

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ СЕНСОРНЫХ ПОДСИСТЕМ НА МОП- СТРУКТУРАХ

А.И. Андрюхин

Донецкий национальный технический университет

Розглядаються проблеми діагностування та моделювання сенсорних нейроподібних мереж зроблених з МОН-структур.

Основой будущей вычислительной техники и искусственного интеллекта будут нейрокомпьютерные системы. Базовой технологией их аппаратной реализации в ближайшие 10-15 лет, невзирая на исследования и разработку RTD, SET, других нанoeлектронных элементов, очевидно останется МОП-технология [1].

Идеальным решением реализации сенсорных систем восприятия на базе твердотельной электроники являются в настоящее время аналоговые СБИС и этот вопрос рассматривается в различных работах, из которых укажем [2-4]. Перспективные направления развития элементной базы представлены в [5] и приведенных там же работ.

Основные комбинации транзисторов

При реализации сенсорных подсистем возможно использовать помимо функции переключателя, который является единственным, обычно эксплуатируемым в цифровых схемах, следующие функции, обеспеченные отдельным транзистором:

- генерация квадрата, квадратного корня, показательных и логарифмических функций.
- управляемый напряжением источник тока.
- управляемая напряжением проводимость, линейная в ограниченном диапазоне.
- управляемая напряжением проводимость, линейная в очень широком диапазоне изменения тока.
- аналоговое умножение напряжений.
- краткосрочное и долгосрочное аналоговое хранение.
- световой датчик.

Аналоговые схемы должны быть основаны на соотношениях согласованных компонентов, чтобы устранить любую зависимость от параметров процесса их изготовления. Количество несоответствий

электрических параметров в подобных компонентах, зависит от процесса, от типа компонента, и от их размера и расположении.

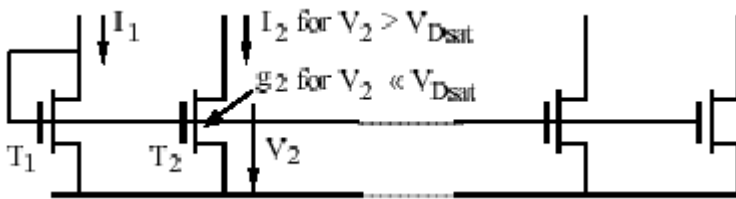


Рис.1. Повторитель умножающего тока (умножитель тока) .

Одна из наиболее полезных элементарных комбинаций транзисторов – повторитель тока, показанный на рис.1, который обеспечивает взвешенную копию I_2 его входного тока I_1 согласно:

$$I_2 = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} I_1$$

Текущее запоминание (или хранение) может быть получено, добавляя транзистор T_d , как показано на рис. 2.. Несколько таких динамических подходов могут объединяться и синхронизироваться последовательно, чтобы обеспечить непрерывные токи, значениями соотношений между которыми являются целые числа.

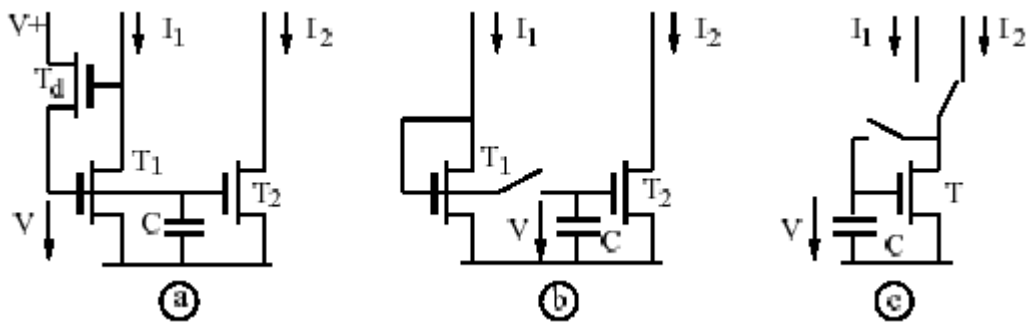


Рис.2. Запоминание токов: пик значения(а), выборка и захват (b), точная копия с отдельным транзистором (с).

