

Соображения по проектированию тракта аналогового сигнала

Каннан Садасивам, Сахин Гупта (Индия)

В статье обсуждаются проблемы, возникающие при проектировании аналоговых трактов систем сбора данных с различными датчиками на входе.

Сигнальные тракты для измерения аналоговых величин обычно приводят в замешательство инженеров самыми сложными задачами проектирования. Даже простой сигнальный тракт с резистивным датчиком и аналого-цифровой системой сбора данных заключает в себе несколько проблем, с которыми придётся иметь дело до того, как может быть сделано достоверное измерение. С этими проблемами ещё сложнее справиться, когда система работает с разнородными датчиками. Предлагаемая статья на примерах резистивных датчиков разного типа обсуждает различные трудности, которыми придётся серьёзно заниматься разработчикам, чтобы произвести точное измерение.

В общем случае тракт аналогового сигнала во всех системах, использующих резистивные датчики, более или менее напоминает показанный на рисунке 1. Хотя все сигнальные тракты выглядят одинаковыми на уровне блоков, параметры для каждого блока будут отличаться из-за многих показателей. Наиболее важными из них являются: изменение сопротивления (и, следовательно, напряжения) датчика на единицу изменения физической величины, удаление датчика от системы измерения (т.е. погрешность измерения, обусловленная сопротивлением провода), требуемая точность системы, тип помехи и необходимая точность. Эти показатели определяют тип питания датчика, способ подключения датчика к схеме измерения, необхо-

димое усиление схемы предварительной обработки и аналого-цифрового преобразователя (АЦП), тип фильтра, его частоту среза, а также разрешающую способность и входной диапазон АЦП.

Рассмотрим различные датчики и основные ограничения, связанные с аналоговыми сигнальными трактами при их использовании, начиная с термистора. Зависимость температуры от измеренного сопротивления является сложной нелинейной функцией:

$$T = 1 / (A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3),$$

где T является температурой, а R – сопротивлением. A , B и C являются константами, характеризующими термистор. Из-за арифметической сложности выражения его нецелесообразно реализовывать в микроконтроллере. Следовательно, стандартным способом выполнения этого вычисления является использование просмотровой таблицы для сопротивлений и соответствующих значений температуры. Затем температура вычисляется при помощи кусочно-линейной интерполяции. Хотя возможны погрешности измерения, обусловленные изменениями усиления и напряжений смещения, эти погрешности являются слишком малыми на фоне требований к точности температурного датчика на основе термистора. Дрейф усиления и напряжений смещения будет обсуждаться ниже в разделе резистивных термодатчиков (RTD).

Что касается измерения сопротивления, существуют несколько способов прямого измерения, показанных на рисунке 2. Схема, приведённая на рис. 2а, использует цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) для питания резистивного делителя. Одним из резисторов в схеме является сам датчик, а другим – резистор с известным, эталонным сопротивлением. Эта схема

будет работать; однако, однофазное измерение имеет ряд недостатков. Одним из них является сдвиг потенциала земли между напряжением V_{SS} вблизи датчика и реальным внутренним напряжением V_{SS} , приложенным к АЦП, который приведёт к напряжению смещения.

С другой стороны, как показано на рис. 2б, когда инверсный вход $-v_e$ АЦП подключен вблизи сопротивления, обе земли становятся одной. Поскольку дифференциальные линии могут быть проложены близко одна к другой вплоть до датчика, любая наводка на одну линию будет скопирована на другую. Этот сигнал при измерении дифференциальной схемой будет подавлен как синфазный. Другой особенностью этой схемы является то, что при измерении напряжения на сопротивлении датчика R_{sensor} входное напряжение $+v_e$ приложено вблизи самого датчика. Это гарантирует отсутствие погрешности измерения, обусловленной сопротивлением провода.

