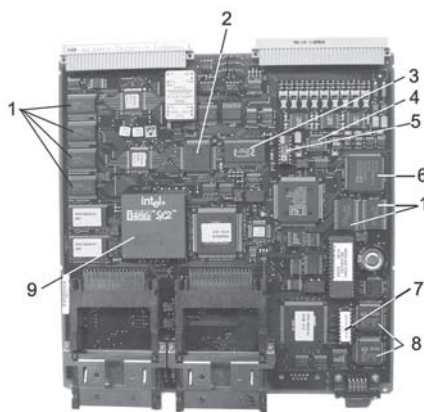


# Микропроцессорные реле защиты. Как они устроены? Часть III

Часть II опубликована в предыдущем номере (№5 (29) сентябрь-октябрь 2009) и на сайте журнала <http://www.market.elec.ru/>.

В части III статьи рассматриваются конструкции модуля центрального процессора, аналого-цифрового преобразователя, мультиплексора, входных фильтров и различных видов памяти.



**Рис. 27.** Главный модуль МУРЗ типа REL316, производства 90-х годов прошлого века.

- 1 – оперативная память (SRAM) типа TC551001BFL-70L (Toshiba);
- 2 – периферийный микропроцессор типа NG8237016 (Intel);
- 3 – флэш-память (Intel);
- 4 – 16-канальный мультиплексор типа ADG506AKP (Analog Devices);
- 5 – аналого-цифровой преобразователь AD677 (Analog Devices);
- 6 – периферийный микропроцессор типа ADSP-2105 (Analog Devices);
- 7 – постоянное запоминающее устройство с алгоритмом работы защиты («software key»);
- 8 – коммуникационные контроллеры типа Z85C3016VSC (Zilog);
- 9 – главный процессор 486 серии (Intel)



**Рис. 28.** Главный модуль МУРЗ типа SEL-787, производства 2009 года

Предлагаемый цикл статей автора призван помочь релейщикам, не являющимися специалистами в области электроники и микропроцессорной техники, восполнить существующий пробел и помочь правильно сориентироваться на обширном рынке устройств релейной защиты нового поколения.

## Модуль центрального процессора

Главным модулем МУРЗ, часто называемым CPU Module, является наиболее сложная, наиболее дорогая и наиболее насыщенная элементами печатная плата, рис. 27, выполненная по технологии поверхностного монтажа (SMD technology), на которой расположены: микропроцессор, элементы памяти, АЦП, мультиплексор, вспомогательные (периферийные) микропроцессоры, коммуникационный контроллер, коммуникационный порт, и т.д.

За полтора десятка лет, прошедших с выпуска реле 316 серии, конструкция главного модуля с центральным процессором не претерпела принципиальных изменений, рис. 28. Заметны на глаз лишь меньшие размеры главного микропроцессора и сопутствующих функциональных элементов, меньшее их количество. Это обусловлено прогрессом последних лет в области нанотехнологий, который привел к существенному снижению размеров полупроводниковых элементов (речь идет о единицах и даже долях микрона), уменьшению толщины слоев полупроводниковых и изоляционных материалов, уменьшению рабочих напряжений, увеличению рабочей скорости, увеличению плотности размещения элементарных логических ячеек в одном устройстве.

Все это вместе взятое привело к резкому повышению чувствительности полупроводниковых элементов, особенно ячеек памяти, к ионизирующим излучениям. Эта чувствительность стала настолько высокой, что обычный (то есть совершенно нормальный) радиационный фон на уровне моря стал опасным для ячеек памяти.

Особенно опасными являются потоки высокоэнергетических элементарных частиц, приходящих из космоса. Даже одна такая частица при попадании в ячейку памяти рождает вторичные потоки электронов и ионов, вызывающие самопроизвольное переключение элементарного транзистора или разряд емкости в элементах с зарядовой памятью. Проблема усугубляется тем, что в современных микропроцессорных структурах наблюдается устойчивая тенденция расширения использования элементов памяти.

Многие современные интегральные микросхемы высокого уровня интеграции, входящие в состав микропроцессорного устройства, содержат встроенные элементы памяти достаточно большого объема, исправность которых вообще никак не контролируется. В последние годы проблема резкого увеличения чувствительности к ионизирующим излучениям стала актуальной не только для элементов памяти, но также и для высокоскоростных логических элементов, компараторов и т.д., то есть, практически, для всей современной микроэлектроники.

