

13.1 Системы ввода/вывода

Помимо центрального процессора (ЦП) и памяти, третьим ключевым элементом архитектуры ВМ является *система ввода/вывода* (СВВ). Система ввода/вывода призвана обеспечить обмен информацией между ядром ВМ и разнообразными внешними устройствами (ВУ). Технические и программные средства СВВ несут ответственность за физическое и логическое сопряжение *ядра вычислительной машины* и ВУ.

В процессе эволюции вычислительных машин системам ввода/вывода по сравнению с прочими элементами архитектуры уделялось несколько меньшее внимание. Косвенным подтверждением этого можно считать, например, то, что многие программы контроля производительности вообще не учитывают влияние операций ввода/вывода (В/ВЫВ) на эффективность ВМ. Следствием подобного отношения стал существенный разрыв в производительности процессора и памяти, с одной стороны, и скоростью ввода/вывода — с другой.

Технически система ввода/вывода в рамках ВМ реализуется комплексом *модулей ввода/вывода* (МВВ). Модуль ввода/вывода выполняет сопряжение ВУ с ядром ВМ и различные коммуникационные операции между ними. Две основные функции МВВ:

- обеспечение интерфейса с ЦП и памятью (*«большой» интерфейс*);
- обеспечение интерфейса с одним или несколькими периферийными устройствами (*«малый» интерфейс*).

Анализируя архитектуру известных ВМ, можно выделить три основных способа подключения СВВ к ядру процессора (рис. 13.1.1).

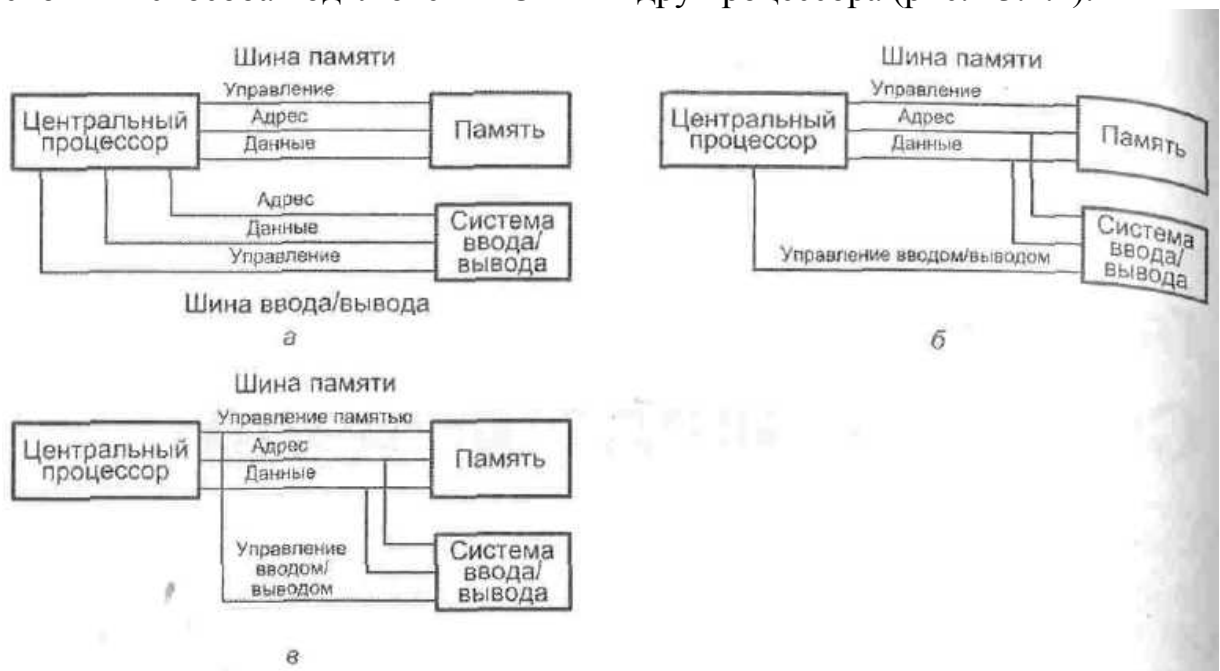


Рис. 13.1.1. Место системы ввода/вывода в архитектуре вычислительной машины: (а) - раздельными шинами памяти и ввода/вывода; (б) - с совместно используемыми линиями данных и адреса; (в) - подключение на общих правах с процессором и памятью

