

Некоторые вопросы разработки встраиваемых компьютерных систем

Дмитрий Гаманюк (г. Саратов)

Современные встраиваемые компьютеры должны принимать и передавать информацию через высокочастотные многоконтактные электрические соединители. Задача выбора системного соединителя является чрезвычайно ответственной.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ И ИХ ПРЕИМУЩЕСТВА В СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Цифровая техника прочно обосновалась в системах автоматического управления сложными техническими системами: сейчас считается «хорошим тоном» иметь собственный вычислитель почти на каждом агрегате. Сложный объект управления содержит несколько компьютеров с одинаковой аппаратной частью, но реализующих локальные законы управления. Такая идеология уменьшает стоимость вычислителей в общей затратной части бортового вычислительного комплекса и значительно сокращает время разработки последнего: остаётся рассчитать и скомпоновать в требуемых габаритах входные усилители, АЦП, ЦАП и выходные каскады.

В этой связи в современной электронике установился термин «встраиваемые компьютерные системы» (ВКС) – типовые, как правило, одноплатные, вычислительные модули, позволяющие реализовать требуемые законы управления.

Сегодня одноплатные компьютеры создаются на основе открытых промышленных стандартов группы COTS (Commercial Of The Shelf – готовые коммерческие продукты и технологии). Выбор одноплатной компоновки продиктован тем обстоятельством, что такие решения признаны наиболее технологичными изделиями среди встраиваемых компьютеров. Само понятие «встраиваемый» предполагает лёгкость «встраивания», то есть установки и замены, что очевидно для одноплатных вариантов.

Современные одноплатные компьютеры оснащены локальной памятью большого объёма, имеют многоядерные и энергосберегающие процессоры, снабжаются высокопроизводительными устройствами ввода – выво-

да информации и обеспечивают организацию внутрисистемных соединений за счёт поддержки существующих коммуникационных технологий.

Наибольший интерес проявляется к объектам управления, применяемым в военной и аэрокосмической отраслях, а также двойного назначения. Именно в этих приложениях традиционно предъявляются наиболее жёсткие требования к точности, надёжности, долговечности и стойкости к внешним воздействующим факторам. Поэтому вычислители для военных применений хотя и характеризуются высокой стоимостью, но интегрируют самые передовые аппаратные и программные решения.

Так, изделия ВКС британской компании Radstone Technology уже многие годы применяются в крупнейших оборонных программах стран НАТО. Это – и известная FCS (Future Combat Systems – перспективные боевые системы), и JTRS (объединённая система тактической радиосвязи). ВКС Radstone установлены на основном боевом танке армии США M1A2 Abrams, используются в современных пусковых установках, корабельных ракетных комплексах, торпедах и радиолокационных станциях Firefinder. Подводные крейсеры проекта Trident, морские истребители Boeing F/A-18E/F Super Hornet, истребители Eurofighter Typhoon, F-18, F-35 Joint Strike Fighter, боевые вертолеты NH90, патрульные самолеты Nimrod MR4A, космические корабли Space Shuttle и МКС также имеют спецвычислители на основе одноплатных компьютеров.

В развитии рынка встраиваемых компьютерных систем прослеживается мировая тенденция к использованию стандартов семейства VME (VME32, VME64, VME64x, VME2eSST, VXS и VPX), которые наиболее полно удовлетворяют таким требованиям военных заказчиков, как полная совместимость с изде-

лиями предыдущего поколения, возможность поставки комплектующих на протяжении жизненного цикла этих систем, возможность дальнейшей модернизации, организация работы CALS-технологий по поддержке изделий в течение всего времени их работы.

Актуальным для военных применений является и простота обслуживания персоналом низкой квалификации, и защита от неправильного использования.

Альтернативой семейству VME являются системы CompactPCI. Данная реализация ВКС опирается на широко используемые, а потому сравнительно недорогие комплектующие настольных компьютеров. За счёт масштабной унификации одни и те же составляющие компьютера используются как в «бытовых» целях, так и на транспорте, в медицине, оборонной и аэрокосмической областях.

Встраиваемые компьютеры для полной реализации своих преимуществ должны принимать и передавать информацию через высокочастотные многоконтактные электрические соединители. Задача выбора системного соединителя является чрезвычайно ответственной: он должен быть высоконадёжным, компактным, обеспечивать малые величины ёмкостей между контактами, обладать низким значением наводимой э.д.с. самоиндукции, допускать большое число вставок/удалений модулей (сочленений – расчленений), иметь защиту от ошибочного включения, обеспечивать возможность развития спецификации и т.д. Именно качество выбранного системного разъёма определило возможность создания системы с удвоенным, по сравнению с настольным вариантом компьютера, количеством слотов расширения.

ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ К ОБРАЗЦАМ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Российское вооружение и военная техника (ВВТ) востребованы на мировом рынке, что во многом определяется сложившейся ещё в советское время системой контроля над вооружением на всех

стадиях его создания – от разработки до утилизации. Любой образец ВВТ и его комплектующие проходят несколько этапов создания и проработки технической документации, с оценкой принимаемых инженерных решений, агрегатных испытаний и испытаний ВВТ в целом.

Работа этой системы поддерживается комплексом государственных стандартов, определяющих уровни внешних воздействующих факторов (ВВФ), к которым должен быть устойчив разрабатываемый образец ВВТ. Эффективность стандартизации во многом определяется разделением аппаратуры, использующейся в ВВТ, на группы по области использования: морская, авиационная, сухопутная и космическая. Каждая группа, в свою очередь, подразделяется на более мелкие градации, в зависимости от места размещения аппаратуры на объекте.

Всё это позволяет с высокой степенью достоверности определять комплекс вредных воздействий на военные изделия в реальных условиях и проводить их адаптацию к ВВФ на максимально ранних стадиях создания.

Значения параметров ВВФ, закладываемые в нормативную документацию, являются конфиденциальной информацией. Однако эти параметры, с достаточным уровнем достоверности, могут быть оценены по материалам открытой печати [1]. Так, в таблицах 1 и 2 приводятся наиболее жёсткие уровни воздействия механических и климатических факторов соответственно. Видно, в каких непростых условиях должна работать аппаратура ВВТ для обеспечения успеха российского оружия на мировом рынке. Кроме того, в реальных условиях эксплуатации и боевого применения эти факторы действуют не по отдельности, а одновременно. Поэтому существующие методики испытаний предполагают проверку безотказности аппаратуры при комплексном воздействии ВВФ. Аппаратура при этом должна сохранять работоспособность во время и после воздействий. Все эти условия, несомненно, касаются и вычислительных модулей, в частности ВКС.

Роль электрических соединителей в обеспечении нормальной работы ВКС

Электрический соединитель – это электромеханическое устройство, предназначенное для коммутации электрических цепей. Через него протекают электрические токи, которые, в случае использования в ВКС, имеют, в основ-

ном, информационно-сигнальную природу. Такие сигналы характеризуются, как правило, малыми значениями величины тока, напряжения и высокой частотой. Искажение сигналов неизбежно приведёт к потере передаваемой информации. Изменение параметров высокочастотного сигнала в электрических соединителях, работающих в условиях комплексного воздействия механических и климатических ВВФ, может происходить [1, 2] из-за изменения активной и реактивной составляющих переходного сопротивления соединителя, а также электротермического износа контактирующих поверхностей и т.д.

В общем случае величина переходного сопротивления соединителя определяется выражениями [3]:

$$R_{пер} = \rho / 2r \quad (1)$$

для одноточечных контактов,

$$R_{пер} = \rho / 2rn \quad (2)$$

для многоточечных контактов,

где: ρ – удельное электрическое сопротивление контактного материала, Ом м; r – радиус контактной поверхности, м; n – число контактных поверхностей. Поэтому для соединителей ВКС необходимо наличие как можно большего числа контактных поверхностей.

При коммутации высокочастотных электрических цепей сопротивление

соединителя характеризуется переходным сопротивлением. На практике для оценки величины активной части переходного сопротивления используют следующее выражение [2]:

$$R_{пер} = c\rho \sqrt{H_B} / P_K^b, \quad (3)$$

где: c – коэффициент, определяемый чистотой и состоянием поверхности. При высоте микронеровностей ($b_H = 10...20$ мкм) $c = 2$; при достаточно чисто обработанной поверхности ($b_H = 3...0,8$ мкм) $c = 1$; H_B – поверхностная твердость по Бринеллю; P_K – усилие контактного нажатия; b – показатель, определяемый характером деформации контактной пары, вида и формы контактных площадок (при контактировании по плоскости $b = 2$).

Видно, что для минимизации переходного сопротивления необходимо увеличивать силу контактного нажатия P_K .