Кроме ионизирующих излучений, все более опасными для всей современной микроэлектроники становятся преднамеренные высокочастотные электромагнитные излучения, используемые во многих видах современного электромагнитного оружия.

## Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

Процесс аналого-цифрового преобразования (то есть преобразования входного аналогового сигнала в цифровой код) предполагает две операции: квантование по времени и по уровню.

То есть, по существу, аналого-цифровое преобразование — это измерение мгновенных значений аналогового входного сигнала через заданные интервалы времени (sampling) и кодирование измеренных значений. Для кодирования весь диапазон возможных изменений непрерывного (аналогового) сигнала ( $U$ ), равномерно разбивается на конечное число дискретных уровней  $\Delta U$ , называемых уровнями квантования. Каждому значению (в нашем примере от 1 до 9) уровня сигнала может быть присвоен код (двоичное число). В нашем случае это числа от 0001 до 10001. После такого кодирования операции над аналоговым сигналом можно заменить соответствующими операциями с двоичными числами, для которых, собственно и предназначен микропроцессор. Записанные двоичные числа передаются в микропроцессор через определенные промежутки времени  $t$ .

При квантовании по уровню не всегда измеренный сигнал совпадает с уровнем квантования  $\Delta U$ , рис. 29. В таком случае он округляется до ближайшего значения, определяемого целым числом квантов. Естественно, что при этом возникает погрешность, обуславливаемая этим округлением.

Важной характеристикой АЦП является разрядность формируемого им на выходах двоичного числа. Разрядность АЦП — это объем дискретных степеней сигнала, определяемых и кодируемых АЦП. Например, разрядность 8 бит означает способность АЦП производить квантование и кодировать сигналы в виде 256 дискретных значений ( $2^8 = 256$ ). Для преобразования аналоговых величин на входах МУРЗ (например, напряжения изменяющегося на токовом входе МУРЗ в пределах от 0 до 10 В) с погрешностью не более 2–5% используются 12 разрядные АЦП, позволяющие получить  $2^{12} = 4096$  уровней квантования.

Для приведенного выше примера входного аналогового сигнала МУРЗ, разрешающая способность

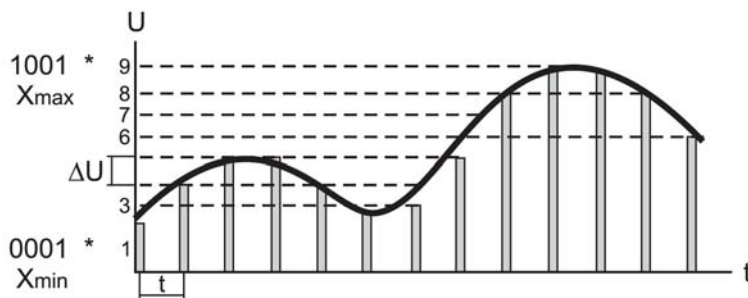


Рис. 29.

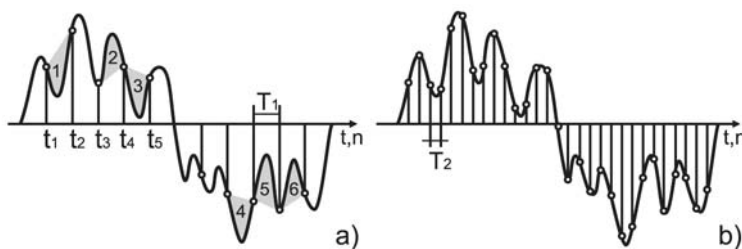


Рис. 30.

АЦП составит:  $10/4096 = 2,44$  мВ. На практике далеко не всегда удастся реализовать такую высокую разрядность АЦП из-за наличия помех на его входе (в рассмотренном примере речь идет о единицах милливольт). При этом АЦП просто не в состоянии различать соседние уровни входного сигнала, поэтому младшие биты выходного сигнала практически бесполезны. Реально достижимая разрядность (эффективная разрядность или effective number of bits — ENOB) всегда меньше номинальной.