В варианте с **раздельными шинами памяти и ввода/вывода** (см. рис. 13.1.1, а) обмен информацией между ЦП и памятью физически отделен от ввода/вывода, поскольку обеспечивается полностью независимыми шинами. Это дает возможность осуществлять обращение к памяти одновременно с выполнением ввода/вывода. Кроме того, данный архитектурный вариант ВМ позволяет специализировать каждую из шин, учесть формат пересылаемых данных, особенности синхронизации обмена и т. п. В частности, шина ввода/вывода, с учетом характеристик реальных ВУ, может иметь меньшую пропускную способность, что позволяет снизить затраты на ее реализацию. Недостатком решения можно считать большое количество точек подключения к ЦП.

Второй вариант — с **совместно используемыми линиями данных и адреса** (см рис. 13.1.1, б). Память и СВВ имеют общие для них линии адреса и линии данных, разделяя их во времени. В то же время управление памятью и СВВ, а также синхронизация их взаимодействия с процессором осуществляются независимо по раздельным линиям управления. Это позволяет учесть особенности процедур обращения к памяти и к модулям ввода/вывода и добиться наибольшей эффективности доступа к ячейкам памяти и внешним устройствам.

Последний тип архитектуры ВМ **предполагает подключение СВВ к системном шине на общих правах** с процессором и памятью (см. рис. 13.1.1, в). Потенциально возможен также вариант подключения внешних устройств к системной шине напрямую, без использования МВВ, но против него можно выдвинуть сразу несколько аргументов. **Во-первых**, в этом случае ЦП пришлось бы оснащать универсальными схемами для управления любым ВУ. При большом разнообразии внешних устройств, имеющих к тому же различные принципы действия, такие схемы оказываются чересчур сложными и избыточными. **Во-вторых**, пересылка данных при вводе и выводе происходит значительно медленнее, чем при обмене между ЦП и памятью, и было бы невыгодно задействовать для обмена информацией с ВУ высокоскоростную системную шину. И, наконец, в ВУ часто используются иные форматы данных и длина слова, чем в ВМ, к которым они подключены.

13.2 Адресное пространство системы ввода/вывода

Как и обращение к памяти, операции ввода/вывода также предполагают наличие некоторой системы адресации, позволяющей выбрать один из модулей СВВ, а также одно из подключенных к нему внешних устройств. Адрес модуля и ВУ является составной частью соответствующей команды, в то время как расположение данных на внешнем устройстве определяется пересылаемой на ВУ информацией.

Адресное пространство ввода/вывода может быть совмещено с адресным пространством памяти или быть выделенным.

При **совмещении адресного пространства** для адресации модулей ввода/вывода отводится определенная область адресов (рис. 13.2.2). Обычно

все операции с модулем ввода/вывода осуществляются с использованием входящих в него внутренних регистров: управления, состояния, данных. *Фактически процедура ввода/вывода сводится к записи информации в одни регистры MBV и считыванию ее из других регистров.* Это позволяет рассматривать регистры MBV как ячейки основной памяти и работать с ними с помощью обычных команд обращения к памяти, при этом в системе команд ВМ вообще могут отсутствовать специальные команды ввода и вывода. Так, модификацию регистров MBV можно производить непосредственно с помощью арифметических и логических команд. Адреса регистрам MBV назначаются в области адресного пространства памяти, отведенной под систему ввода/вывода.

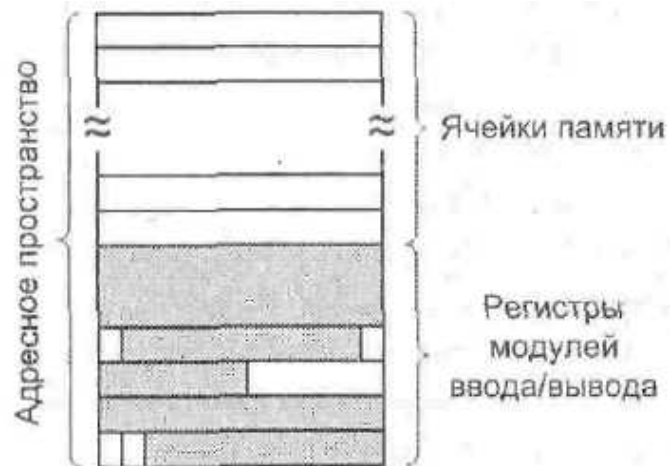


Рис. 13.2.2. Распределение совмещенного адресного пространства

Такой подход представляется вполне оправданным, если учесть, что ввод/вывод обычно составляет малую часть всех операций, выполняемых вычислительной машиной, чаще всего не **более 1%** от общего числа команд в программе.

