

2. Hammond B. P. Chromatic Sensitivity and Spatial Organization of Cat Visual Cortical Cells: Cone-rod Interaction. — «J. Physiol.», 1971, vol. 123, p. 475—494.
3. Von Seelen W. Zur Informationsverarbeitung im visuellen System der Wirbeltiere, I. — «Kybernetik», 1970, Bd. VII, H 2, S. 43—60.
4. Von Seelen W. Zur Informationsverarbeitung im visuellen System der Wirbeltiere, II. — «Kybernetik», 1970, Bd. VII, H 3, S. 89—106.
5. Зозуля Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Непрерывная математическая модель нейронной сети. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 8. Харьков, 1971, с. 93—102.
6. Зозуля Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Математическая модель простых рецептивных полей зрительной коры. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 7. Харьков, 1971, с. 48—53.
7. Куманин Ю. А., Зозуля Ю. И., Червов В. Г. Модели цветовых рецептивных полей сетчатки суслика. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 11. Харьков, 1973, с. 13—21.
8. Wiesel T. N., Hubel D. H. Spatial and Chromatic Interaction in the Lateral Geniculate Body of the Rhesus Monkey. — «J. Neurophysiol.», 1966, vol. 29, p. 1115—1156.
9. De Valois, Abramov I. A., Jacobs I. H. Analysis of Response Patterns of LGN Cells. — JOSA, 1966, vol. 56, p. 966—977.
10. De Valois R. L. Analysis and Coding of Color Vision in the Primate Visual System. — «Cold Spring Harbor Symp. of Quant. Biol.», 1965, vol. 30, p. 567—579.
11. Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive Fields of Optic Nerve Fibres in the Spider Monkey. — «J. Physiol.», 1960, vol. 154, p. 572—580.

УДК 62.506.2

Б. А. МАЛИК, инж.,  
В. Г. ЧЕРВОВ, канд. биол. наук

## ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ НЕЙРОНА

В настоящее время много внимания уделяется изучению структурно-функциональной организации нейронной сети мозга как наиболее совершенной вычислительной среды. Ведутся поиски возможностей моделирования этой среды и ее отдельного элемента — нейрона. Создание малогабаритного нейроподобного элемента с большим количеством входов, значительным объемом памяти, сочетающего в себе логические и линейные функции, — одна из задач бионики. В данной работе предлагается одно из возможных решений этой задачи, исследуются характеристики нейроподобного оптоэлектронного элемента вычислительной среды.

### Физиологические предпосылки и возможности моделирования нейрона

Клетка нервной ткани мозга животных и человека — биологический нейрон — имеет до  $10^4$  входов (синапсов) и суммирует входные сигналы. Внутри отдельного нейрона преобразуются электрические сигналы, а связь между нейронами осуществляется в синапсах с помощью потоков химических веществ.

Внутренние электрические сигналы трансформируются в потоки химических веществ в пресинаптических участках, а внешние потоки химических веществ преобразуются в электрические сигналы в постсинаптических участках мембраны нейрона. Суммарный электрический сигнал формируется и преобразуется в частоту электрических импульсов в аксонном холмике нейрона. Веса связей между отдельными нейронами зависят от распределения напряженности электрического поля в постсинаптических участках мембраны нейрона. Это распределение определяется активностью всех латерально взаимодействующих синапсов нейрона. Память нейрона формируется в результате изменения эффективности пресинаптических участков мембраны пропорционально интегралу от электрического сигнала, генерируемого в аксонном холмике нейрона [1].

С учетом тенденции разрабатывать методы обработки информации при помощи оптоэлектронных элементов и систем, а также на основании анализа функциональных возможностей этих элементов и систем можно прийти к выводу о возможности моделирования биологического нейрона устройствами, построенными на этих элементах. В соответствие синапсам биологического нейрона можно поставить фотосопротивления. Аналогично синапсам, токовая реакция которых зависит от количества поступающего медиатора и напряженности электрического поля в постсинаптической мембране, ток через фоторезисторы определяется освещенностью и подающимся на них напряжением. Электрические связи между отдельными синапсами в нейроне моделируются с помощью обычных резисторов, соединяющих между собой фоторезисторы. В модели функцию суммирования может выполнять плоская резисторная сетка. К узлам последней подключены резисторы, другие выводы которых соединены в общую точку. К этим же узлам подключены и фоторезисторы, вторые выводы которых соединены в другую общую точку. Преобразование суммарного электрического сигнала в частоту световых импульсов можно осуществить посредством светодиода с S-образной вольтамперной характеристикой, включенного между общими точками сумматора. Светодиод выполняет также функции порогового элемента и элемента аналоговой памяти.

