

Владимир Беломытцев

Замена элементов управляющей вычислительной системы без отключения питания

ВВЕДЕНИЕ

Безотказная работа электронной аппаратуры — это качество, которое высоко оценит любой пользователь, независимо от того, идет речь о простой стиральной машине или о сложной системе АСУ ТП. Традиционно вопросам надежности уделяется повышенное внимание там, где выход системы из строя приводит к большим экономическим потерям, возникает угроза здоровью людей, загрязняется окружающая среда и т.п.

Как правило, на практике важно не только то, чтобы отказы происходили как можно реже, но и то, чтобы в случае, если отказ все-таки произошел, время простоя (время восстановления) было минимальным.

Тривиальный метод повышения надежности всей системы — это использование при ее построении наиболее надежных компонентов.

Для этого разработчики стараются закладывать в систему узлы и устройства, производимые компаниями с хорошей репутацией, применяют современные технологии (например, заменяют механически НЖМД на флэш-диски), проводят входной контроль и испытания применяемых изделий и т.п.

Другим популярным и в то же время наиболее кардинальным способом повышения надежности на системном уровне является резервирование. Применяется двукратное или многократное резервирование либо системы в целом, либо ее наиболее важных или наиболее «слабых», с точки зрения надежности, частей. В случае «горячего» резервирования отказ парируется практически мгновенно, так как переход на резервный комплект оборудования происходит «незаметно» и не отражается на функциональных возможностях системы.

Однако во многих случаях применение резервирования по разным причинам (чаще всего экономическим) неоправданно. В этом случае приходится мириться с последствиями отказов, но можно предпринять ряд мер, чтобы время восстановления было минимальным. В общем случае эти меры должны быть комплексными организационно-техническими. Технические решения в этой области направлены прежде всего на обеспечение возможности замены отказавших элементов системы без отключения питания («hot swap», «hot plug», «live insertion», или «горячая» замена).

Решение о применении какого-либо способа повышения надежности или их комбинации следует принимать, исходя из анализа системы в целом, с учетом последствий отказов. Например, функция «горячей» замены может оказаться совершенно бесполезной, если даже кратковременный выход из строя какого-либо модуля равносителен выходу из строя всей системы. Такая ситуация приводит к потере управления технологическим объектом, когда в любом случае необходим его аварийный останов. Также «горячая» замена неоправданна там, где модули не имеют развитых средств самодиагностики, потому что время, затрачиваемое персоналом на поиск неисправного модуля, может в результате «съесть» всю экономию, достигаемую на операции собственно замены модуля. Да и экономия эта может оказаться не во всех случаях существенной. На практике с учетом человеческого фактора подготовительные действия по замене модуля могут составить 10–15 минут, в то время как сама замена занимает 1–2 минуты. Как правило, современные встраиваемые системы после включе-

ния питания запускаются достаточно быстро, поэтому добавление 1–2 минут на выключение, а затем включение питания увеличит длительность ремонта всего на 5–10%. К тому же в распределенных АСУ ТП система питания также является распределенной и позволяет локально отключать питание только в той части системы, которая содержит отказавший модуль. То есть в результате анализа может оказаться, что те или иные способы повышения надежности не стоят тех денег, которые нужно вложить в их реализацию.

Продолжая тему «горячей» замены, необходимо отметить, что существуют приложения, где эта технология успешно применяется и вполне уместна. Например, телекоммуникационный узел, являясь территориально централизованной системой, позволяет обеспечить достаточно быструю доставку запасных модулей к месту отказа.

В состав узла входит один или несколько телекоммуникационных серверов, содержащих процессорный модуль и ряд однотипных периферийных модулей, каждый из которых, в свою очередь, обслуживает определенное число каналов связи.