Аналогичная модифицированная ячейка памяти на рис.3. предложена в [2].

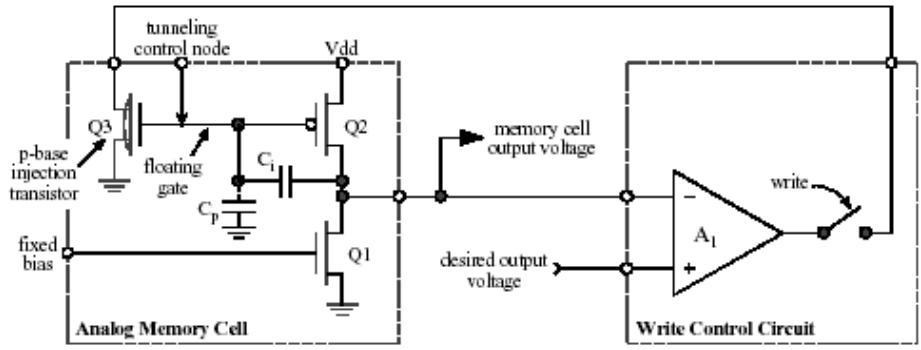


Рис.3.Общая схема ячейки аналоговой памяти с подсхемой записи.

Комбинации n- и p-канальных транзисторов могут использоваться, чтобы выполнить сложение или вычитание точных копий двух токов. Любая попытка наложить отрицательный входной ток блокирует эти два транзистора и обращает в нуль ток выхода. Это может применяться для осуществления специальных функций типа $\min(A, B)$ и $\max(A, B)$, показанных на рис. 4[3].

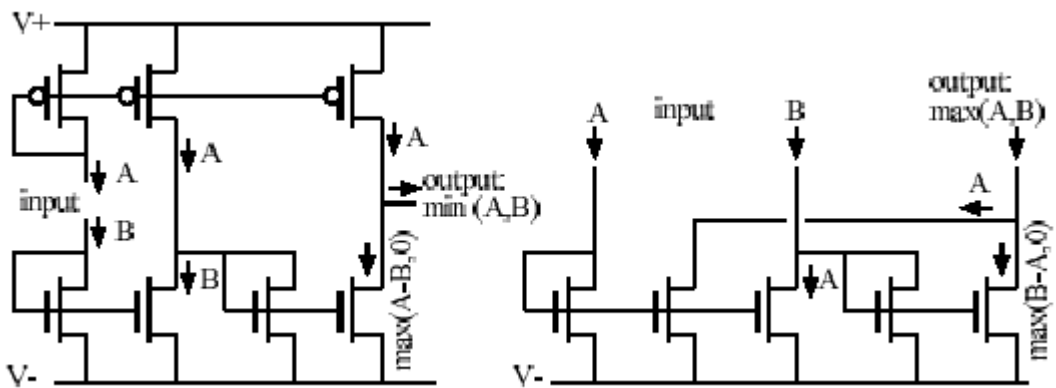


Рис.4.Схемы для вычисления $\min(A, B)$ и $\max(A, B)$.

Другая наиболее важная элементарная комбинация транзисторов - известная дифференциальная пара, представленная на рис.5[3] с характеристиками передачи для насыщенных транзисторов.

В частности, дифференциальная пара при некотором режиме работы транзисторов (сильная инверсия) обеспечивает умножение маленьких значений V квадратным корнем смещающего тока I_0 .