Оптоэлектронным элементам свойственно высокое быстродействие, а согласование их друг с другом не вызывает существенных технических затруднений. Однако моделирование с помощью дискретных радиокомпонент не позволяет обеспечивать необходимую полноту моделирования свойств биологического нейрона: с возрастанием количества входов увеличиваются габариты и повышается трудоемкость монтажа. Поэтому необходимо изучить возможности интегрального исполнения оптоэлектронной модели нейрона, входные сигналы которой задаются средствами волоконной оптики. Такой вариант исполнения дает

возможность создать нейроподобный элемент с количеством входов, соответствующим числу входов биологического нейрона, уменьшить габариты и повысить технологичность изготовления.

### Принципиальная электрическая схема модели

Многовходовый токовый сумматор с матрицей фоторезисторов и параллельно включенным светодиодом получает питание от источника постоянного тока (рис. 1). Амплитуда тока источника выбирается таким образом, чтобы нагрузочная характеристика светодиода проходила через участок генерации его вольтамперной характеристики.

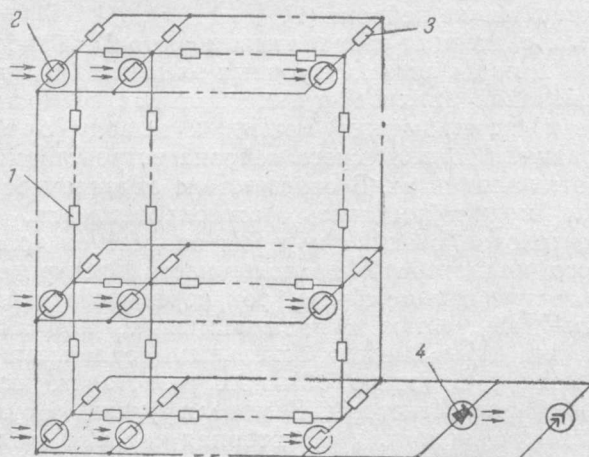


Рис. 1.

Когда фоторезисторы 2 матрицы не освещены, через светодиод 4 в прямом направлении протекает максимальный ток. При освещении фоточувствительной матрицы ее сопротивление становится меньше. Вследствие этого сила тока, проходящего через светодиод 4, также уменьшается, вызывая снижение интенсивности светоизлучения. Когда ток оказывается ниже порогового значения, светоизлучение прекращается. Таким образом, модель осуществляет инверсию входных оптических сигналов. Ток светодиода связан линейной зависимостью с токами отдельных фоторезисторов. В свою очередь, ток каждого фоторезистора определяется его собственной проводимостью, которая зависит от освещенности, а также проводимостью соседних фоторезисторов матрицы, управляемых отдельно световыми сигналами. Подбирая сопротивления резисторов сетки 1, можно изменять величины токов, проходящих через отдельные фоторезисторы 2, и регулировать взаимное влияние входных световых сигналов,

обеспечивая тем самым требуемый закон латерального взаимодействия между ними.

Если ток источника  $i_0$  имеет постоянную величину, то ток светодиода  $i$  линейно связан с токами отдельных фотоспротивлений  $i^{ij}$  матрицы модели нейрона:

$$i(t) = i_0 - \sum_{i,j=1}^n i^{ij}(t). \quad (1)$$

Здесь  $i = 1, 2, \dots, n$  — индекс ряда фотоспротивлений матрицы;  
 $j = 1, 2, \dots, n$  — индекс отдельного фотоспротивления в ряде матрицы.

Токи  $i$  и  $i^{ij}$  связаны со светоотдачей светодиода  $R$  и освещенностью фотоспротивлений  $F^{ij}$  уравнениями [2]

$$i(t) = \alpha R(t); \quad (2)$$

$$i^{ij}(t) = \beta_{ij} U^{ij}(t) F^{ij}(t), \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta$  — коэффициенты пропорциональности;

$U^{ij}$  — падение напряжения на  $j$ -м сопротивлении  $i$ -го ряда матрицы.