Конечно, в случае отказа процессорного модуля «горячая» замена — все равно, что мертвому припарка. Весь сервер выходит из строя и после замены процессорного модуля надо осуществлять «холодный» старт системы. Так что в этой части более уместно резервирование. В то же время, если происходит отказ одного из периферийных модулей, то сервер не выходит полностью из строя (если, конечно, отказавший модуль не «подвесил» системную шину), а происходит деградация его функциональных

возможностей в части количества обслуживаемых каналов связи. Если на время замены модуля мы выключим питание сервера, то к недовольным клиентам, подключенным к отказавшему модулю, добавится множество новых, подключенных ко всему серверу. При этом может прерваться как несущественный разговор двух приятелей, так и доступ в Internet для компании, которая ничем, кроме торговли через Internet, не занимается и для которой даже кратковременная потеря связи означает вполне конкретные убытки. В условиях конкуренции телекоммуникационные компании ценят своих клиентов и предпочитают инвестировать определенные средства если уж не в полное резервирование, то хотя бы в «горячую» замену. В подобных приложениях «горячая» замена хотя и не парирует отказы, подобно системам с резервированием, зато позволяет во время замены неисправного модуля не отключать функционирующую часть системы, имеющую с этим модулем общий источник питания.

Существует много стандартных и частнофирменных подходов к вопросу «горячей» замены, однако возникаю-

щие проблемы и пути их решения в основном созвучны. К основным проблемам, которые приходится решать при разработке аппаратуры с функцией «горячей» замены, можно отнести:

- электростатический заряд, носителем которого может быть как подключаемый к системе элемент, так и производящий подключение человек, может вызывать повреждение электронных компонентов системы;
- некоторые электронные компоненты при включении выходят из строя, если нарушается определенная последовательность подачи сигналов на их входы;
- изменение нагрузки при «горячем» подключении элементов может вызывать скачкообразные изменения питающего напряжения, влияющие на функционирование системы;
- «горячее» подключение элементов к системной магистрали может вызывать нарушение транзакций на ней;
- система должна обладать способностью к динамической реконфигурации, т.е. вновь устанавливаемые элементы должны автоматически заноситься в список системных ре-



Рис. 1. Субблоки в стандарте «Евромеханика»

сурсов, а демонтируемые – удаляться из него.

Некорректное решение любой из этих задач может стать причиной выдачи ложного управляющего воздействия на объект управления или выхода из строя системы.

Далее рассматриваются некоторые технические решения, позволяющие разрабатывать типовые элементы замены (ТЭЗы), отвечающие требованиям систем с «горячей» заменой. Основное внимание при этом уделено аппаратным аспектам проблемы. Рассмотрение ведется на примере 19" конструкторов Евромеханика (МЭК 297) фирмы Schroff, а также изделий фир-

мы Advantech. В качестве типового элемента замены рассматривается модуль, содержащий лицевую панель и печатную плату с электронными компонентами и разъемами. Модули размещаются в вертикальном положении в субблоках (рис. 1), которые, в свою очередь, располагаются в электротехнических корпусах — шкафах или стойках.

ЗАЩИТА ОТ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Одна из часто встречающихся причин выхода из строя электронного оборудования — электростатический пробой, возникающий в результате передачи статического заряда между поверхностями с различными потенциалами. Носителем статического заряда может являться человек, производящий замену модулей (заряд, накапливаемый человеком, может достигать 20 кВ). Не случайно одним из пунктов испытаний на электромагнитную совместимость, которым в обязательном порядке подвергаются все вновь разрабатываемые приборы и системы, является испытание на устойчивость к воздействию электростатического заряда. В соответствии с ГОСТ Р 29191-91 (МЭК 801-2) разряд прилагается к следующим испытательным точкам:

- винтам крепления внутри и снаружи электротехнического корпуса;
- проводящим поверхностям органов управления;
- лицевым панелям блоков и модулей.

Амплитуда испытательных импульсов зависит от назначения и условий применения изделия. Например, отказоустойчивая система, предназначенная для использования на железнодорожном транспорте и непосредственно обеспечивающая безопасность движения поездов, должна согласно ГОСТ 50656-94 выдерживать без прекращения функционирования воздействие контактных электростатических зарядов с амплитудой напряжения импульса 4 кВ.

Снятие электростатического заряда происходит при прикосновении к заземленной поверхности, в качестве которой в данном случае выступает лицевая панель модуля. Средства, используемые для «сброса» статического заряда в процессе извлечения модуля из субблока и его установки в субблок, несколько отличаются. Поэтому удобно рассматривать две стадии замены модуля отдельно.