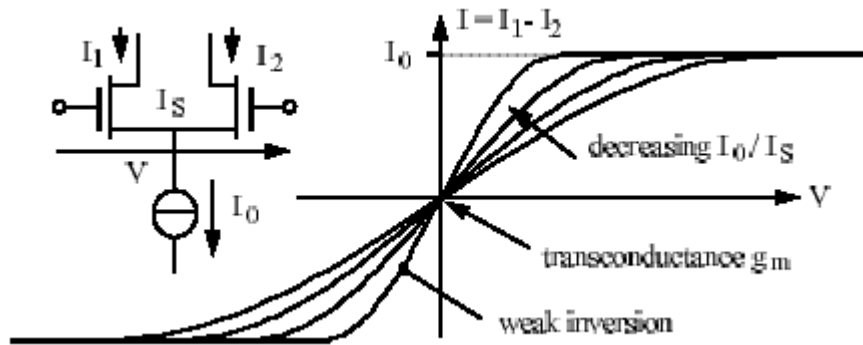


Рис.5. Дифференциальная пара и характеристики передачи.

Другая основная комбинация транзисторов – транслинейная петля, показанная на рис.6[3] для биполярных транзисторов.

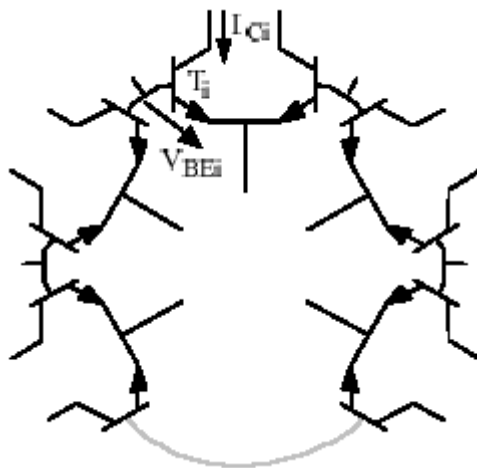


Рис. 6. Транслинейная петля.

Переходы база - эмитер четного числа транзисторов связаны последовательно, половина из них в каждом направлении (по часовой стрелке cw и против часовой стрелки ccw) так, чтобы

$$\sum_{cw} V_{BEi} = \sum_{ccw} V_{BEi}$$

Выражая V_{BEi} как функцию тока коллектора I_{Ci} получим:

$$\frac{\prod_{cw} I_{Ci}}{\prod_{ccw} I_{Ci}} = \frac{\prod_{cw} I_{Sbi}}{\prod_{ccw} I_{Sbi}} = \lambda$$

где фактор петли $\lambda = 1$ для идентичных транзисторов. Этот очень общий результат не зависит от температуры, ни от прироста токов транзисторов. Транзисторы могут быть в любой последовательности

внутри петли, и несколько петель могут соединять некоторые обычные транзисторы.

Обычно разделяют реализацию биологических и формальных нейронных систем.

Биологические нейронные сети

Для аналоговой реализации центральной нервной системы важен механизм генерации нервного импульса, т.е. функционирование клеточной мембраны, которая поддерживает постоянный состав цитоплазмы внутри клетки и обеспечивает проведение нервных импульсов[6]. Нервный импульс (спайк-spike) – процесс распространения возбуждения по аксону от тела клетки (аксонного холмика) до окончания аксона. Импульсы по волокну передаются в виде скачков потенциала внутриклеточной среды по отношению к внешней среде, окружающей клетку. При распространении форма спайка не меняется.

Мы будем рассматривать только те механизмы мембраны, что имеют отношение к передаче нервных сигналов. Суммарный перенос заряда равен нулю и электрический потенциал цитоплазмы не меняется.

Возбуждение импульсов происходит по принципу "все или ничего". Если потенциал цитоплазмы станет положительнее, чем -50 мВ, то произойдет генерация импульса. *Деполаризацией* мембраны называется изменение ее разности потенциалов от состояния равновесия в положительную сторону, например, от -70 до -50 мВ.

Если мембрана деполаризуется до уровня -50 мВ, то открываются натриевые каналы, и поток ионов Na^+ начинает поступать в клетку. Возникает ток I_{Na} , направленный внутрь клетки. Это приводит к дальнейшей деполаризации мембраны. Na -каналы управляются разностью потенциалов на мембране и дальнейшая деполаризация открывает новые Na -каналы, что приводит к росту I_{Na} .

