульсы, определяющие параметры  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . В моменты  $t_1$  и (или)  $t_2$  9-разрядный код амплитуды и знака фазы подается на вход регистра прерываний и инициализирует считывание счетчика текущего времени. Окончание ввода происходит либо после ввода заданного количества фаз, либо по истечении заранее заданного времени анализа.

По окончании ввода информации на экран монитора выводятся одновременно две гистограммы распределения величин  $T = t_2 - t_1 + \tau_1 \leq \leq 2$  мс, рассчитанные отдельно для негативно-положительного и положительно-негативного чередования фаз.

Экспериментатор должен установить в нужное место экрана вертикальный репер, задав тем самым верхнюю границу длительности двухфазных спайков. Далее также попарно выводятся гистограммы двух параметров формы, предназначенные для предотвращения возможного принятия артефактов за двухфазные спайки, и экспериментатор с помощью репера устанавливает их верхние границы. Установленные верхние границы длительности и параметров формы служат основой для предварительной сортировки спайков на четыре класса: двухфазные с первичной позитивностью или негативностью и однофазные (позитивные или негативные).

После этого экспериментатору предоставляется возможность наблюдения на экране монитора гистограмм распределения спайков для каждого класса по всем параметрам, например, длительности и амплитуды обеих фаз позитивно-негативных спайков, соответствующих параметров однофазных позитивных и первой фазы позитивно-негативных спайков и т. д.

На следующем этапе при необходимости может быть произведено разделение спайков на подклассы внутри каждого класса. Для этого выбирается и задается машине любая пара параметров, например амплитуда первой и длительность второй фазы негативно-позитивных спайков. На экран монитора сначала выдается трехмерный полигон распределения выбранных параметров в двух ракурсах, отличающихся поворотом осей на  $90^\circ$ , а затем проекция этого полигона в виде диаграммы рассеяния с одновременным отображением гистограммы каждого параметра по осям.

Экспериментатору предоставляется возможность выделить реперными линиями до девяти областей в поле выбранных параметров. Затем выбирается другая пара параметров и диалог возобновляется, причем если один из параметров уже использовался для установки границ областей, то при новом обращении реперы устанавливаются автоматически на ранее определенные позиции.

После окончания процесса разделения подсчитываются количества спайков в каждом подклассе с указанием границ по всем существующим параметрам и формируются массивы времени возникновения спайков в каждой выделенной последовательности. При желании может быть произведено объединение некоторых подклассов (например, двухфазных негативно-позитивных спайков с малой амплитудой второй фазы и однофазных негативных со сходными параметрами негативной фазы).

Качество разделения последовательностей оценивается путем расчета и вывода интервальных гистограмм и динамики средней текущей частоты импульсации нейронов.

Вся полученная информация может быть зафиксирована на накопителях на кассетной магнитной ленте или передана на центральную ЭВМ.

**Заключение.** Описанная выше процедура разделения спайковых последовательностей может быть упрощена путем отображения всей исходной совокупности спайков на плоскости двух главных компонентов, учитывающих все имеющиеся параметры формы спайков, и выделения полученных подклассов. Контроль разделения осуществляется путем применения одного из методов кластер-анализа.

Однако на данном этапе наших исследований сигналов мультинейронной активности нас интересовал не только вопрос разделения спайковых последовательностей, но и характеристики формы спайков, генерируемых нейронами одного микропула, изменения этих характеристик на разных стадиях онтогенеза, при воздействии различных химических веществ, в различных функциональных состояниях животного и т. д.

Полученные предварительные результаты, обсуждение которых выходит за рамки настоящей работы, позволяют надеяться, что примене-

ние комплексов, имеющих вышеописанную структуру системного и проблемного программно-аппаратного оснащения, позволит успешно проводить намеченные исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гасанов У. Г. Системная деятельность корковых нейронов при обучении.— М.: Наука, 1981.
2. КАМАК-системы автоматизации в экспериментальной биологии и медицине.— Новосибирск: Наука, 1978.
3. Подольский Л. И. Система QUASIC для программирования на микроЭВМ.— Пушкино, 1982. (Препринт/АН СССР, НИВИ).
4. Vibert J. F., Costa J. Spike separation in multiunit records, a multivariate analysis of spike descriptive parameters//EEG and Clinical Neuroph.— 1979.— V. 47.— P. 172—182.

Поступила в редакцию 13 декабря 1985 г.

УДК 62-501.4: 518.5

Л. А. ИЩЕНКО, Б. Д. ЛИБЕРОЛЬ, О. Г. РУДЕНКО  
(Харьков)

### О СВОЙСТВАХ ОДНОГО КЛАССА МНОГОШАГОВЫХ АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ

В настоящее время для идентификации объекта, описываемого уравнением

$$y_n = c^{*T} x_n + \xi_n, \quad (1)$$

где  $y_n$  — наблюдаемый выходной сигнал;  $x_n = (x_{1n}, \dots, x_{Nn})^T$  — вектор входных сигналов;  $c^* = (c_1^*, \dots, c_N^*)^T$  — вектор искомых параметров;  $\xi_n$  — случайная помеха, все более широкое распространение получают многошаговые алгоритмы, обладающие лучшими по сравнению с одношаговыми алгоритмами динамическими свойствами [1—5]. Незначительное усложнение структуры алгоритмов, возникающее вследствие увеличения объема используемой информации, приводит в ряде случаев к существенному сокращению времени идентификации.

В [2, 4, 5] изучались многошаговые алгоритмы вида

$$c_{n+1} = c_n + \gamma_{n+1} X_{n+1}^{(S)} [X_{n+1}^{(S)T} X_{n+1}^{(S)}]^{-1} E_{n+1}^{(S)}, \quad (2)$$

где  $X_{n+1}^{(S)} = (x_{n+1}, x_n, \dots, x_{n-S+2})$  — матрица  $N \times S$ ;  $E_{n+1}^{(S)} = (y_{n+1} - c_n^T x_{n+1}, y_n - c_n^T x_n, \dots, y_{n-S+2} - c_n^T x_{n-S+2})^T$  — вектор  $S \times 1$ ;  $S$  — память алгоритма. При исследовании алгоритма (2) предполагалось, что: 1)  $\{x_{ik}\}$  — независимые гауссовы случайные величины с  $M\{x_{ik}\} = 0$  и одинаковой дисперсией  $M\{x_{ik}x_{jm}\} = \sigma_1^2 \delta_{ij} \delta_{km}$ ; 2)  $\xi_{n+1}$  — гауссова величина с  $M\{\xi_{n+1}\} = 0$ ,  $M\{\xi_{n+1}^2\} = \sigma_2^2$ .

Можно показать, что при отсутствии помех  $\xi_n \equiv 0$  максимальная скорость сходимости (2) достигается выбором  $\gamma_{n+1} \equiv 1$ . При этом [4]

$$\alpha_{n+1} = K_s (1 - (1/m))^{n-S+1} \alpha_0, \quad (3)$$

где  $\alpha_i = M\{\|\Theta_i\|^2\}$ ,  $\Theta_i = c_i - c^*$ ,  $\|\Theta_i\|^2 = \sum_{j=1}^N \Theta_{ij}^2$ ;  $K_s$  — коэффициент независимо от способа итерирования на первых  $S$  шагах, равный  $1 - (S/N)$  (для алгоритма Качмажа  $K_s = (1 - (1/N))^S$ );  $M$  — символ математического ожидания;  $m = N - S + 1$ .