Защита от статического электричества при извлечении модуля из субблока

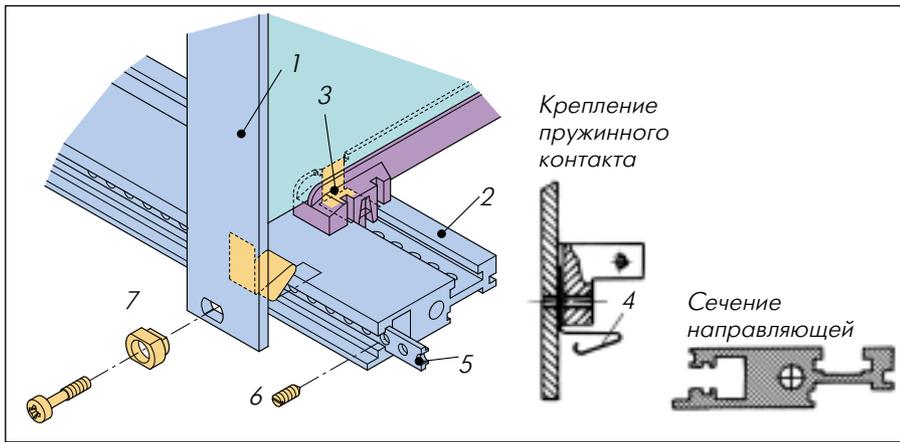
Для эффективного снятия заряда при извлечении модуля должен быть обеспечен надежный электрический контакт:

- между рукой оператора и лицевой панелью модуля;
- между лицевой панелью модуля и металлическими деталями субблока;
- между деталями субблока и точкой подключения защитного заземления к корпусу шкафа или стойки.

Необходимым условием обеспечения электрического контакта между оператором и лицевой панелью модуля является рациональный выбор ее материала и покрытия. Фирма Schroff использует для изготовления лицевых панелей анодированный алюминий — материал, обладающий высокой электропроводностью. На это следует обратить внимание тем разработчикам, которые по тем или иным причинам решают сами изготавливать лицевые панели: часто из-за того, что технологические возможности не позволяют придать алюминиевым изделиям привлекательный внешний вид, лицевые панели покрывают эмалью. Очевидно, что в этом случае об эффективной электростатической защите говорить не приходится.

Меры, принимаемые фирмой Schroff для создания надежного контакта между лицевой панелью модуля и металлическими деталями субблока, иллюстрирует рис. 2. Лицевая панель плотно прижимается к переднему горизонтальному рельсу субблока винтом, однако образованию надежного контакта препятствует защитная оксидная пленка, которой покрыты эти детали. Более качественное соединение создается при помощи металлической втулки 7, запрессованной в лицевую панель 1, и стальной групповой гайки 5. Причем с целью улучшения контакта групповой гайки с корпусом субблока она фиксируется при помощи заостренного винта 6. Иногда на лицевых панелях устанавливаются более дешевые и технологичные пластмассовые втулки. В этих случаях для повышения качества контакта используются пружинные планки с выступающими заостренными зубцами (рис. 3). Электрическое сопротивление контакта при этом не превышает 10^{-2} Ом.

Для обеспечения электрического контакта между корпусом субблока и



Условные обозначения:
 1 - лицевая панель модуля;
 2 - направляющая;
 3 - ESD-контакт;
 4 - пружинный контакт;
 5 - групповая гайка;
 6 - винт;
 7 - втулка

Рис. 2. Обеспечение контакта между лицевой панелью модуля и деталями субблока

контуром заземления фирма Schroff предлагает использовать специальные шины и клеммы, показанные на рис. 4, а также комплекты проводов (GND/earthing kits).

Защита от статического электричества в процессе установки модуля в субблок

В процессе установки в субблок нового модуля необходимо избавиться от электростатического заряда раньше, чем произойдет соединение ответных частей разъемов. Для выполнения этого требования описанных средств недостаточно. В субблоках фирмы Schroff задача решается за счет использования антистатических пружинных контактов 4 (рис. 2) и скользящих ESD-контактов (ESD — ElectroStatic Discharge contacts). ESD-контакты размещаются на направляющих субблока и соединяются с его заземленными металлическими