Связь между светоотдачей светодиода и освещенностью фотоспротивлений можно получить из (1) с учетом (2) и (3):

$$R(t) = R_0 - \frac{1}{\alpha} \sum_{i,j=1}^n \beta_{ij} U^{ij}(t) F^{ij}(t). \quad (4)$$

Соотношение (4) показывает, что модель нейрона является адаптивным сумматором-инвертором и моделирует тормозной нейрон.

В результате латерального взаимодействия фотоспротивлений матрицы падение напряжения на отдельном фотоспротивлении можно изменять с помощью оптических управляющих сигналов, поступающих на модель. Это, в свою очередь, дает возможность устанавливать необходимое соответствие между  $F^{ij}$  и  $R(t)$ . В качестве порогового сумматора-инвертора с порогом зажигания  $R_n = \text{const}$  модель нейрона может реализовывать логическую функцию Шеффера или функцию Вебба, которые определяют полные системы логических функций.

Вследствие инерционности фоторезисторов модель нейрона преобразовывает частоту входных световых сигналов в токи, протекающие через фоторезисторы, и задерживает входные сигналы на постоянный интервал времени  $\tau$ . Этим обеспечивается кратковременная динамическая память входных сигналов. Для осуществления долговременной аналоговой памяти в модели можно использовать необратимые структурные изменения в кристалле светодиода, эффективность  $\alpha^{-1}$  которого уменьшается пропорционально заряду, прошедшему через диод в прямом направлении с момента начала его работы  $t_0$ .

Уменьшение светоотдачи диода через величину прошедшего заряда можно определить по уравнению

$$\alpha^{-1}(t) = \alpha_0^{-1} - \gamma \int_{t_0}^{t-\tau} i(t') dt' = \alpha_0^{-1} - \gamma \int_{t_0}^{t-\tau} \alpha(t') R(t') dt', \quad (5)$$

где  $\gamma$  — коэффициент старения.

Тогда выражение для выходного сигнала модели нейрона запишется в виде

$$R(t) = \begin{cases} R(t_0) - \left[ \int_{t_0}^{t-\tau} \alpha(t') R(t') dt' + \sum_{i,j=1}^n b_{ij}(t-\tau) F(t-\tau) \right] \text{ при} \\ \int_{t_0}^{t-\tau} \alpha(t') R(t') dt' + \sum_{i,j=1}^n b_{ij}(t-\tau) F(t-\tau) \leq R(t_0) - R_n, \\ 0 \text{ при} \int_{t_0}^{t-\tau} \alpha(t') R(t') dt' + \sum_{i,j=1}^n b_{ij}(t-\tau) F(t-\tau) > \\ > R(t_0) - R_n, \end{cases} \quad (6)$$

где  $R(t_0) = \frac{i_0}{\alpha_0}$  — светоотдача диода в момент  $t_0$  при отсутствии входных сигналов;

$R_n$  — порог зажигания светодиода;

$b_{ij}(t) = \frac{\beta_{ij}}{\alpha(t)}$  — коэффициент передачи  $j$ -го фотосопротивления  $i$ -й линейки матрицы фотосопротивлений;

$a(t) = i_0 \gamma \alpha(t)$  — параметр, характеризующий степень светоотдачи диода в зависимости от прошедшего через него в прямом направлении тока.

Из (6) следует, что нейроподобный оптоэлектронный элемент является адаптивным пороговым сумматором-инвертором с долговременной и кратковременной памятью.

### Разновидности нейроподобных элементов

Существует целый класс нейроподобных элементов, отличающихся друг от друга степенью приближения к реальному прототипу, а также схемным или конструктивным решением, осуществляемым с применением разных технических приборов. Все разновидности моделей имеют единую структурную схему (рис. 2), состоящую из блока приема — преобразования сигналов ППОС, блока генерирования оптических сигналов ГОС и блока питания БП.

В ППОС связи между входными фоторезисторами 2 (рис. 1) также могут выполняться из фоторезисторов. Это дает возможность изменять связи между входами нейроподобного элемента, задавая их оптически. Чтобы блок ППОС обрабатывал входные сигналы по заданному закону, достаточно создать определенное освещение фоторезисторов сетки.