Очевидно, что и квантование по времени связано с погрешностью, а фактически с потерей части информации. В самом деле, дискретный сигнал не показывает, как ведет себя исходный непрерывный сигнал в моменты времени, например, между  $t_1$  и  $t_2$ ,  $t_3$  и  $t_4$ , и т.д. рис. 30. Иначе говоря, этот процесс связан с некоторой погрешностью которая зависит от шага дискретизации  $T$ : при малых значениях шага дискретизации (то есть высокой частоте дискретизации — sampling frequency) число точек замера высоко, и теряется мало информации; очевидно, картина обратная при больших шагах дискретизации. Обычно, в МУРЗ применяется равномерное квантование (sampling) с интервалом в  $1/12$ ,  $1/20$  или  $1/24$  периода основной рабочей частоты, то есть sampling с частотой 600, 1000 или 1200 Гц для рабочей частоты 50 Гц, или, соответственно: 720, 1200 и 1440 Гц для базовой частоты 60 Гц. Более высокая частота используется в микропроцессорных регистраторах аварийных режимов. Для осциллографирования аварийного режима в сети с полосой пропуска-

ния от 0 до 1000 Гц, частота sampling должна быть не менее 2000 Гц.

Поскольку АЦП работают путем выборки входных значений через фиксированные промежутки времени, то совершенно очевидно, что при этом нет никакой возможности определить величину входного сигнала в интервалах между этими выборками (участки 1–6 на рис. 30). Если при этом еще и входной сигнал изменяется быстрее (имеет более высокую частоту), чем производятся его измерения (то есть, чем частота sampling), то точное восстановление сигнала с помощью цифро-аналогового преобразователя становится невозможным и на его выходе появятся ложные низкочастотные сигналы, определяемые разностью упомянутых частот, называемые алиасинг (aliasing). Например, синусоидальный сигнал с частотой 3000 Гц измеренный с частотой sampling 2000 Гц был бы воспроизведен как синусоида с частотой 1000 Гц. Оптимальное соотношение между частотой сигнала и частотой дискретизации описывается теоремой Найквиста-Шеннона (Nyquist-Shannon) или теоремой Котельникова-Шеннона, в русской технической литературе. Обычно, для более точного преобразования, частота дискретизации (сэмплирования) выбирается как минимум вдвое выше самой высокочастотной составляющей сигнала, а все сигналы с частотой более высокой, чем частота квантования должны быть исключены (отфильтрованы) из входного сигнала. Фильтр, осуществляющий такую фильтрацию, называется антиалиасинговым (anti-aliasing filter).

Дополнительную ошибку вносит так называемая апертурная погрешность, обусловленная флуктуациями синхросигнала (clock jitter), определяющего момент времени измерения входного сигнала.

Поскольку реальные АЦП, рис. 31, не в состоянии произвести необходимые преобразования мгновенно, входное аналоговое значение сигнала должно удерживаться постоянным в течение времени преобразования. Для этого на входе АЦП включается специальный узел: цепь выборки и запоминания (sample-and-hold circuit, или S/H) на основе конденсатора, периодически переключаемого с требуемой частотой полупроводниковым ключом S<sub>1</sub> между источником аналогового сигнала и входом АЦП.

Идеальная цепь выборки и запоминания в упрощенном виде содержит четыре основных компонента, как показано в рис. 32, хотя в реальной конструкции они конечно не могут быть внутренне связаны точно так как это показано на рисунке. Усилитель A<sub>1</sub> (буфер входа) обладает высоким входным импедансом и, одновременно, обеспечивает достаточный зарядный ток запоминающему конденсатору C<sub>H</sub>. Выключатель S<sub>1</sub> периодически подключает и отклю-

чает под действием схемы управления выход буферного усилителя к удерживающему элементу (конденсатору) так, чтобы последний поступивший сигнал был сохранен в виде заряда конденсатора. Усилитель A<sub>2</sub> служит для того, чтобы преобразовать запоминающий конденсатор с высоким импедансом в источник напряжения с низким внутренним импедансом, необходимым для внешней нагрузки.

При замкнутом ключе S<sub>1</sub> выходной сигнал повторяет входной, подверженный помехам и ошибкам, обусловленным широкой полосой пропускания усилителя. Когда S<sub>1</sub> открыт, чистое напряжение, сохраненное конденсатором (в идеале оно сохраняется неизменным) поступает на выход устройства до тех пор, пока ключ S<sub>1</sub> опять не замкнется под действием управляющей команды.

Из реальных осциллограмм, рис. 33, можно видеть, что устройство выборки и удержания является, по сути, дополнительным фильтром, очищающим сигнал, подаваемый на вход АЦП, от выбросов, переходных процессов и высокочастотных помех и включается на входе АЦП последовательно с антиалиазинговым фильтром, рис. 34.