Реализация концепции совмещенного адресного пространства в ВМ с кэш-памятью и виртуальной адресацией сопряжена с определенными проблемами. В частности, усложняется отображение виртуального адреса устройства ввода/вывода на физическое ВУ. Сложности также возникают и с кэшированием регистров MBV.

Сформулируем преимущества и недостатки совмещенного адресного пространства.

Достоинства совмещенного адресного пространства:

- расширение набора команд для обращения к внешним устройствам, что позволяет сократить длину программы и повысить быстродействие;
- значительное увеличение количества подключаемых внешних устройств;
- возможность внепроцессорного обмена данными между внешними устройствами, если в системе команд есть команды пересылки между ячейками памяти;
- возможность обмена информацией не только с аккумулятором, но и с любым регистром центрального процессора.

Недостатки совмещенного адресного пространства:

- сокращение области адресного пространства памяти;
- усложнение декодирующих схем адресов в СВВ;
- трудности распознавания операций передачи информации при вводе/выводе среди других операций. Сложности в чтении и отладке программы, в которой простые команды вызывают выполнение сложных операций ввода/вывода;
- трудности при построении СВВ на простых модулях ввода/вывода: сигнал управления не смогут координировать сложную процедуру ввода/вывода. Поэтому МВВ часто должны генерировать дополнительные сигналы под управлением программы.

Совмещенное адресное пространство используется в вычислительных машинах MIPS и SPARC.

В случае **выделенного адресного пространства** для обращения к модулям ввода/вывода применяются специальные команды и отдельная система адресов. Это позволяет разделить шины для работы с памятью и шины ввода/вывода, что дает возможность совмещать во времени обмен с памятью и ввод/вывод. В вычислительных машинах фирмы IBM и микроЭВМ на базе процессоров фирмы Intel система ввода/вывода, как правило, организуется в соответствии с концепцией выделенного адресного пространства.

Достоинства выделенного адресного пространства:

- адрес внешнего устройства в команде ввода/вывода может быть коротким. В большинстве СВВ количество внешних устройств намного меньше количества ячеек памяти. Короткий адрес ВУ подразумевает такие же короткие команды ввода/вывода и простые дешифраторы;
- программы становятся более наглядными, так как операции ввода/вывода выполняются с помощью специальных команд;
- разработка СВВ может проводиться отдельно от разработки памяти.

Недостатки выделенного адресного пространства:

- ввод/вывод производится только через аккумулятор центрального процессора;
- перед обработкой содержимого ВУ это содержимое нужно переслать в ЦП.

13.3 Внешние устройства

Связь ВМ с внешним миром осуществляется с помощью самых разнообразных внешних устройств. Каждое ВУ подключается к МВВ посредством индивидуальной шины. Интерфейс, по которому организуется такое взаимодействие МВВ и ВУ часто называют *малым*. Индивидуальная шина обеспечивает обмен данными и управляющими сигналами, а также информацией о состоянии участников обмена. Внешнее устройство, подключенное к МВВ, обычно называют *периферийным устройством* (ПУ). Все множество ПУ можно свести к трем категориям:

- для общения с пользователем;
- для общения с ВМ;
- для связи с удаленными устройствами.

Примерами первой группы служат видеотерминалы и принтеры. Ко второй группе причисляются внешние запоминающие устройства (магнитные и оптические диски, магнитные ленты и т. п.), датчики и исполнительные механизмы. Отметим двойственную роль внешних ЗУ, которые, с одной стороны, представляют собой часть памяти ВМ, а с другой — являются внешними устройствами. Наконец, устройства третьей категории позволяют ВМ обмениваться информацией с удаленными объектами, которые могут относиться к двум первым группам. В роли удаленных объектов могут выступать также другие ВМ.



Рис. 13.3.1 Структура внешнего устройства

Обобщенная структура ВУ показана на рис. 13.3.1. Интерфейс с МВВ реализуется в виде сигналов управления, состояния и данных.

