

УДК 621.822.014.001.57

Д. Л. ЛЫСЕНКО, А. А. ЦИБУЛЬСКИЙ, П. И. ЧЕРЕДНИКОВ

**УСТРОЙСТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ БИОСИСТЕМ**

Проблема разработки модели биологической клетки, наиболее приближенной к оригиналу, на современном этапе интересует все большее количество исследователей различных направлений. Интерес к работам в этой области связан с человеком как объектом исследований, а также с исследованиями по созданию нейрокомпьютеров и с разработкой элементной базы для них. Актуальность проблемы связана со сложностью постановки и проведения биологических экспериментов, необходимых для изучения структуры и конкретных параметров модели, с ограниченностью спектра применяемых математических и технических средств моделирования.

Для решения рассмотренной выше проблемы в работе [1] приводится описание комплекса моделей для оценки взаимосвязи функциональных, структурных и метаболических процессов в динамике для различных функциональных состояний и форм поведения клетки. В частности, например, рассматриваются модели, предназначенные для воспроизведения электрохимических механизмов ионного транспорта, генерации трансмембранного потенциала и пр. Модель клетки, описанная в работе [2], учитывает общеклеточные свойства пластического и энергетического обмена, без чего адекватное воспроизведение даже такой специфической формы деятельности нейрона, как его информационная функция, оказывается невозможной. Построение нейрокомпьютеров, в основном сводится к копированию иерархической организации структуры центральной нервной системы, реализуемой в виде нейронных ансамблей [3]. Элементы нейронных ансамблей выполняют определенные логические (или арифметические) функции. Такая организация не позволяет учитывать структурные изменения, происходящие в единичных элементах системы.

В работах [1-3] не учитывался вопрос, касающийся нелинейного характера изменения энергоемкого параметра системы. Воспроизводимость биологических процессов может быть обеспечена при условии оптимальной структуры модели. В предлагаемой работе моделирование процессов ведется путем управления энергоемким параметром (энергетическим режимом параметрической зонной системы). Разработано устройство, позволяющее моделировать основные функции биологического нейрона: возбуждение, генерацию потенциала действия, кратковременную память. В качестве модели использована параметрическая зонная модель элементов нейронных сетей [4, 5]. В основу работы модели положена теория параметрического резонанса в нелинейных колебательных системах на высших гармониках.

Структурная схема устройства приведена на рис. 1. Устройство включает следующие функциональные узлы:

I – управляющий, состоящий из следующих блоков: генератор накачки 1, усилитель мощности 2, источник смещения 3. Управляющие параметры: амплитуда и частота накачки, амплитуда напряжения смещения;

II – непосредственно модель биологического нейрона (расширенная блок-схема модели приведена на рис. 2);

III – функциональный, включающий следующие блоки: 1...n – функциональные блоки (дифференциаторы, интеграторы, генераторы различной частоты и формы сигнала), усилители с регулируемым коэффициентом усиления 2, согласующие цепи (буферные каскады) 3, электронный коммутатор 4;

IV – узел визуализации, который может включать осциллограф 1, либо ПЭВМ 2 (при использовании специализированного интерфейса).

Блок-схема модели биологического нейрона приведена на рис. 2. Принцип работы устройства заключается в следующем.

Узел I вырабатывает сигнал накачки для возбуждения параметрической зонной модели (модель нейрона – узел II). Напряжение возбуждения описывается выражением:

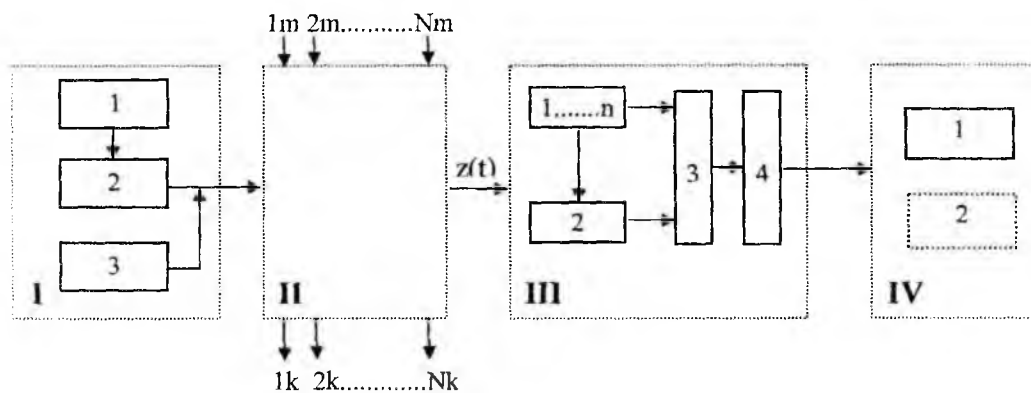


Рис. 1

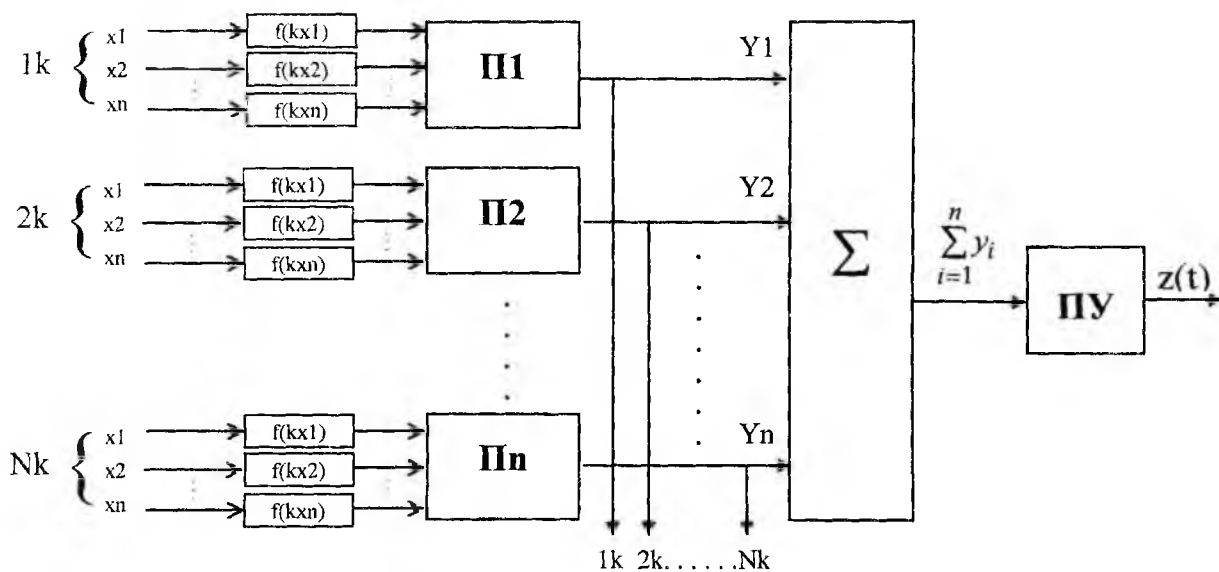


Рис. 2

$$U(t) = U_{CM} + U_m \cos \omega t ,$$

где U_{CM} , U_m – амплитуда напряжения смещения и возбуждения соответственно; ω – частота напряжения накачки.

Далее напряжение накачки подается на каждый параметрический контур (параметрон) П1, П2, ..., Пn, параметрический сумматор и параметрический усилитель ПУ (см. рис 2). Каждый из параметронов П1, П2, ..., Пn выполняет строго определенную операцию (арифметическую или логическую), а также функцию какого-либо элементарного устройства (фильтр, линия задержки и пр.). С точки зрения биологического нейрона, параметроны выполняют роль точек ветвления дендритного дерева. На входы $1m, 2m, \dots, Nm$ подаются сигналы, величина каждого из которых изменяется относительно соответствующей весовой функции входа. Выходные сигналы $Y1, Y2, \dots, Yn$ подаются на сумматор, сигналы $1k, 2k, \dots, Nk$ – на входы узла III.

Выходной сигнал $\sum_{i=1}^n y_i$ с выхода сумматора подается на параметрический усилитель ПУ, работающий в режиме, при котором параметрические колебания возникают при изменении входного сигнала.

ла. Сумматор, в совокупности с параметрическим усилителем, образуют цепочку сома-аксон. При превышении входным сигналом порогового значения на выходе ПУ появляются колебания с частотой накачки, промодулированные напряжением сигнала.

Следует отметить, что параметрический контур, используемый в сумматоре, является индуктивным, вследствие того, что емкость мембраны на всем протяжении потенциала действия постоянна. В свою очередь, в параметронах П1, П2, ..., Пn можно в качестве энергоемкого элемента применить нелинейную емкость (например, емкость p-n перехода), и следовательно параметрон будет емкостным. Известно, что изменения геометрических размеров или геометрии соседних клеток приводят к преобразованию логической характеристики имеющейся точки ветвления. Например, при расширении нервного волокна увеличивается задержка сигнала, которая связана с зарядкой мембранной емкости. Таким образом используя в параметронах П1, П2, ..., Пn емкости с различным номинальным значением можно расширить функциональные возможности модели для исследования изменяющейся геометрии нервной клетки.