Рисунок 2в показывает схему, которая использует ЦАП с токовым выходом для питания датчика. Напряжение, измеренное на датчике, обеспечит точное измерение его сопротивления. Токковое питание является наилучшей схемой в смысле числа необходимых внешних компонентов. Оно не требует эталонного сопротивления. Однако, для калибровки системы на погрешности усиления необходим внешний резистор. Отметим, что для таких приложений, где не требуется очень высокая точность, нет необходимости в компенсации погрешности усиления и, следовательно, не требуется внешний эталонный резистор.

РЕЗИСТИВНЫЕ ТЕРМОДАТЧИКИ

Резистивные термодатчики (Resistance Temperature Detectors, RTD) имеют сопротивление при 0°C порядка 100 Ом, с изменением, близким к 0,385 Ом на каждый градус изменения температуры. Поскольку термодатчики имеют низкое сопротивление, сопротивление провода играет главную роль в точности системы. Термодатчи-

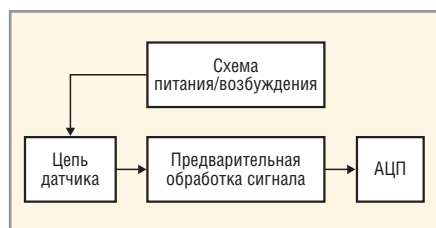


Рис. 1. Стандартный тракт аналогового сигнала

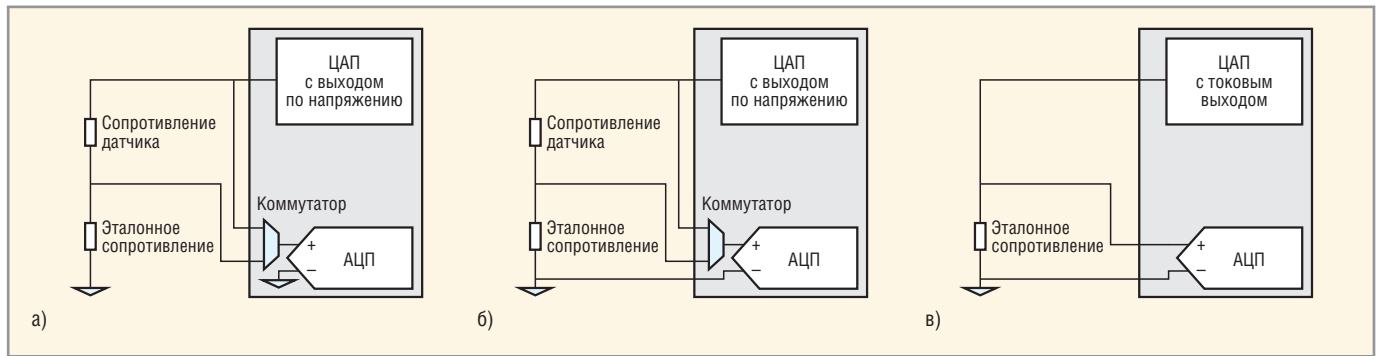


Рис. 2. Схемы измерения сопротивления

ки питаются от источника постоянно-го тока. Напряжение на термодатчике может быть измерено при помощи трёх- или четырёхпроводного метода, по числу проводов, идущих параллельно от системы измерения к термодатчику. Поскольку термодатчики устанавливаются далеко от системы измерения, трёхпроводной метод обычно предпочитают из-за стоимости провода. На рисунке 3 приведена схема подключения термодатчика для трёхпроводного измерения.

Когда напряжение измеряют на первом канале (см. рис. 3), оно является суммой напряжений на термодатчике и сопротивлении провода между токовым ЦАП и термодатчиком. Возникающая из-за сопротивления провода погрешность может быть обработана несколькими способами. Одним из них является измерение сопротивления провода вручную с последующим сохранением в качестве константы. Это сопротивление может быть учтено при каждом измерении. Другим способом является измерение падения напряжения между положительным выводом термодатчика и выводом выхода ЦАП. Если все провода имеют одинаковые параметры, они будут иметь одинаковое со-

противление, и напряжение, измеренное на предыдущем этапе, может быть вычтено из напряжения, измеренного на датчике. Однако всё ещё может оставаться некоторая погрешность, если провода не являются симметричными. Кроме того, этот метод задействует дополнительный вывод для подключения выходного контакта ЦАП к входу АЦП.