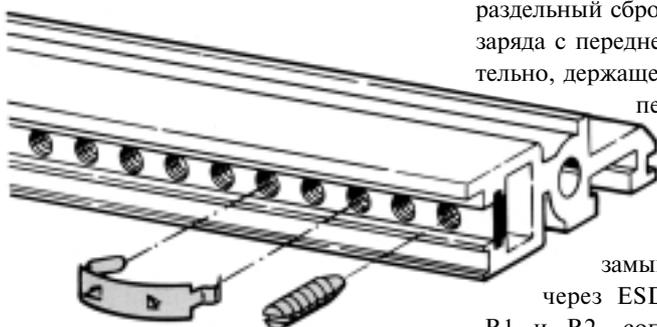
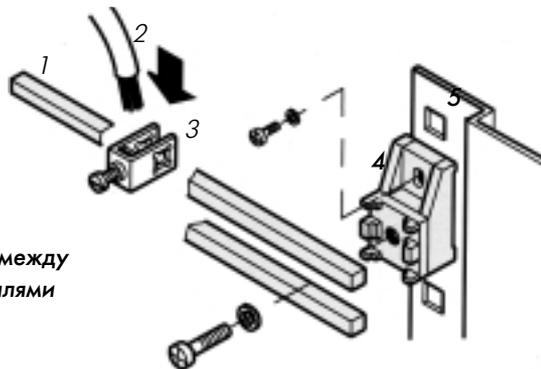


Рис. 3. Использование пружинных планок



Условные обозначения:
 1 - медная шина;
 2 - заземляющий проводник субблока;
 3 - клемма;
 4 - монтажный блок;
 5 - держатель 19" панелей

Рис. 4. Обеспечение контакта между контуром заземления и корпусом субблока

частями. Внешний вид ESD-контакта показан на рис. 5, а принцип его работы ясен из рис. 6. Вдоль нижнего края печатной платы модуля должна располагаться металлизированная полоса, состоящая из трех сегментов. Передний сегмент должен быть электрически соединен с лицевой панелью. В процессе перемещения платы по направляющей сегменты поочередно соприкасаются с ESD-контактом. При этом происходит раздельный сброс электростатического заряда с передней панели (и, следовательно, держащего ее оператора) и цепей питания модуля. Расстояние между сегментами должно быть достаточным, чтобы предотвратить замыкание их между собой через ESD-контакт. Резисторы R1 и R2, сопротивление которых должно быть в пределах 1-2 МОм, служат для ограничения тока.

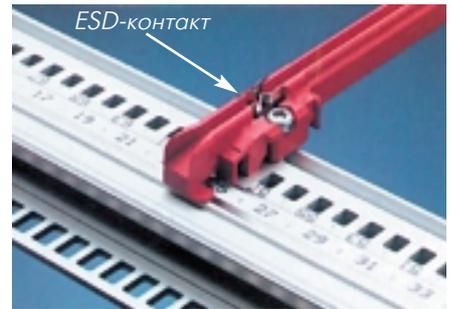


Рис. 5. Направляющая с ESD-контактом

Соблюдение необходимой последовательности подачи питающих напряжений

Часто электронные компоненты, используемые в модулях, требуют соблюдения определенной последовательности подачи сигналов. В частности, если на информационных входах КМОП ИС сигналы появятся раньше, чем будет подано питающее напряжение, микросхема может выйти из строя в результате «эффекта защелкивания» — переключения в открытое состояние паразитных биполярных структур, которые образуются во входных и выходных КМОП-каскадах. Результатом «защелкивания» является появление низкоимпедансной цепи между шинами питания, резкое повышение температуры микросхемы и выход ее из строя. В процессе «горячего» подключения и отключения платы с КМОП ИС возникает типичная ситуация, провоцирующая «защелкивание». Соединение/разъединение сигнальных цепей и цепей питания происходит в случайном порядке, зависящем от многих факторов: от угла, под которым вставляется/извлекается плата, от наличия микродефектов, степени загрязненности контактов разъема и т.д. Очевидным решением проблемы предотвращения «защелкивания» является использование для подключения питания отдельных разъемов с удлиненными контактами.