Данные представлены совокупностью битов, которые должны быть переданы в модуль ввода/вывода или получены из него.

Сигналы управления определяют функцию, которая должна быть выполнена внешним устройством. Это может быть стандартная для всех устройств функция — посылка данных в МВВ или получение данных из него, либо специфичная для данного типа ВУ функция, такая, например, как позиционирование головки магнитного диска или перемотка магнитной ленты.

Сигналы состояния характеризуют текущее состояние устройства, в частности включено ли ВУ и готово ли оно к передаче данных.

Логика управления - это схемы, координирующие работу ВУ в соответствии с направлением передачи данных.

Задачей **преобразователя** является трансформация информационных сигналов, имеющих самую различную физическую природу, в электрические сигналы, а также обратное преобразование.

Обычно совместно с преобразователем используется **буферная память**, обеспечивающая временное хранение данных, пересылаемых между МВВ и ВУ.

13.4. Модули ввода/вывода

Модуль ввода/вывода в составе вычислительной машины отвечает за управление одним или несколькими ВУ и за обмен данными между этими устройствами с одной стороны, и основной памятью или регистрами ЦП — с другой. Основные функции МВВ можно сформулировать следующим образом:

- локализация данных;
- управление и синхронизация;
- обмен информацией;
- буферизация данных;
- обнаружение ошибок.

Под локализацией данных будем понимать возможность обращения к одному из ВУ, а также адресации данных на нем.

Адрес ВУ обычно содержится в адресной части команд ввода/вывода. Как уже отмечалось, в состав СВВ могут входить несколько модулей ввода/вывода. Каждому модулю назначается определенный диапазон адресов, независимо от того, является ли пространство адресов совмещенным или раздельным. Старшие разряды в адресах диапазона, выделенного модулю, обычно одинаковы и обеспечивают выбор одного из МВВ в рамках системы ввода/вывода. Младшие разряды адреса представляют собой уникальные адреса регистров данного модуля или подключенных к нему ВУ.

Одной из функций МВВ является проверка вхождения поступившего по шине адреса в выделенный данному модулю диапазон адресов. При положительном ответе модуль должен обеспечить дешифровку поступившего адреса и перенаправление информации к адресуемому объекту или от него.

Для простейших внешних устройств (клавиатура, принтер и т.п.) адрес ВУ однозначно определяет и расположение данных на этом устройстве. Для более сложных ВУ, таких как внешние запоминающие устройства, информация о местонахождении данных, требует детализации. Так, для ЗУ на магнитной ленте необходимо указать номер записи, а для магнитного диска — номер цилиндра, номер сектора и т.п. Эта часть адресной информации передается в МВВ не по шине адреса, а в виде служебных сообщений, пересылаемых по шине данных. Обработка такой информации в модуле, естественно, сложнее, чем выбор нужного регистра или ВУ. В частности, она может требовать от МВВ организации процедуры поиска на носителе информации.

Функция управления и синхронизации заключается в том, что МВВ должен координировать перемещение данных между внутренними ресурсами ВМ и внешними устройствами. При разработке системы управления и синхронизации модуля ввода/вывода необходимо учитывать целый ряд факторов.

В отличие от обмена с памятью процессы ввода/вывода и работа ЦП протекает не синхронно. Очередная порция информация может быть выдана

на устройство вывода лишь тогда, когда это устройство готово их принять. Аналогично, ввод от устройства ввода допустим только в случае доступности информации на устройстве ввода. Несинхронный характер процессов ввода/вывода предполагает обмен сигналами, называемый «рукопожатием» (handshake). Для двухпроводной системы синхронизации эта процедура состоит из четырех шагов, которые применительно к операции вывода можно описать следующим образом:

1. Центральный процессор с помощью сигнала $ДД = 1$ (данные достоверны) извещает о доступности данных, подлежащих выводу.
2. Приняв данные, устройство вывода сообщает процессору об их получении сигналом $ДП = 1$ (данные приняты).
3. Получив подтверждение, ЦП обнуляет сигнал $ДД$ и снимает данные с шины, после чего может выставить на шину новые данные.
4. Обнаружив, что $ДД = 0$, устройство вывода, в свою очередь, устанавливает в нулевое состояние сигнал $ДП$, после чего оно готово для обработки принятых данных все время до получения очередного сигнала $ДД = 1$.