Сигналы с выходов узла II поступают на входы функциональных блоков узла III, где выполняются функциональные преобразования сигналов по форме, амплитуде и частоте колебаний. Преобразования выполняются с целью исследования характера изменений параметров параметрической зонной системы (магнитная индукция В, напряженность магнитного поля Н, потокосцепление У, динамическая индуктивность резонансного контура и пр.). Все исследуемые сигналы подаются в узел IV на осциллограф, либо через специализированный интерфейс в ПЭВМ.

Возможная реализация модели нейрона (см. рис. 2) представлена электрической схемой на рис. 3. Модель реализована на индуктивных параметрических устройствах (ИПУ). Для упрощения изготовления модели и проведения экспериментальных исследований число параметронов П1, П2, ..., Пn сокращено до трех, по три входа в каждом. Функциональное назначение входных параметронов:

- П1 – линия задержки;
- П2 – логический элемент «ИЛИ», «И» (в зависимости от состояния входа х3);
- П3 – элемент «НЕ» (инверсия.)

Функции весовых коэффициентов выполняют сопротивления связи $R_{св}$ на входах первичных обмоток трансформаторов связи $Tr_{св}$.

Сложение сигналов У1 – У3 в сумматоре, как и на входах х1 – х2 в параметронах, выполняется по мажоритарному принципу. Параметрический усилитель ПУ работает в режиме, при котором изменение входного сигнала вызывает параметрические колебания. В этом случае рабочая точка тока накачки выбирается вне области генерации. Система реагирует на увеличение входного сигнала, определяемого величиной тока накачки.

Конструктивно ИПУ выполнен на ферритовых тороидальных сердечниках и содержит по три обмотки: обмотку управления, накачки и резонансную. Каждая резонансная обмотка совместно с линейной емкостью образует нелинейный колебательный контур. Включение сопротивлений в резонансный контур позволяет исключить самовозбуждение (генерацию) ИПУ, в результате чего, при отсутствии сигнала на обмотках управления, ИПУ переводится в режим «срыва» колебаний.

Принцип действия моделирующей схемы заключается в следующем. На входы х1 – х2 каждого из параметронов П1 – П3 поступают сигналы различной амплитуды и фазы. На входы первичных обмоток согласующих трансформаторов $Tr_{св}$ поступают сигналы просуммированные по мажоритарному принципу. Сигнал с каждого трансформатора $Tr_{св}$ поступает на управляющие обмотки соответствующих нелинейно-параметрических систем – ИПУ, питание которых осуществляется от внешнего генератора накачки. При условии достаточной амплитуды входных сигналов, совпадения их фаз с фазой накачки, в ИПУ возбуждаются колебания, амплитуда которых пропорциональна амплитуде входных сигналов. По обмоткам накачки протекает ток, периодически насыщающий сердечники трансформаторов ИПУ и модулирующий индуктивность в нелинейно-параметрической системе. Величина тока накачки определяет глубину модуляции индуктивности, которая изменяется с удвоенной частотой напряжения накачки.

Величина последовательного сопротивления в резонансных контурах сумматора и ПУ подобрана так, чтобы при отсутствии входных сигналов (сигналов на обмотках управления) потери в системе были несколько больше количества энергии передаваемой по цепи накачки, что приводит систему в