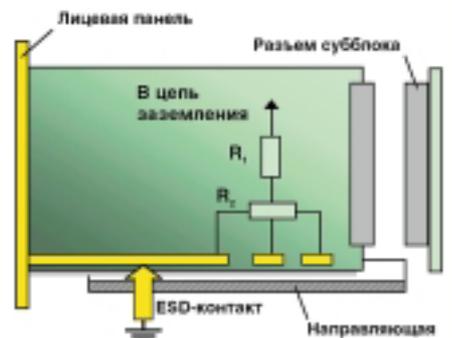


Рис. 6. Использование ESD-контакта

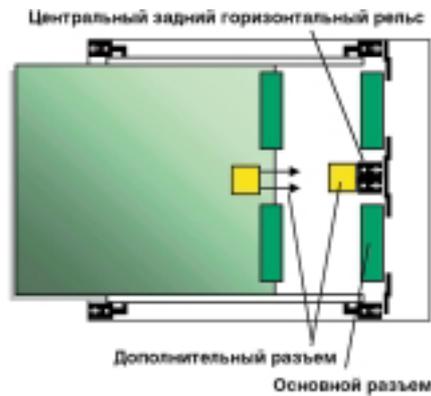


Рис. 7. Вариант размещения дополнительного разъема

Например конструкция субблоков Schroff позволяет, как это показано на рис. 7, разместить дополнительный разъем между двумя основными, закрепив его на среднем поперечном рельсе (это относится к субблокам высотой 6U и более). Однако данное решение требует тщательной конструкторской проработки и не всегда применимо.

Другое, более технологичное решение используется в системах с шиной CompactPCI, в частности, в компьютерах MIC-3000 фирмы Advantech. Для подключения модулей к кросс-плате (backplane) применяются пятирядные разъемы IEC-1076-4-101, разработанные компанией Siemens для телекоммуникационных приложений (рис. 8). В блочной части разъема, размещаемой на кросс-плате, имеются три типа контактов: нормальной длины, удлиненные и укороченные, что позволяет задавать необходимую последовательность подключения сигналов. В качестве другого примера использования удлиненных контактов для «горячего» подключения можно привести устройства с интерфейсом PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association), или PC Card. Компьютеры, предназначенные для подключения карточек с интерфейсом PC Card, снабжаются 68-контактными разъемами (male) с шестью удлиненными контактами — по три

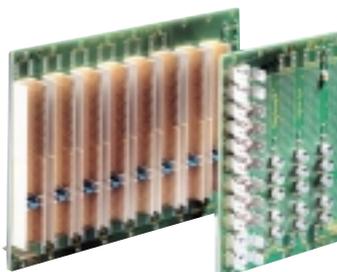


Рис. 8. Кросс-плата Compact PCI

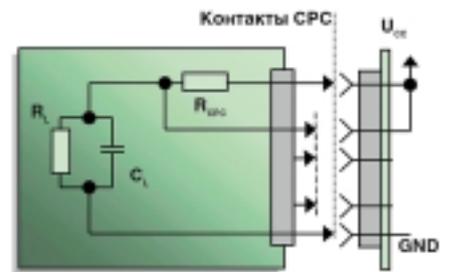


Рис. 9. Использование контактов предварительной зарядки

для цепей «GND» (0 В, «земля») и «5V» (5 В).

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ «БРОСКОВ» ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Удлиненные контакты обеспечивают решение еще одной проблемы: в процессе «горячей» замены конденсаторы подключаемого «холодного» модуля заряжаются стремительно нарастающим током, протекающим через контакты питания. Если в модуле нет специальных схем для ограничения этого тока, то его величина определяется исключительно сопротивлением и индуктивностью печатных проводников.

Наиболее простое решение, основанное на использовании удлиненных контактов разъема, показано на рис. 9. Удлиненные контакты, или контакты CPC (Card Precharge Connector — предварительная зарядка платы) соединены с контактами питания через токоограничивающий резистор. В процессе «горячей» замены контакты CPC соединяются с противостоящими им контактами субблока раньше, чем замыкается цепь питания. В течение того времени, когда замкнутыми оказываются только цепи CPC (это время называют временем предварительной зарядки платы), начальный всплеск тока ограничивается сопротивлением резистора R_{CPC} . Этот резистор, сопротивление которого должно быть не меньше 10 Ом, сводит к минимуму начальный бросок напряжения. После того как заменяемая плата займет свое место в субблоке и контакты питания надежно соединятся со своими ответными частями, резистор R_{CPC} окажется зашунтированным. В этот момент конденсатор C_L уже будет заряжен до уровня, близкого к номиналу питающего напряжения U_{CC} .