Для точных измерений четырёхпроводная схема, приведённая на рисунке 4, является предпочтительной. И отрицательный, и положительный входы расположены близко к термометру сопротивления, тем самым устраняется погрешность, обусловленная сопротивлением провода. При разработке сигнального тракта для термометра сопротивления входной импеданс тракта необходимо сделать очень высоким, чтобы сохранить входной ток пренебрежимо малым. Если АЦП имеет низкий входной импеданс, сигнал должен быть подан на буфер перед подключением к АЦП.

Как упоминалось выше, в системе существует напряжение смещения, которое будет изменяться с температурой. Смещение, его дрейф с температурой и низкочастотный шум могут быть уда-

лены при помощи коррелированной двойной выборки (Correlated Double Sampling, CDS). С её помощью сначала измеряется эталонное смещение нуля (для этого оба входа закорачивают), и затем измеряется напряжение на датчике. На рисунках 3 и 4 АЦП подключают к каналу 1, чтобы измерить сигнал эталонного нуля. Измеренное напряжение включает реальное напряжение термопары, напряжение смещения и шум (1). На рисунках 3 и 4 это является напряжением, измеренным на канале 0:

$$V_{R_Signal} = V_{RTD} + V_N + V_{offset} \quad (1)$$

Выборка эталонного нуля представлена выражением:

$$V_{Zero_Ref} = V_N + V_{offset} \quad (2)$$

Предыдущая эталонная выборка нуля по отношению к измерению эталонного тока нуля представлена выражением:

$$V_{Zero_ref_Prev} = (V_N + V_{offset})Z^{-1} \quad (3)$$

Тогда разность между измерением напряжения на датчике от прохождения тока и предыдущим сигналом эталонного нуля можно представить выражениями:

$$V_{signal} = (V_{RTD} + V_N + V_{offset}) - (V_N + V_{offset})Z^{-1} \quad (4)$$

$$V_{signal} = V_{RTD} - (V_N + V_{offset}) \times (1 - 1/Z) \quad (5)$$

Поскольку напряжение смещения достаточно постоянно для последовательных выборок, выражение (5) сведётся к выражению:

$$V_{signal} = V_{RTD} - V_N(1 - 1/Z) \quad (6)$$

Используя билинейное преобразование, $Z = (1 + sT/2)(1 - sT)$, где $T =$

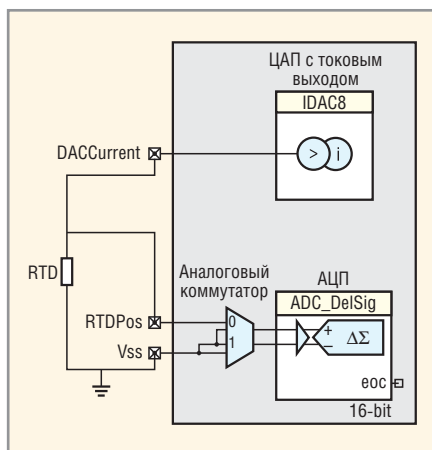


Рис. 3. Трёхпроводное измерение термометра сопротивления

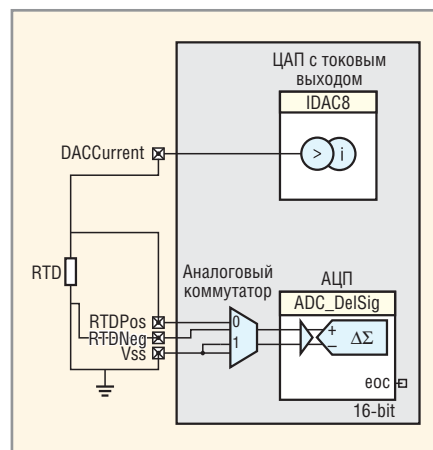


Рис. 4. Четырёхпроводное измерение термометра сопротивления

$= 1/f_{\text{sample}}$ является периодом следования выборок, выражение (6) можно записать в виде:

$$V_{\text{signal}} = V_{\text{RTD}} - V_N(2s/(s + 2f_{\text{sample}})). \quad (7)$$