Устройства АЦП имеют довольно сложную внутреннюю структуру, включающую различные дополнительные сервисные узлы, улучшающие качество преобразования и выпускаются в виде одиночных многовыводных микрочипов, рис. 31.

Обычно, тракт аналого-цифрового преобразования включает еще и мультиплексор.

Мультиплексор — это электронный коммутатор, поочередно подключающий сигналы с многочисленных входов МУРЗ к АЦП, рис. 35. Применение мультиплексора позволяет использовать один достаточно сложный и дорогой АЦП для работы одновременно с несколькими сигналами (входами).

### Память

Информация в микропроцессорных системах хранится в специальных устройствах, называемых памятью. Существует два основных вида устройств памяти: постоянное запоминающее устройство в котором постоянно хранится рабочая программа, управляющая работой микропроцессора, и оперативное запоминающее устройство, предназначенное для временного хранения результатов промежуточных вычислений.

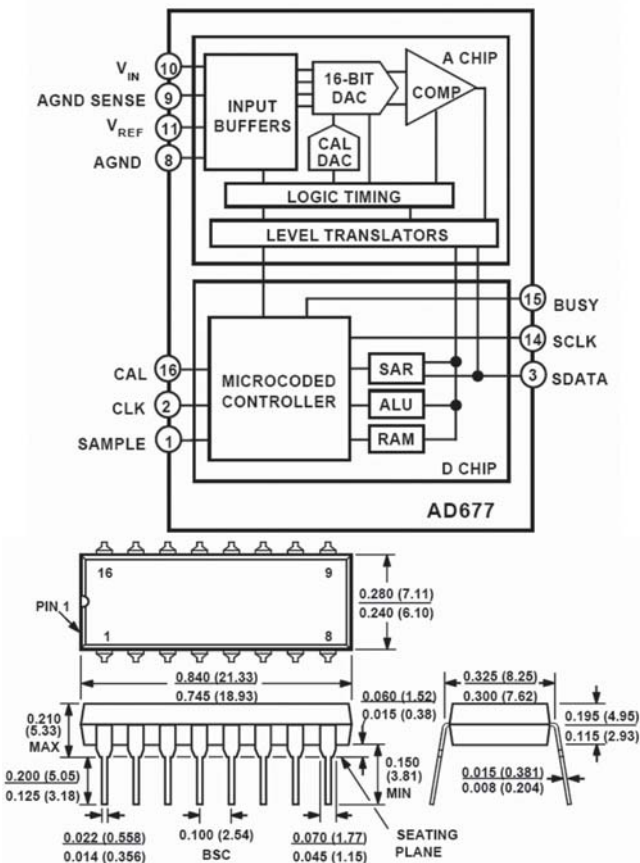


Рис. 31. 16-битный АЦП типа AD677 (Analog Devices, Inc.)

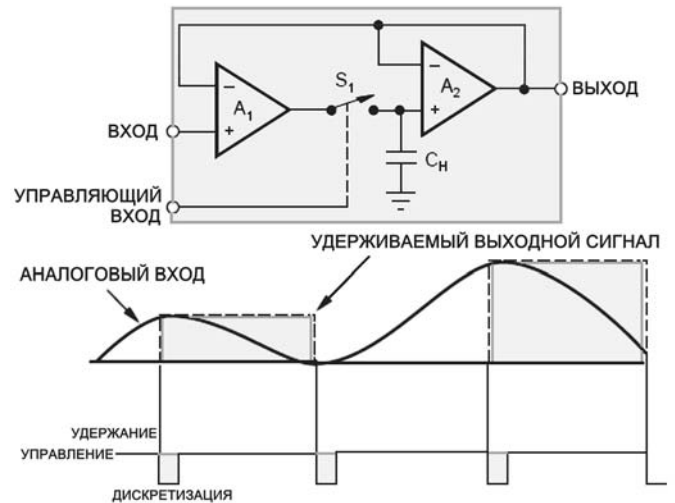


Рис. 32. Устройство цепи выборки и запоминания

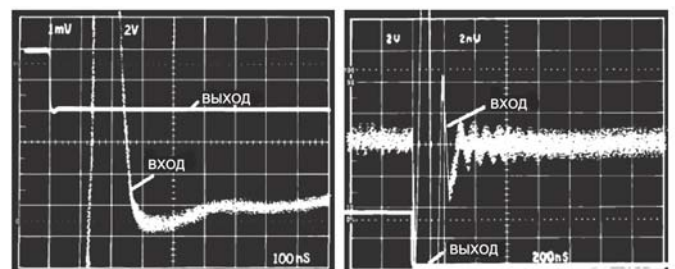


Рис. 33. Реальные осциллограммы сигналов на входе и на выходе схемы выборки и удержания