Более корректный и вместе с тем более дорогой вариант этого решения основан на использовании диодной развязки. Контакты CPC запитываются от дополнительного источника и соеди-

няются с цепями питания платы через развязывающие диоды. Заметные броски питающего напряжения при этом возникают только в цепи дополнительного источника. Дополнительный источник может подключаться при помощи кабеля через отдельный СРС-разъем, размещенный в передней части платы, однако этот вариант менее удобен, с точки зрения эксплуатации.

ДИНАМИЧЕСКОЕ КОНФИГУРИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Под динамическим конфигурированием в данном случае понимается автоматическое распознавание, инициализация, тестирование и включение в работу вновь подключенных модулей, а также исключение неисправных модулей из списка системных ресурсов.

Для организации автоматического конфигурирования необходимо информировать операционную систему (или прикладную программу) о намерении оператора извлечь какой-либо модуль или подключить новый. С этой целью на каждом модуле может быть установлен микропереключатель, механически связанный с рукояткой экстрактора. Механизм должен обеспечивать замыкание контактов переключателя до того, как извлекаемый модуль начнет перемещаться по направляющей, и их размыкание после того, как вновь устанавливаемый модуль займет свое место и будет надежно зафиксирован в субблоке. Этим требованиям отвечает совмещенный с микропереключателем экстрактор фирмы Schroff, показанный на рис. 10. Экстрактор разработан для вычислительных устройств с интерфейсом CompactPCI, таких, например, как промышленные компьютеры серии MIC-3000 фирмы Advantech, однако может быть использован в любом изделии, выполненном в конструктиве Евромеханика 3U или 6U.

Замыкание контактов микропереключателя может служить сигналом для инициализации модуля, а размыкание — для перевода в отключенное «безопасное» состояние. Перевод модуля в безопасное состояние (например, за счет установки в третье состояние выходов его шинных формирователей) во время его отключения/подключения к системной магистрали может предотвратить искажение передаваемых по ней сигналов. Разумеется, последнее возможно далеко не всегда и определяется характером неисправности модуля.

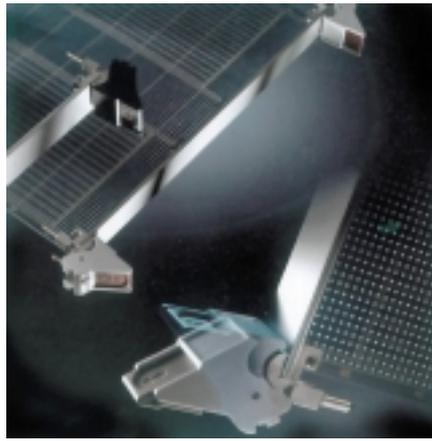


Рис. 10. Экстрактор

Для операционной системы (или прикладной программы) срабатывание микропереключателя в любом из модулей может служить сигналом о необходимости произвести опрос программно доступных регистров состояния модулей с целью уточнения списка системных ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование описанных технических решений может обеспечить успешное прохождение испытаний и последующую долгую продуктивную

жизнь системе с «горячей» заменой только при условии тщательной проработки конструкции и выполнения рекомендаций изготовителей комплектующих изделий. В частности, особого внимания требует организация защитного заземления электротехнических корпусов. Также не следует пренебрегать требованиями, изложенными на первых страницах руководств по эксплуатации: хранить модули в антистатической упаковке, не прикасаться пальцами к элементам, печатным проводникам и контактам разъемов.

К сожалению, в рамках данной статьи не представляется возможным более подробно рассмотреть программные аспекты «горячей» замены. Дополнительную информацию по рассматриваемому вопросу можно найти, например, в стандарте CompactPCI Hot Swap Specifications, утверждённом PICMG (PCI Industrial Computer Manufacturers Group), по адресу <http://www.picmg.com>. ●

**В. Беломытцев — сотрудник
фирмы ПРОСОФТ
Телефон: (812) 325-3790
E-mail: bel@prosoft.spb.ru**