Положительная обратная связь в данном процессе определяет резкий скачок потенциала в сторону деполаризации.

Натриевые каналы закрываются самопроизвольно, через некоторое время после открытия и переходят в состоянии рефрактерности порядка 1 мс и не могут быть открыты вновь, не смотря на деполаризованность мембраны. Ток I_{Na} падает до нуля, деполаризация прекращается и в этот момент потенциал достигает значения $+40$ мВ. Т.к. потенциал смещен в сторону деполаризации,

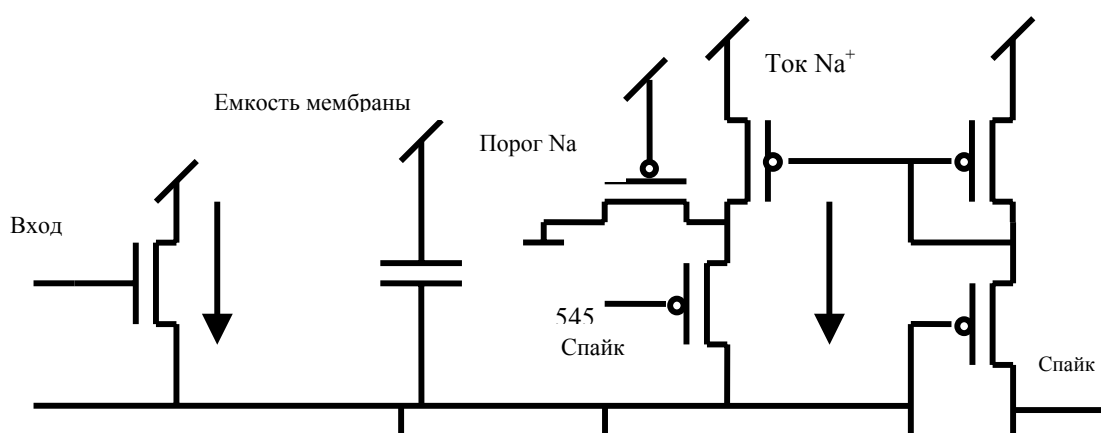


Рис.7. Реализация клеточной мембраны на МОП-структурах

открытие калиевых каналов приводит в диффузионному калиевому току, направленному из клетки. Ток I_K нарастает медленно и направлен противоположно I_{Na} . К моменту, когда I_K достигает максимума, ток I_{Na} уменьшается, и потенциал начинает меняться в противоположную сторону: мембрана *реполяризуется*.

За счет тока I_K мембрана реполяризуется до исходного потенциала - 70 мВ. За счет инерционности К-каналов мембрана *гиперполяризуется* до - 90 мВ и калиевый ток прекращается.

По окончании импульса натриевые каналы пребывают в состоянии рефрактерности около 1 мс, когда возникновение нового импульса невозможно. Происходит деполяризация до $-70..-80$ мВ —равновесного мембранного потенциала.

Под действием изменения потенциала открываются натриевые каналы на соседнем участке, и процесс возбуждения распространяется вдоль волокна.

Аналоговые реализации аксонов, синапсов, нейронов и мембраны (рис.7) рассматриваются в [7].

Аппаратная реализация адаптивных резонансных сетей Гроссберга

Сети Гроссберга АРТ отличаются от других, тем, что они решают дилемму стабильности-пластичности и позволяют быстро запоминать новые образы без утраты старых. К сожалению, они предъявляют высокие требования к ресурсам. Однако одна итерация для запоминания каждого входного вектора очень высокая экономичность для нейронных сетей. Так, например многослойный перцептрон для запоминания нового вектора требует полного переобучения.

Основные недостатки сети АРТ:

1. Чувствительность к порядку предъявления входных векторов.
2. Проблема классификации зашумленных векторов.

Аппаратная реализация на МОП-структурах поведения сетей АРТ позволяет в значительной степени снять эти недостатки.