Если мы проанализируем выражение (7), то видно, что оно описывает фильтр высоких частот. С другой стороны, аналого-цифровые преобразователи являются фильтрами низких частот, что способствует снижению общего шума системы. Кроме того, при взгляде на схему, показанную на рисунке 4, становится очевидным, что точность системы целиком зависит от точности токового ЦАП. Если погрешность токового ЦАП 5%, то и ошибка измерения 5%. Это является составляющей погрешности усиления в измерении и неприемлемо для большинства систем. Существуют и другие составляющие погрешности усиления, первопричиной которых является АЦП и точность его опорного напряжения. Если АЦП имел опорное напряжение с точностью всего 1%, все измерения, сделанные при по-

мощи этого АЦП, пострадают от этой погрешности усиления в 1%. Поскольку мы здесь измеряем температуру, проблема дрейфа может даже усугубиться.

Наилучшим способом избежать влияния различных погрешностей усиления является калибровка всех измерений по более точной постоянной величине. С этой целью может быть использован резистор с точностью 0,1%. На рисунке 5 приведена схема, в которой подсоединён калибровочный резистор.

Сначала производится измерение на образцовом резисторе. Это измерение подвержено погрешностям усиления, которые обсуждались выше. Однако на следующем этапе тот же самый ток проходит через термодатчик, и напряжение на нём измеряется при тех же условиях. Два измерения АЦП устраняют любую погрешность усиления, поскольку измерение сопротивления термодатчика выполнено относительно калибровочного резистора. Теперь точность системы основана на точности и допуске использованного эталонного резистора.

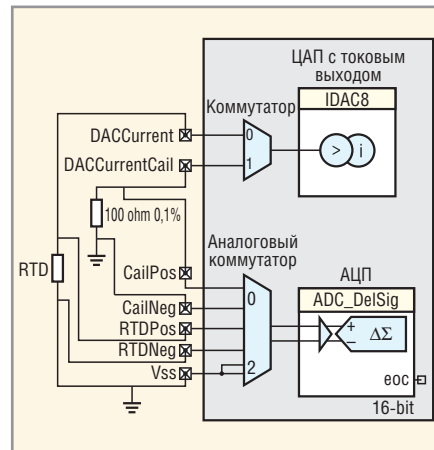


Рис. 5. Четырёхпроводное измерение сопротивления термодатчика с коррекцией погрешности усиления

СООБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В МИЛЛИВОЛЬТАХ

До этого момента мы обсуждали проблемы, возникающие при выполнении прецизионных аналоговых измерений в стандартных высокоточных системах, где диапазон измерения обычно выражается в вольтах. Существуют системы, которые имеют диапазон измерения в милливольтках, что создаёт для разработчиков новые

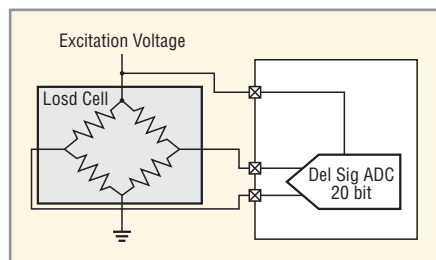


Рис. 6. Схема сопряжения тензодатчика

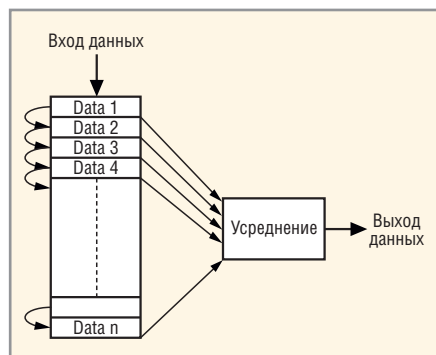


Рис. 7. Скользящий усредняющий фильтр

сложные проблемы. Хорошим примером такой системы является тензодатчик.