Поскольку постоянное запоминающее устройство предназначено только для считывания заранее записанной в нем программы, то оно и называется Read Only Memory (или, сокращенно ROM). В отличие от него, оперативное запоминающее устройство служит для постоянного обмена информацией с внешними устройствами, то есть и для считывания и для записи новой информации в любой произвольный момент времени с большой скоростью при обращении к ней внешних устройств. Поэтому такой вид памяти называется Random Access Memory (или, сокращенно RAM).

Оба эти основных вида памяти имеют множество подвидов. Например, некоторые виды ROM позволяют перепрограммировать их по мере надобности в процессе эксплуатации, например, стереть старые уставки релейной защиты и ввести новые. Такие виды ROM называются Erasable Programmable Read Only Memory (EPROM). Стереть содержимое такой памяти раньше можно было только подвергая ее воздействию ультрафиолетового излучения через специальное окно в корпусе чипа в течение 10–15 минут. Для этого существовали специальные устрой-

ства. В дальнейшем появилась Electrical Erasable Programmable Read Only Memory (EEPROM или E2PROM), стирание и перезапись содержимого которого производилось электрическими сигналами, подаваемыми на специальные входы. Это оказалось очень удобным для перепрограммируемых микроконтроллеров и МУРЗ, хотя имело и свою цену, так как даже очень большие EEPROM имеют гораздо меньший объем памяти и меньший срок жизни, чем обычный EPROM. В последние годы появился новый вид постоянной памяти, так называемая флэш-память. В отличие от EEPROM, с побитным стиранием и перезаписью данных, в флэш-памяти стирание и запись данных производится большими блоками. Поскольку процесс стирания данных из памяти является относительно длительным, большого размера блоки, используемые в флэш-памяти позволили значительно ускорить этот процесс по сравнению со старыми EEPROM.

Флэш-память была впервые представлена доктором наук Фуджио Масуока (Fujio Masuoka) из корпорации Тошиба в 1984 году, рис. 36. Флэш-память основана на использовании MOSFET транзисторов.



Рис. 36. Доктор наук Фуджио Масуока, изобретатель флэш-памяти (Toshiba Corp.)

Эти транзисторы имеют изолированный управляющий электрод, называемый «gate» и управляются подачей на него электрического потенциала.

Благодаря очень хорошей изоляции, электрический заряд (определяющий состояние транзистора) сохраняется в MOSFET транзисторах очень долго. Для изменения состояния такого транзистора (то есть для стирания памяти из ячейки, образованной таким транзистором) достаточно лишь разрядить его управляющий переход, то есть снять электрический заряд. Построенная на таком принципе память способна сохранять информацию годами и допускает до 50–100 тысяч перезаписей. Совершенно очевидно, что сохранность памяти основанной на электрическом заряде зависит от скорости саморазряда ячеек памяти, на которую в сильной степени влияют различные неблагоприятные факторы, такие, как ионизирующее излучение и другие.

Все виды постоянной памяти являются энергонезависимыми (non-volatile memory), то есть такими, в которых информация не разрушается при отключении питания.

В действительности, при использовании в релейной защите, имеется часть программы, которая определяет алгоритм работы МУРЗ (то есть определяет вид защиты: дифференциальная, дистанционная, токовая и т.д.) и поэтому она не должна изменяться ни при каких условиях, и есть часть программы, которая может быть изменена потребителем (например, то часть, которая относится к рабочим уставкам и режимам работы защиты). Для того, чтобы разделить эти две части памяти иногда их выполняют в виде физически разделенных чипов, в одном из которых