Ограничимся представлением аппаратной схемы, которая реализует следующий алгоритм:

$$T_j = \sum_I p_I Z_{Ij};$$

и «победитель получает все», $\text{win} = \max(T_j); j=1..N$.

Структура блока $T_i = \sum_I p_I Z_{Ii}$; приведена на рис.8.

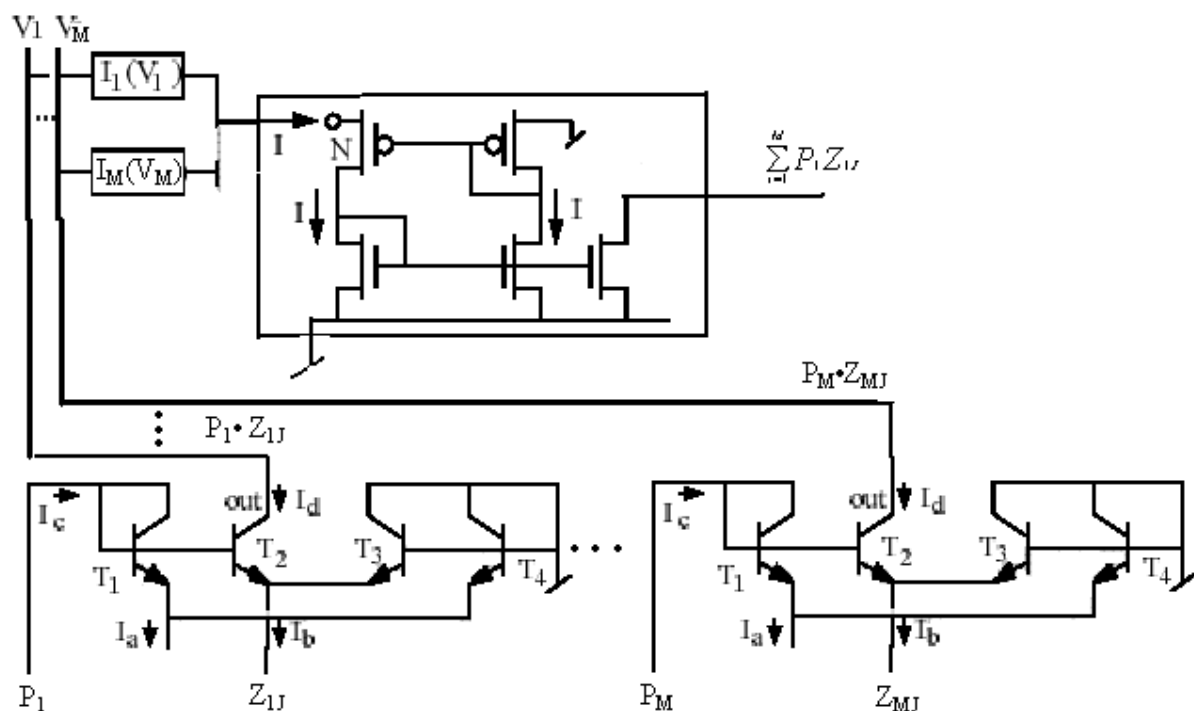


Рис.8. Аппаратная реализация выходов F2-слоя

Выходы рассмотренного блока поступают на вход следующего каскада, реализация которого приведена на рис 9.

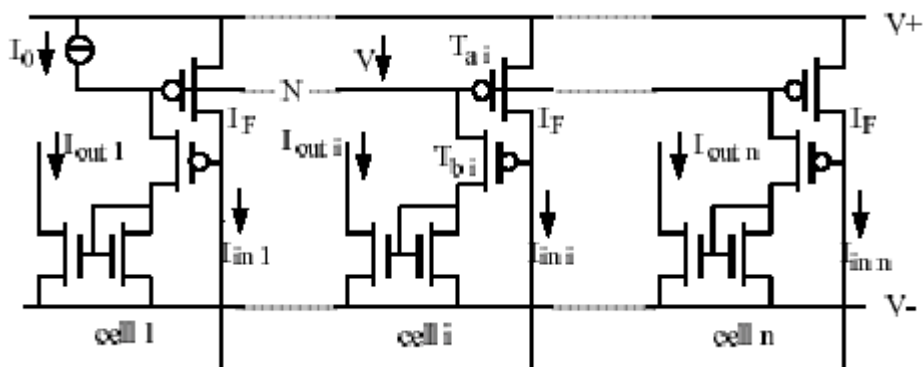


Рис.9. Аппаратная реализация победителя F2-слоя.