Тензодатчики преобразуют приложенную к ним силу в электрическую величину. Они обычно используются в цифровых весах для измерения веса. Типичный тензодатчик образуют четыре резистора, соединённые в мостовую схему. Датчик питается через два вывода возбуждения и, исходя из приложенной к нему силы, создаёт на измерительных выводах небольшое напряжение (см. рис. 6). Чувствительность тензодатчика обычно указывают в мВ/В, она представляет собой выходной сигнал для напряжения возбуждения 1 В.

Возьмём для примера тензодатчик с чувствительностью 2 мВ/В, измеряющий максимальный вес 10 кг. Если напряжение возбуждения 5 В, то полезный диапазон выходного напряжения составляет всего лишь 10 мВ. Это означает, что даже когда тензодатчик измеряет силу 10 кг, выход будет всего лишь 10 мВ. Чтобы реализовать близкую к 16 разрядам точность в этом 10-мВ диапазоне, нам потребуется соответственно усилить сигнал. Например, чтобы получить диапазон измерения 10 мВ, как обсуждалось выше, используя АЦП, который обычно имеет диапазон от -1 до +1 В, можно использовать усилитель напряжения с коэффициентом усиления 100.

Когда АЦП измеряет динамический диапазон 1 В, наименьшим разрешае-

мым напряжением 20-разрядного АЦП является 1 мкВ. Когда усилительный каскад используется для расширения диапазона, он также усиливает шум и делает его вклад достаточным для воздействия на измерение АЦП. Этот шум влияет на несколько полезных младших разрядов, которые АЦП может обеспечить при этой настройке усиления. Следовательно, придётся выбрать АЦП, который даёт оптимальное разрешение при требуемых настройках усиления.

Аналого-цифровыми преобразователями, которые обычно используются для измерения выхода тензодатчиков, являются дельта-сигма (DelSig) АЦП и низкочастотные фильтры с избыточностью. Некоторые дельта-сигма-АЦП, подобные приборам PSoC3 и PSoC5 фирмы Cypress, могут добавлять усиление в самом дельта-сигма-модуляторе. Эффект двукратного усиления на АЦП в таком случае мог бы привести к изменению входного диапазона от $\pm 1,024$ до $\pm 0,512$ В. Следовательно, мы можем достичь более высоких усилений в самом модуляторе АЦП, что повышает помехоустойчивость. Поскольку мы повышаем усиление в модуляторе АЦП, полоса АЦП начинается уменьшаться. Это не повлияет на измерение сигнала датчика, поскольку частота выборки сигнала датчика гораздо меньше. Однако уменьшение полосы пропускания может быть преимуществом, т.к. оно действует как низкочастотный фильтр и не позволяет шуму проникнуть в систему.

Другой серьёзной проблемой в сопряжении тензодатчика является его склонность к росту погрешности из-за того, что диапазон выходного сигнала зависит от напряжения возбуждения. Небольшое отклонение напряжения питания может привести к эквивалентному проценту погрешности усиления во всех измерениях. Мы можем избежать этого, если измерения сигнала выполнены по отношению к напряжению возбуждения. Это можно реализовать двумя способами:

- отдельно измерить сигнал и напряжение возбуждения и затем вычислить отношение, устраняя тем самым погрешность усиления. Однако этот метод требует коммутации АЦП между двумя сигналами. Другой проблемой является то, что сигнал, который мы измеряем, находится в 10-мВ диапазоне, а напряжение воз-

буждения – в вольтовом диапазоне. Это могло бы означать динамическое изменение настроек усиления и параметров диапазона АЦП, которое нецелесообразно в большинстве аналоговых систем;

- использовать эталон для самого АЦП. Обычно АЦП имеют вывод опорного напряжения для подключения внешнего эталонного источника. Каждое выполненное АЦП измерение сделано по отношению к эталону. Следовательно, если нам удалось предоставить напряжение возбуждения или часть его в качестве опорного напряжения АЦП, мы можем достичь пропорционального измерения для сигнала.

ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТР

Мы обсудили несколько способов предотвращения шума и других погрешностей в аналоговых сигнальных трактах. Одним из конечных этапов получения свободного от помех выхода может быть применение математического фильтра на основе встроенной программы для усреднения шума. Простым в реализации фильтром является скользящий усредняющий фильтр, который использует матрицу, где входные значения постоянно подаются с одной стороны, а самые старые значения вытесняются из матрицы с другой стороны (см. рис. 7). В любой заданный момент времени выход фильтра является средним значением всех элементов матрицы.

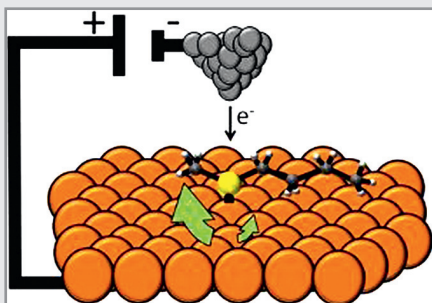
Скользящий усредняющий фильтр является одним из самых простых, но, в то же время, наиболее эффективных фильтров для увеличения числа незашумленных разрядов в измерительной системе. Недостаток состоит в том, что существует постоянная задержка, которая пропорциональна глубине используемой матрицы. Это означает, что изменение в n -элементном скользящем усредняющем фильтре занимает n тактов до его отражения на выходе. Это может вводить в заблуждение, если существуют большие изменения, а выход медленно их навёрстывает. Этого можно избежать, установив пороговую проверку скорости изменения входной величины. Если за определённое время изменение входной величины превосходит порог, весь фильтр обнуляется и новые данные копируются в фильтр и на выход, снижая тем самым задержку.



Новости мира News of the World Новости мира

Учёные создали электродвигатель из одной молекулы

Химики из университета Тафтса (Tufts University) разработали первый в мире электродвигатель из одной молекулы. Размеры «моторчика» всего 1 нм в поперечнике. Предыдущий рекорд миниатюризации составлял 200 нм, а толщина человеческого волоса, для сравнения, – 60 000 нм. Создатели двигателя под руководством Чарльза Сайкса (Charles Sykes) планируют подать заявку в книгу рекордов Гиннеса. Молекулярный двигатель получает питание через сканирующий туннельный микроскоп. Сайкс с коллегами подают напряжение на молекулу сульфида бутилметила, расположенную на медной подложке.



Структура молекулы такова, что атом серы и углеродные цепочки, связанные с ним, образуют якорь электрического двигателя, который может вращаться. Появление свободных электронов заставляет вибрировать углеродные цепочки. Исследователи обнаружили, что при температуре около 5°K, они могут достаточно точно управлять скоростью и направлением вращения цепочек.

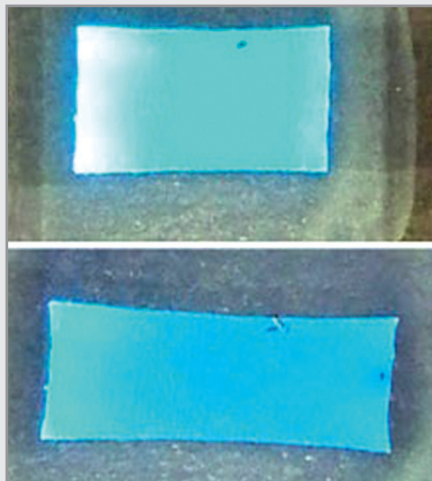
Двигатели из одной молекулы создавались и ранее, но действующие образцы использовали энергию химических связей или солнечный свет. Сайкс говорит, что до практического использования такого электродвигателя пока очень далеко, но его перспективы несомненны.

<http://www.tufts.edu/>

Растяжимая OLED-панель

Представьте себе будущее, в котором мобильные устройства станут настолько компактными, что их невозможно будет использовать «в натуральном виде». А когда они понадобятся, маленький дисплей можно будет растянуть до 4-дюймового. Звучит не очень-то реалистично, однако учёные из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе уверены, что это вполне выполнимая задача.