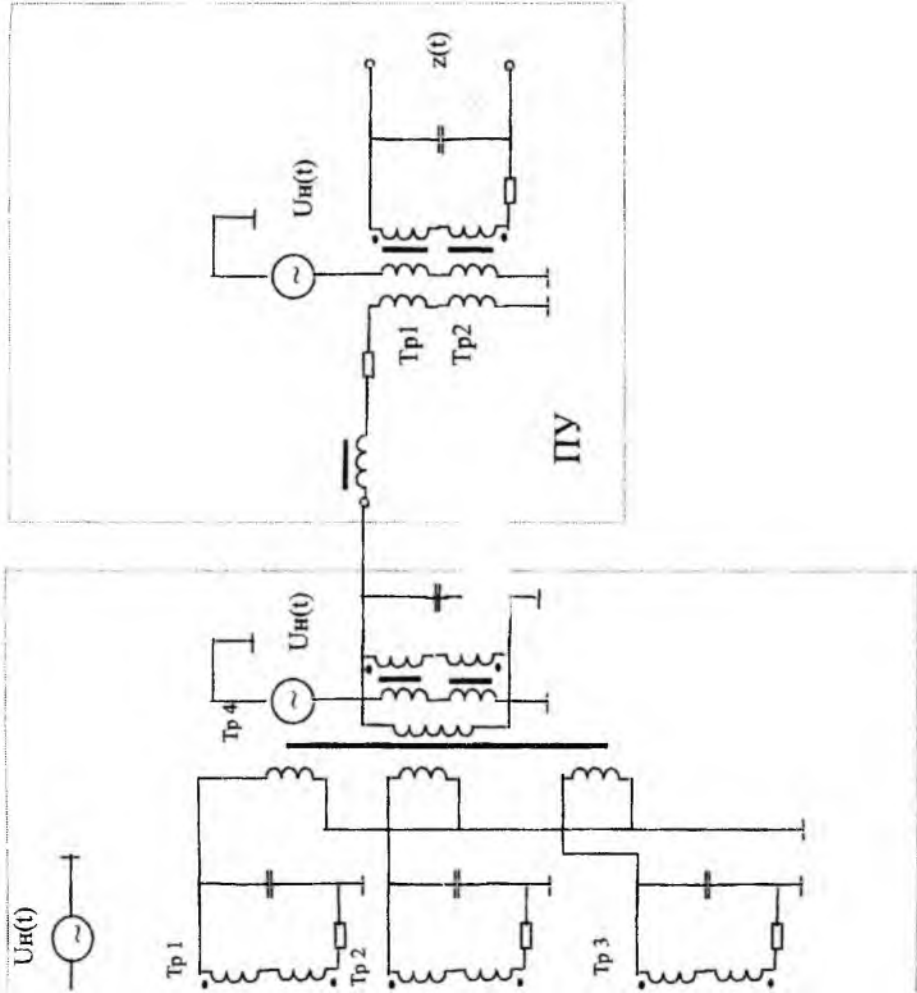


Рис. 3

устойчивое состояние – отсутствие колебаний. При наличии входного сигнала с фазой питающего напряжения или отличной на 180° в систему передается дополнительная энергия. Прирост энергии приведет к возникновению в контуре возрастающих параметрических колебаний, амплитуда которых ограничивается нелинейностью системы. Следовательно, на выходе сумматора (или ПУ) будут колебания промодулированные частотой входного сигнала с амплитудой пропорциональной входному сигналу. С точки зрения биологического нейрона возбуждение колебаний в параметронах сумматора и ПУ можно сопоставить со следующими процессами: деполяризующее напряжение определенной величины приводит к увеличению проводимости мембраны для ионов натрия. Поэтому последние проходят сквозь мембрану, что увеличивает деполяризующее напряжение, приводя к еще большему увеличению проводимости для ионов натрия. Данный процесс является типичным эффектом положительной обратной связи. В свою очередь выходящие из клетки ионы калия приводят мембранный потенциал к равновесной величине, т.е. формально являются эквивалентом потерь в системе.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования дают основания предполагать наличие аналогии биологических и параметрических процессов на высших гармониках с позиции следующих явлений:

- проводимость ионных каналов подобна активному сопротивлению параметрической системы, значение которого становится отрицательным при резонансе;
- энергетический параметр (индуктивность или емкость) подобен химическому потенциалу открывания ворот ионных каналов;
- фаза колебаний подобна тормозящим и возбуждающим сигналам, соответственно при фазе параметрических колебаний 0° и 180° ;
- сигнал $z(t)$ с ПУ в узле II подобен потенциалу действия.

Разработанное устройство позволяет исследовать нелинейный характер изменения параметров биологического нейрона на основе нелинейно-параметрической зонной модели, работающей на высших гармониках. Устройство позволяет объективно управлять биологическими процессами, обеспечивая их воспроизводимость и простоту управления на основании системы аналогий. При включении в устройство электрических цепей, моделирующих точки ветвления аксонов, возможно расширение функциональных возможностей модели нейрона по передаче и информационной обработке сигналов.

Список литературы: 1. *Механизмы живой клетки: алгоритмическая модель* / С.Н.Гринченко, С.Л.Загускин. М.: Наука, 1989. 232 с. 2. *А.с. 945874, СССР, МКИ G 06 G7/60. Устройство для моделирования распределения потоков энергии в экологических и биологических системах* / С.Н.Гринченко, С.Л.Загускин // Открытия. Изобретения. 1982. №27. С.236. 3. *Нейрокомпьютеры и интеллектуальные роботы* / Н.М.Амосов, Т.Н.Байдык, А.Д.Гольцев и др. / Под ред. Н.М.Амосова. Киев: Наук.думка, 1991. 272с. 4. *Лысенко Д.Л., Цибульский А.А. Способ моделирования процессов в биосистемах на основе нелинейной параметрической модели* // «Радиоэлектроника и молодежь в XXI в.: Часть 1»: Сб. науч. трудов по материалам 3-го Международного молодежного форума. ХТУРЭ. Харьков, 1999. С.189-192. 5. *Цибульский А.А., Чередников П.И. Построение параметрической зонной модели элементов нейронных сетей* // Проблемы бионики. 2000. Вып.52. С. 58-62.

Поступила в редколлегию 29.06.2000