Описанную процедуру иллюстрирует рис. 13.4.1 (в скобках указаны номера шагов).

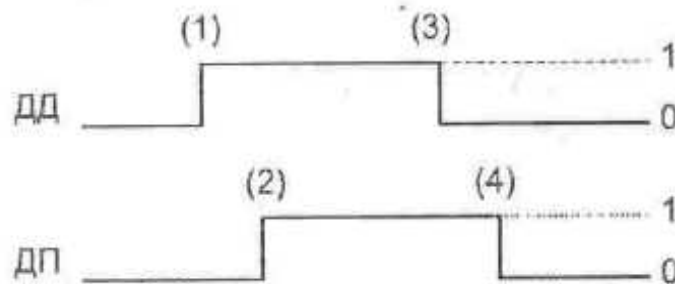


Рис. 13.4.1 Временная диаграмма процедуры «рукопожатия»

Таким образом, модуль ввода/вывода обязан снабдить центральный процессор информацией о собственной готовности к обмену, а также о готовности подключенных к модулю ВУ. Помимо этого, процессор должен обладать оперативными сведениями и об иных происходящих в СВВ событиях.

Основной функцией МВВ является **обеспечение обмена информацией**. Со стороны «большого» интерфейса — это обмен с ЦП, а со стороны «малого» интерфейса - обмен с ВУ. В таком плане требования к МВВ непосредственно проистекают из типовой последовательности операций, выполняемых процессором при вводе/выводе.

1. Выбор требуемого внешнего устройства.
2. Определение состояния МВВ и ВУ.
3. Выдача указания модулю ввода/вывода на подключение нужного ВУ к процессору.
4. Получение от МВВ подтверждения о подключении затребованного ВУ процессору.
5. Распознавание сигнала готовности устройства к передаче очередной

порции информации.

6. Прием (передача) порции информации.

7. Циклическое повторение двух предшествующих пунктов до завершения передачи информации в полном объеме.

8. Логическое отсоединение ВУ от процессора.

С учетом описанной процедуры функция *обмена информацией* с ЦП включает в себя:

- *дешифровку команды*: МВВ получает команды из ЦП в виде сигналов на шине управления;

- *пересылку данных* между МВВ и ЦП по шине данных;

- *извещение о состоянии*: из-за того, что ВУ — медленные устройства, важно знать состояние модуля ввода/вывода. Так, и момент получения запроса на пересылку данных в центральный процессор МВВ может быть не готов выполнить эту пересылку, поскольку еще не завершил предыдущую команду. Этот факт должен быть сообщен процессору с помощью соответствующего сигнала. Возможны также сигналы, уведомляющие о возникших ошибках;

- *распознавание адреса*: МВВ обязан распознавать адрес каждого ВУ, которым он управляет.

Наряду с обеспечением обмена с процессором МВВ должен выполнять функцию обмена информацией с ВУ. Такой обмен также включает в себя передачу данных, команд и информации о состоянии.

Важной задачей модуля ввода/вывода является **буферизация данных**.

Несмотря на различия в скорости обмена информацией для разных ВУ, все они в этом плане значительно отстают от ЦП и памяти. Такое различие компенсируется за счет буферизации. При выводе информации на ВУ данные пересылаются из основной памяти в МВВ с большой скоростью. В модуле эти данные буферизируются и затем направляются в ВУ со скоростью, свойственной последнему. При вводе из ВУ данные буферизируются так, чтобы не заставлять память работать в режиме медленной передачи. Таким образом, МВВ должен обладать способностью работать как со скоростью памяти, так и со скоростью ПУ.

Еще одной из важнейших функций МВВ является **обнаружение ошибок**, возникающих в процессе ввода/вывода. Центральный процессор следует оповещать о каждом случае обнаружения ошибки. Причиной возникновения последних бывают самые разнообразные факторы, которые в первом приближении можно свести к следующим группам:

- воздействие внешней среды;
- старение элементной базы;
- системное программное обеспечение;
- пользовательское программное обеспечение.

Из наиболее «активных» факторов окружения ВМ следует выделить:

- загрязнение и влагу;
- повышенную или пониженную температуру окружающей среды;
- электромагнитное облучение;

- скачки напряжения питания.