Рис. 34. Структура входной цепи аналогового сигнала МУРЗ

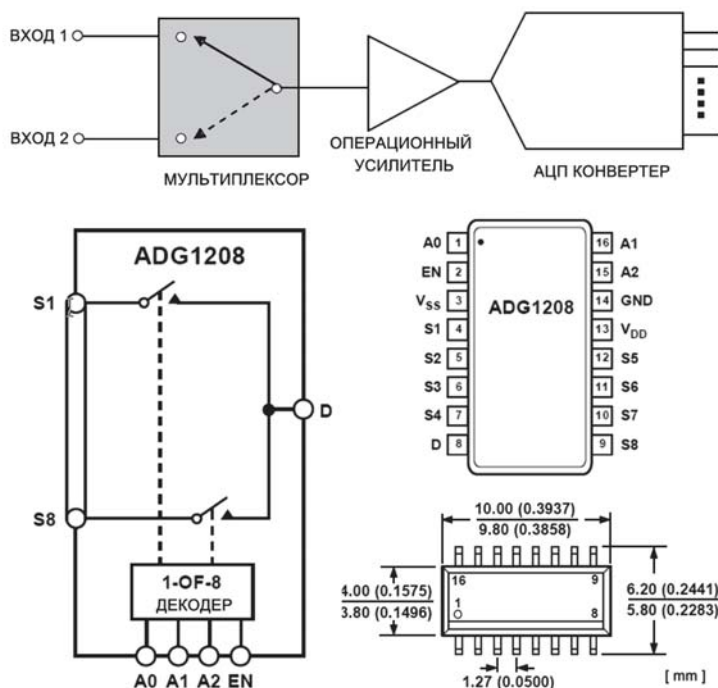


Рис. 35. 8-входовой мультиплексор типа ADG1208 (Analog Devices, Inc.)

хранится доступная для перезаписывания информация (EEPROM), а в другом — не доступная (так называемый Software Key - SWK, выполненная на основе ROM) Для того, чтобы изменить алгоритм работы МУРЗ необходимо физически извлечь SWK чип и заменить его новым. Для автоматического контроля исправности ROM и EEPROM в процессе их работы записанный в них массив данных суммируется и кодируется в виде некоторого числа, называемого контрольной суммой, которая записывается в специально отведенную для нее ячейку.

В режиме тестовой проверки (как правило, при загрузке микропроцессора) он просматривает содержимое памяти и сравнивает его с контрольной суммой. Если обнаруживается несоответствие, дальнейшая работа микропроцессора блокируется. В некоторых продвинутых системах имеется не одно, а сразу два параллельно работающих EEPROM. Если в одном из них обнаруживается несоответствие с контрольной суммой (то есть повреждение содержимого памяти) то в этом случае содержимое этой памяти автоматически перезаписывается со второго, неповрежденного EEPROM.

Существует также и несколько типов RAM памяти, прежде всего, это SRAM (static RAM) и DRAM (dynamic RAM).

Типичная ячейка статической двоичной памяти представляет собой двоичный триггер на транзисторах,

состоящий из двух перекрестно (кольцом) включенных инверторов (логических элементов HE) и ключевых транзисторов для обеспечения доступа к ячейке, рис. 37.

Такая схема является бистабильной, то есть, будучи переключенная из одного состояния в другое, сохраняет свое положение до прихода электрического импульса, изменяющего ее состояние. Таким образом, память, выполненная на таком принципе, рис. 38, не требует периодической перезагрузки для сохранения информации, но остается энергозависимой, то есть такой, в которой данные будут потеряны при отключении питания.

Для сохранения записанной информации и после отключения питания иногда применяют внешнюю литиевую батарейку, расположенную на плате. Обычно, такой батарейки хватает на много лет, но когда ее напряжение снижается, ее необходимо заменить. Однако, если просто вынуть ее, все данные, записанные в такой памяти, будут потеряны. Поэтому замену такой батарейки следует производить при подключенном параллельно ее держателю внешнем источнике питания.

Существует также и специальный вид такой памяти, называемый энергонезависимой (Non Volatile SRAM или nvSRAM). Такая память способна сохранять информацию и после отключения внешнего питания за счет встроенной миниатюрной литиевой батарейки, рис. 39.

Такая память более быстрая, чем EPROM и EEPROM поэтому nvSRAM иногда используют в качестве постоянной перезаписываемой памяти (EEPROM).

Обычный SRAM применяется в тех случаях, когда требуется небольшой объем памяти, но нужно низкое энергопотребление и относительная простота. Например, на основе SRAM выполняются регистры и кэш-память.