Влияние полевых образований на нейроподобные МОП-структуры

Достаточно медленные в сравнении с психическими явлениями физические характеристики процесса генерации нервного импульса при функционировании мембраны указывают на необходимость учета полевых образований, основой которых служит осцилляторная активность нейронных комплексов. Именно понимание и реализация этой активности приведет к значительному продвижению аппаратной реализации основных функций мозга [8,9].

Заключение

Приведенные выше аппаратные реализации основных блоков аналоговых сенсорных нейроподобных систем, реализованных на МОП-структурах, моделируются с требуемой точностью на основе переключательного подхода путем выбора подходящего алфавита моделирования. Диагностирование МОП-структур основанное на их моделировании на переключательном уровне, рассматривается в [10-12] и приведенной там же библиографии.

Литература

1. D.Goldhaber-Gordon, M.S.Montemerlo, J.Christopher Love, G.J.Opitck, J.J. Ellenbogen. Overview of Nanoelectronic Devices//Proceedings of the IEEE, vol.85, No. 4, April 1997, pp.521-540.
2. Chris Diorio, Sunit Mahajan, Paul Hasler, Bradley Minch, Carver Mead. A High-Resolution Nonvolatile Analog Memory Cell//Proceedings of the 1995 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol. 3, pp. 2233–2236, 1995.
3. Eric A.Vittoz. Analog VLSI Signal Processing: Why, Where and How? Journal of VLSI Signal Processing, vol.8, and Analog Integrated Circuits and Signal Processing, pp.27-44, July 1994.
4. C.Diorio, P. Hasler, B. A. Minch, C.Mead. A Complementary Pair of Four-Terminal Silicon Synapses//Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 13, 1997, pp. 153–166.
5. Воронов А.В. О материалах и технологиях элементной базы. Труды 8 Всероссийской конференции «Нейрокомпьютеры и их применение» НКП-2002, Москва, 21-22 марта 2002 г., с.795-805.
6. И.В.Заенцев. Нейронные сети: основные модели. Воронеж, ВГУ, 1999, с.76.
7. Handbook of Brain Theory and Neural Networks, M.Arbib Ed., Bradford Books, MIT Press, 1995.

8. Carpenter G.A. y Grossberg S. ART2: Self-organizing of stable category recognition codes for analog input patters. Applied Optics, Vol. 16, N 23, December, 1987.
8. Андрюхин А.И., Кузнецов А.В. Компьютерное исследование физических аспектов рефлексивности мышления человека // Научные труды Донецкого государственного технического университета. Серия: Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем. Выпуск 29. 2002 г., С.218-226.
9. Савельев А.В. К вопросу субстанции нейркоомпьютеров. Труды 8 Всероссийской конференции «Нейркоомпьютеры и их применение» НКП-2002, Москва, 21-22 марта 2002 г., с.1247-1249.
10. Андрюхин А.И. Алгоритмы параллельного логического моделирования и псевдослучайной генерации тестов для МОП-структур // Микроэлектроника. -1995, N 5. -с. 331-336.
11. Андрюхин А.И. Параллельное логическое моделирование МОП-структур на переключательном уровне. // Электронное моделирование. -1996, N 2, -с. 88-92.
12. Андрюхин А.И. Параллельное многозначное логическое моделирование исправных и неисправных псевдобулевых схем. // Электронное моделирование -1997, N 1. -с. 58-63.

Поступила в редакцию 12.01.04