Если в блоке ГОС в качестве генератора излучения использовать светодиод с S-образной вольтамперной характеристикой, то выходная информация нейроподобного элемента будет закодирована в частоте и длительности генерируемых световых импульсов. Нагрузочная характеристика светодиода должна проходить через падающий участок его вольтамперной характеристики. Схема работает в автоколебательном режиме; при увеличении тока через светодиод частота и длительность импульсов увеличиваются.

Блок ГОС может быть выполнен также в виде матрицы газосветных или люминесцентных приборов. В целях получения неинвертированного выходного сигнала (при моделировании возбуждающих нейронов) сумматор и генератор включаются последовательно и питаются от источника ста-



Рис. 2.

бильного напряжения. Применяя такой же источник, можно получить и инвертированный сигнал. Для этого сумматор и генератор необходимо включить параллельно, а напряжение питания подать через балластное сопротивление, величина которого выбирается таким образом, чтобы нагрузочная характеристика светодиода проходила через участок генерации на его вольтамперной характеристике.

Если для питания используется энергия оптического источника (например, квантового генератора или солнечная), то блок питания можно выполнить в виде матрицы параллельно соединенных фотодиодов. В диапазоне светоизлучения напряжение на светодиоде изменяется незначительно. Поэтому ток, генерируемый фотодиодами, тоже можно считать постоянным по амплитуде.

## В ы в о д ы

1. Предлагаемая модель обеспечивает высокую достоверность моделирования основных функциональных свойств биологического нейрона. Это достигнуто установлением четкого соответствия отдельных элементов структуры модели морфологическим образованиям биологического нейрона, выполняющим аналогичные функции.

2. Модель является адаптивным пороговым сумматором-инвертором с долговременной и кратковременной памятью.

3. Модель конструктивно может быть выполнена с числом входов, соответствующим числу входов биологического нейрона. Этого можно достигнуть средствами волоконной оптики.

4. Модель имеет простое схемное и конструктивное решение, так как состоит из большого количества однотипных элементов, что позволяет при- дать ей в интегральном исполнении вид слонистой структуры.

5. Разновидности модели расширяют ее функциональные возможности и упрощают изготовление при построении вычислительных сред.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сб. «Механизмы деятельности центрального нейрона». Под ред. Д. А. Бирюкова. М., «Наука», 1966. 263 с.
2. Свечников С. В. Элементы оптоэлектроники. М., «Сов. радио», 1971. 270 с.

УДК 578.087 + 612.849

Ю. И. НЕФЕДОВ, канд. техн. наук,  
А. В. ШАТОХИН, инж.,  
В. Г. ЧЕРВОВ, канд. биол. наук

### ЭЛЕКТРОННЫЙ СВЕТОВОЙ СТИМУЛЯТОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Всестороннее изучение процессов обработки визуальной информации в зрительной системе — важная задача биологии и бионики. Эффективным методом исследования нейронных функциональных образований зрительной системы — рецептивных полей — является микроэлектродное отведение реакций нервных клеток на различные световые сигналы. Изучаются реакции на движущиеся и мигающие световые сигналы различной конфигурации, на небольшие мигающие стимулы, сканирующие обширную область фоторецепторов сетчатки. Отсутствие многофункциональных световых стимуляторов, позволяющих быстро изменять режимы стимуляции, снижает эффективность нейрофизиологических экспериментов.

В лаборатории бионики Харьковского института радиоэлектроники разработан и изготовлен универсальный электронный световой стимулятор УЭСС-1. Он предназначен для формирования и проектирования на сетчатку разнообразных световых сигналов и может использоваться при нейрофизиологических и психофизиологических исследованиях зрительной системы. Световые сигналы формируются на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) и с помощью оптической приставки проектируются на сетчатку.

Технические параметры УЭСС-1 следующие.

1. Форма световых стимулов и их размеры на экране ЭЛТ:
  - а) светлый круг, диаметр которого регулируется в пределах 0,5—5 мм;
  - б) прямая светлая линия (или полоса толщиной до 5 мм); угол наклона и длина плавно регулируются соответственно от 0 до 180° и от 1 до 20 мм;
  - в) окружность диаметром 1—20 мм;
  - г) эллипс с любыми значениями эксцентриситетов и ориентации.
2. Люминофор ЭЛТ имеет широкую спектральную характеристику; максимуму излучения соответствует длина световой волны 0,5 мкм.
3. Яркость стимулов на экране ЭЛТ регулируется в пределах 26—200 нт.