В устройствах с большим объемом рабочей памяти она выполняется как Dynamic Random Access Memory (DRAM). Каждая ячейка этой памяти содержит конденсатор С небольшой емкости и полупроводниковый ключ VT, расположенные внутри единичного чипа, рис. 40. Конденсаторы заряжаются в случае, когда в «ячейку» заносится единичный бит, либо разряжаются в случае, когда в «ячейку» заносится нулевой бит. Полупроводниковый ключ необходим для «запирания» ячейки и удержания заряда внутри конденсатора. Доступ к определенной ячейке осуществляется путем выбора ее адреса по строкам (rows) и столбцам (columns), рис. 40.

В реальных чипах DRAM функцию и конденсатора и полупроводникового ключа выполняют CMOS микротранзисторы, которые благодаря хорошей внутренней изоляции способны накапливать и сохранять заряд в течение некоторого времени, подобно конденсаторам. Достоинства такой конструкции — относительно низкая стоимость, большой объем памяти. Однако, из-за того, что емкость, образуемая микротранзисторами очень невелика, запасенный заряд быстро стекает, поэтому информацию приходится обновлять через определенные периоды времени во избежание потерь данных (собственно, именно поэтому этот вид памяти и называется «динамическим»). Этот процесс называется регенерацией памяти (memory refresh) и реализуется с помощью специального контроллера. В течение времени, называемого шагом регенерации, в DRAM перезаписывается целая строка «ячеек», и через 8–64 миллисекунды обновляются все строки памяти. Процесс регенерации памяти в таком классическом варианте существенно «тормозит» работу системы, поскольку в это время обмен данными с памятью невозможен. Поэтому, регенерация, основанная на обычном переборе строк, не применяется в современных типах DRAM.

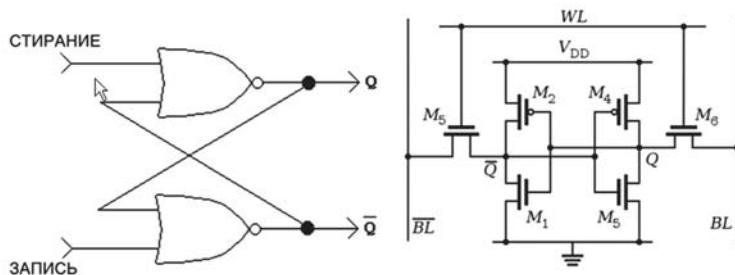


Рис. 37. Типовая ячейка статической оперативной памяти (SRAM) на базе шести транзисторов CMOS-типа

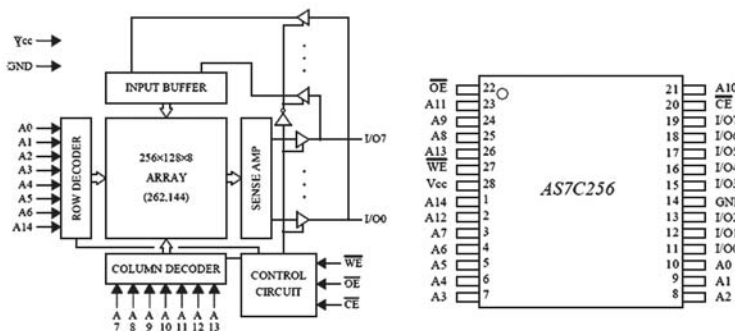
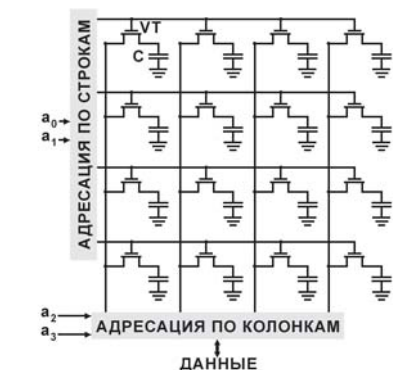


Рис. 38. Энергонезависимая статическая оперативная память (SRAM) типа AS7C256 (32k x 8 bit) на основе CMOS-транзисторов (Alliance Semiconductor)