Они разработали первую растяжимую панель на органических светодиодах. Эта



гибкая панель остаётся полностью функциональной при увеличении линейных размеров вплоть до 45%. Главной проблемой подобных разработок всегда являлась невозможность сохранить проводящие свойства электродов при их растяжении, поэтому учёные обратились к углеродным нанотрубкам, которые полностью отвечают всем необходимым требованиям.

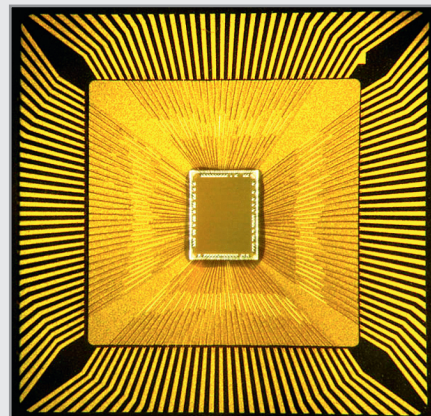
Для изготовления растяжимого электрода они нанесли на стеклянную основу два слоя углеродных нанотрубок, между которым расположился слой жидкого полимера, способного деформироваться под ультрафиолетовым светом. После испарения жидкой субстанции и отделения получившегося материала от стеклянной подложки, остался гибкий пластик, окружённый нанотрубками с обеих сторон. Последней стадией приготовления стало нанесение этого электрода на пластик, испускающий свет под воздействием электрического тока. Эта стадия была выполнена при помощи обычного офисного ламинатора. Разумеется, до полноценного растяжимого дисплея ещё очень далеко, однако начало положено.

<http://www.ubergizmo.com/>

IBM продемонстрировала первые чипы для компьютера, работающего подобно человеческому мозгу

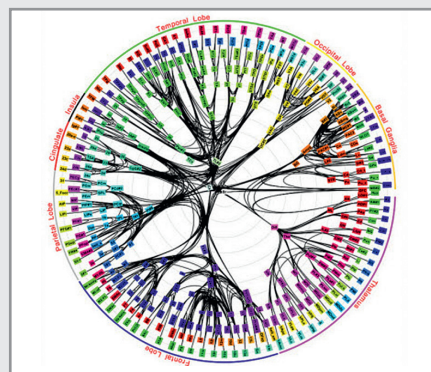
Нередко компьютер называют электронным мозгом, хотя принципы функционирования электронного устройства и человеческого мозга кардинально различаются.

Почти три года прошло с того момента, как Управление перспективных исследовательских программ США (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) выделило грант компании IBM на создание компьютера, работа которого имитирует функционирование человеческого мозга. На этой



неделе IBM сообщила о значительном прорыве в реализации данного проекта.

Специалисты «Голубого гиганта» продемонстрировали два экспериментальных чипа, по структуре близкие к мозгу человека. Их можно объединять в блоки, которые впоследствии станут основой для устройства, выполняющего так называемые когнитивные вычисления. Конечной целью этого проекта, в котором, помимо IBM, принимает участие целый ряд университетов, является создание устройства, подражающего тому, как человек учится и принимает решения, и вместе с тем, потребляющего гораздо меньше энергии и занимающего гораздо меньшее пространство, чем существующие высокопроизводительные компьютеры.



Как сообщила IBM, оба экспериментальных чипа имеют по 256 нейронов. У одного из них присутствует 262 144 так называемых программируемых синапса. У второго чипа – 65 536 синапсов изучения. Цель IBM заключается в построении системы из 10 млрд. нейронов и 100 трлн. синапсов, потребление энергии которой исчисляется киловаттами, а ёмкость не превышает пару литров.

Нельзя не отметить пристальный интерес американского правительства к данному проекту. В ходе анонса экспериментальных чипов IBM объявила о выделении Управлением перспективных исследовательских программ США \$21 млн. для освоения второго этапа данного проекта.

<http://online.wsj.com/>