Степень влияния каждого из этих факторов зависит от типа и конструкции МВВ и ВУ. Так, к загрязнению наиболее чувствительны оптические и механические элементы ВУ, в то время как работа электронных компонентов СВВ в большей степени зависит от температуры внешней среды, электромагнитного воздействия и стабильности питающего напряжения.

Фактор старения характерен как для механических, так и для электронных элементов СВВ. В механических элементах он выражается в виде износа, следствием чего может быть неточное позиционирование головок считывания/записи на внешних запоминающих устройствах или неправильная подача бумаги в принтерах. Старение электронных элементов обычно выражается в изменении электрических параметров схем, приводящем к нарушению управления и синхронизации. Так отклонения в параметрах электронных компонентов в состоянии вызвать недопустимый «перекос» сигналов, передаваемых между ЦП и МВВ или внутри МВВ.

Источником ошибок может стать и несовершенство системного программного обеспечения (ПО):

- непредвиденные последовательности команд или кодовые комбинации;
- некорректное распределение памяти;
- недостаточный размер буфера ввода/вывода;
- недостаточно продуманные и оттестированные комбинации системных модулей;

Среди ошибок, порождаемых пользовательским ПО, наиболее частыми являются:

- нарушение последовательности выполнения программы;
- некорректные процедуры.

Вероятность возникновения ошибки внутри процессора для современных ЦП оценивается величиной порядка 10^{-18} , в то время как для остальных составляющих ВМ она лежит в диапазоне 10^{-8} - 10^{-13} .

13.5 Структура модуля ввода/вывода

Структура МВВ в значительной мере зависит от числа и сложности внешних устройств, которыми он управляет, однако в самом общем виде такой модуль можно представить в форме, показанной на рис. 13.5.1

Связь модуля ввода/вывода с ядром ВМ осуществляется посредством системной или специализированной шины. С этой стороны в МВВ реализуется так называемый «большой» интерфейс. Большие различия в архитектуре систем команд и шин ВМ являются причиной, того, что со стороны «большого» интерфейса модули ввода/вывода достаточно трудно унифицировать, и часто МВВ, созданные для одних ВМ, не могут быть использованы в других. Тем не менее в структурном плане они достаточно схожи.