**Рис. 39.** Структура и внешний вид энергонезависимой памяти SRAM

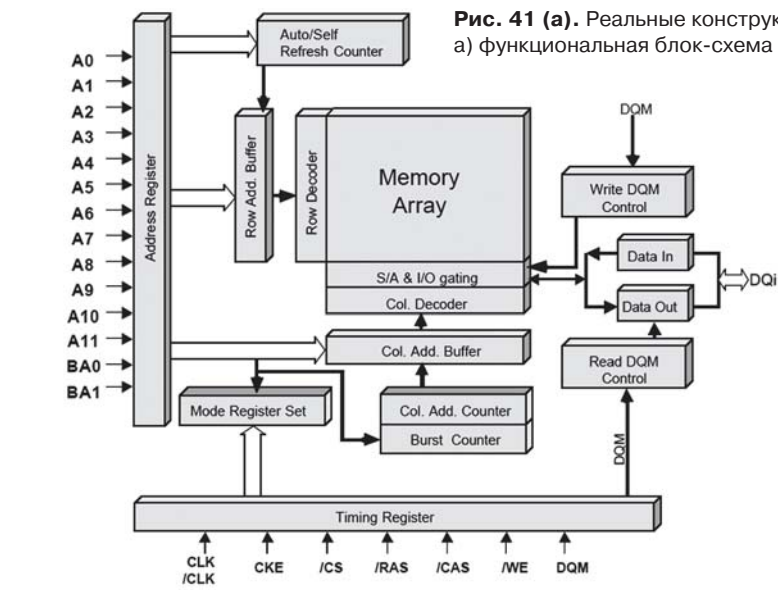


**Рис. 40.** Принципиальная схема построения DRAM

Существуют несколько более экономичных вариантов этого процесса, использующих дополнительные функциональные узлы, размещенные внутри чипа DRAM. Понятно, что реальная конструкция DRAM (рис. 41) оказывается намного сложнее, чем его упрощенная принципиальная схема.

В последние годы появилось множество усовершенствованных видов DRAM (EDRAM, FPM DRAM, EDO DRAM, SDRAM, DRRAM, etc.) одно лишь перечисление которых может занять много места и рассмотрение которых выходит далеко за рамки данной статьи.

В заключение отметим лишь одну очень важную особенность DRAM: его высокую чувствительность к электрическим помехам и к радиации. Электрические помехи, возникающие от внутренних цепей или проникающие извне, могут привести к самопроизвольному переключению ячейки динамической памяти, содержащей одиночный бит, в противоположное состояние. Первоначально предполагалось, что влияние радиации обусловлено альфа-частицами, излучаемыми пластмассой, которой опресован кристалл памяти, загрязнителями, содержащимися в самом чипе, упаковочным материалом.



**Рис. 41 (а).** Реальные конструкции DRAM. а) функциональная блок-схема



**Рис. 41 (б).** Реальные конструкции DRAM. б) внешний вид некоторых типов DRAM модулей, широко применяемых в персональных компьютерах

Прогресс последних лет в области нанотехнологий привел к существенному снижению размеров полупроводниковых элементов (речь идет о единицах и даже долях микрона), уменьшению толщины слоев полупроводниковых и изоляционных материалов, уменьшению рабочих напряжений, увеличению рабочей скорости, уменьшению электрической емкости отдельных ячеек памяти, увеличению плотности размещения элементарных логических ячеек в одном устройстве. Все это вместе взятое привело к резкому повышению чувствительности элементов памяти к ионизирующим излучениям. Эта чувствительность стала настолько высокой, что обычный (то есть совершенно нормальный) радиационный фон на уровне моря стал опасным для ячеек памяти. Особенно опасными являются потоки высокоэнергетических элементарных частиц, приходящих из космоса. Даже одна такая частица при попадании в ячейку памяти рождает вторичные потоки электронов и ионов, вызывающие самопроизвольное переключение элементарного транзистора или разряд емкости в элементах с зарядовой памятью. Проблема усугубляется тем, что в современных микропроцессорных структурах наб-

людается устойчивая тенденция расширения использования элементов памяти. Многие современные интегральные микросхемы высокого уровня интеграции, входящие в состав микропроцессорного устройства, содержат встроенные элементы памяти достаточно большого объема, исправность которых вообще никак не контролируется.

Проблема резкого увеличения чувствительности к ионизирующим излучениям актуальна не только для элементов памяти, но также и для высокоскоростных логических элементов, компараторов и т.д., то есть, практически, для всей современной микроэлектроники.

Самое страшное, что случайные сбои в работе микропроцессора, вызванные электромагнитными шумами и радиацией, могут быть временными, такими как самопроизвольные изменения содержания оперативной памяти (RAM) и регистров, а внутренние повреждения могут носить скрытый характер. Оба этих вида повреждений не выявляются никакими тестами и могут проявляться в самые неожиданные моменты.

*Продолжение  
в следующем номере*

**В. ГУРЕВИЧ**, канд. техн. наук