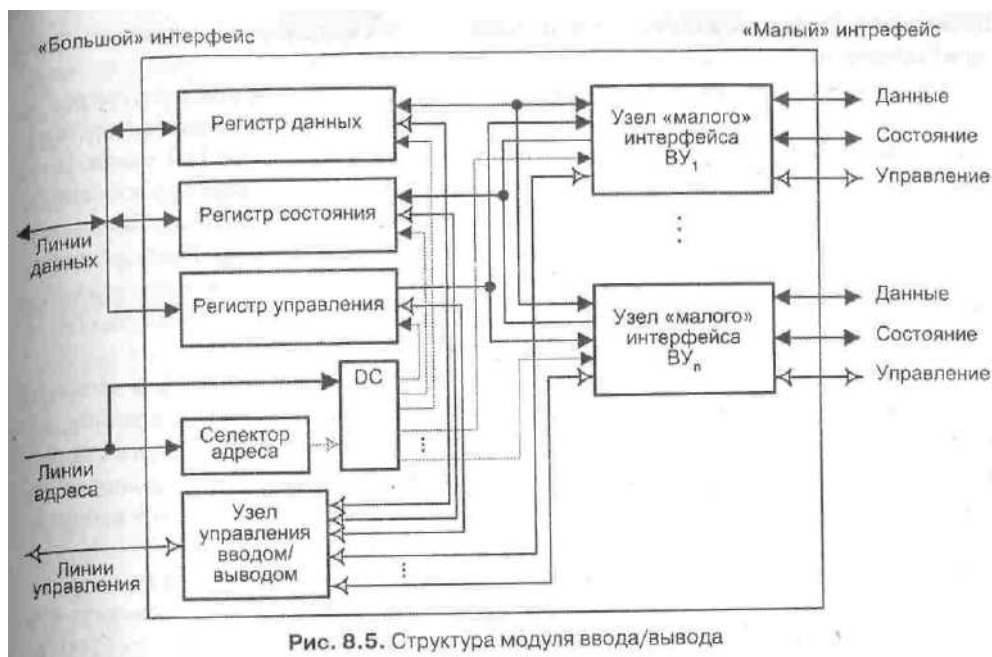


Рис. 8.5. Структура модуля ввода/вывода

Рис 13.5.1 Структура модуля ввода/вывода

Данные, передаваемые в модуль из него, буферизируются в регистре данных. Буферизация позволяет компенсировать различие в быстродействии ядра ВМ и внешних устройств. Разрядность регистра, как правило, совпадает с шириной шины данных со стороны «большого» интерфейса (2, 4 или 8 байт). В свою очередь большинство ВУ ориентировано на побайтовый обмен информацией. Побайтовая пересылка информации по «широкой» системной шине — крайне неэффективное решение, поэтому со стороны «малого» интерфейса регистр данных часто дополняют узлом упаковки/распаковки (на схеме не показан). Этот узел при вводе обеспечивает последовательное побайтовое заполнение регистра данных (упаковку), а при выводе — последовательную побайтовую выдачу содержимого регистра на ВУ (распаковку). В результате при обмене данными через «большой» интерфейс занята вся ширина шины данных. В MBV, рассчитанных на работу с большим числом ВУ, могут входить несколько регистров данных, что позволяет независимо хранить текущие данные каждого из внешних устройств.

Помимо регистра данных в составе MBV имеются также регистр управлений и регистр состояния (либо совмещенный регистр управления/состояния).

В регистре управления (РУ) фиксируются поступившие из ЦП команды управления модулем или подключенными к нему внешними устройствами. Отдельные разряды регистра могут представлять такие команды, как очистка регистров MBV, сброс ВУ, начало чтения, начало записи и т.п. В сложных MBV присутствует несколько регистров управления, например регистр управляющих сигналов для модуля в целом и отдельные РУ для каждого из ВУ.

Регистр состояния (РС) служит для хранения битов состояния MBV и подключенных к нему ВУ. Содержимое определенного разряда регистра может характеризовать, например, готовность устройства ввода к приему

очередной порции данных, занятость устройства вывода или нахождение ВУ в автономном режиме (online). В МВВ не исключается наличие и более одного регистра состояния.

Процедура ввода/вывода предполагает возможность работы с каждым регистром МВВ или внешним устройством по отдельности. Такая возможность обеспечивается системой адресации. Каждому модулю в адресном пространстве ввода/вывода (совмещенном или раздельном) выделяется уникальный набор адресов, количество адресов в котором зависит от числа адресуемых элементов. Поступивший из ЦП адрес с помощью селектора адреса проверяется на принадлежность к диапазону, выделенному данному МВВ. В случае подтверждения дешифратор ДС выполняет раскодирование адреса, разрешая работу с соответствующим регистром модуля или ВУ.

Узел управления вводом/выводом по сути играет роль местного устройства управления МВВ. На него возлагаются две задачи: обеспечение взаимодействия ЦП и координация работы всех составляющих МВВ. Связь с ЦП реализуется посредством линии управления, по которым из ЦП в модуль поступают сигналы, служащие для синхронизации операций ввода и вывода. В обратном направлении передаются сигналы, информирующие о происходящих в модуле событиях, например сигналы прерывания. Часть линий управления может задействоваться модулем для арбитража. Вторая функция узла управления реализуется с помощью внутренних сигналов управления.

Со стороны «малого» интерфейса МВВ обеспечивает подключение внешних устройств и взаимодействие с ними. Эта часть МВВ более унифицирована, поскольку внешние устройства всегда подгоняются под один из стандартных протоколов. Каждое из внешних устройств «обслуживается» своим узлом «малого», интерфейса, который реализует принятый для данного ВУ стандартный протокол взаимодействия.

При управлении широким спектром ВУ модуль должен по возможности освобождать ЦП от знания деталей конкретных ВУ, так чтобы ЦП мог управлять любым устройством с помощью простых команд чтения и записи. МВВ при этом берет на себя задачи синхронизации, согласования форматов данных и т. п.

Модуль ввода/вывода, который берет на себя детальное управление ВУ и общается с ЦП только с помощью команд высокого уровня, часто называют *каналом ввода/вывода* или *процессором, ввода/вывода*. Наиболее примитивный МВВ, требующий детального управления со стороны ЦП, называют *контроллером ввода/вывода* или *контроллером устройства*. Как правило, контроллеры ввода/вывода типичны для микроЭВМ, а каналы ввода/вывода — для универсальных ВМ.