Согласно закону Ома, изменение сопротивления при неизменном напряжении влечёт изменение величины протекающего в проводнике тока. В свою очередь, изменение тока в проводнике вызывает явление самоиндукции, э.д.с. которой определяется [4] как:

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (4)$$

где: ε – э.д.с. самоиндукции; L – коэффициент самоиндукции (зависит от фор-

Таблица 1. Механические внешние воздействующие факторы

Объекты и условия эксплуатации	Типичные значения механических нагрузок	
	вибрация	удары, g
Боевое применение		
Танки и БМП	20...2000 Гц, амплитуда 0, 025 мм	До 200
Управляемые ракеты	30...5000 Гц, ускорение до 30 g	Нет данных
Стационарная аппаратура	10...55 Гц, ускорение 2 g	До 50
Переносная аппаратура	10...2000 Гц, ускорение 10 g	До 50
Скоростные суда, самолёты и вертолёты	10...2000 Гц, ускорение 20 g	До 50
Взрывы снарядов	-	До 200
Транспортировка		
Автомобильный транспорт	0...15 Гц, амплитуда – несколько десятков мм	Нет данных
Железнодорожный транспорт	2...3 Гц, амплитуда 1,9 мм	До 50
Воздушный транспорт	5...150 Гц, амплитуда до 0, 075 мм	До 50

Таблица 2. Климатические внешние воздействующие факторы

Воздействующие факторы	Группы аппаратуры			
	наземная стационарная	наземная подвижная	морская надводная	самолётная и ракетная
Температура, °С:				
повышенная	+50...125	+80...125	+70...200	+100...350
пониженная	-60...-40	-80...-60	-60...-40	-65...-60
термоудара	-60...125	-60...125	-60...200	-65...350
Относительная влажность, %	93	98	100	98
Атмосферное давление, мм рт. ст.	460	460	760	1...5
Морской туман	Требований нет		Требования есть	
Солнечная радиация, 2 кал/см ² мин	Требований нет		Требования есть	
Грибковая плесень	Требований нет	Требования есть	Требования есть	Требований есть
Пыль и песок	Требований нет		Требований нет	
Агрессивные газы	Требования есть			Требований нет



Рис. 1. Подгорание электрических контактов в стандартном соединителе ВКС

мы, размеров проводника и среды); $\Delta i/\Delta t$ – скорость изменения тока.

Выражения (2) и (3) показывают, что нестабильность переходного сопротивления $R_{пер}$ возможна вследствие изменения усилия контактного нажатия и числа контактирующих поверхностей. Появляющаяся в результате нестабильности э.д.с. суммируется с основным передаваемым сигналом, что приведёт к искажению последнего. Таким образом, для обеспечения качества передачи сигналов ВКС важно обеспечить постоянство переходного сопротивления коммутирующих устройств при заданных условиях эксплуатации.

Электротермический износ контактирующих поверхностей происходит, в том числе, по причине электрического пробоя, возникающего в воздушных зазорах между контактирующими поверхностями соединителя вследствие ударов и вибраций. В

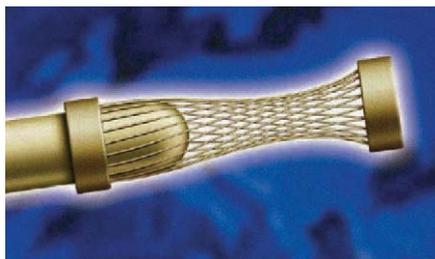


Рис. 2. Гиперboloидный контакт

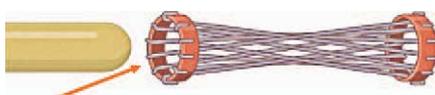


Рис. 3. Конструкция гиперboloидного гнезда

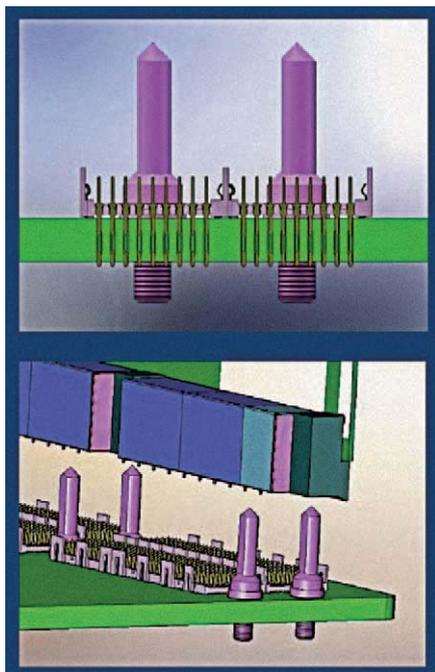


Рис. 4. Принципиальная схема гиперboloидного соединителя для ВКС

результате такого процесса происходит обгорание контактирующих поверхностей. На рисунке 1 показаны нежелательные результаты эксплуатации блока формата CompactPCI со штатным штырьковым разъёмом. Очевидно, такой обгоревший контакт будет искажать сигналы и вносить помехи в работу вычислителя.

Стабильность усилия контактного нажатия и площади контактирующей поверхности позволяют также минимизировать вероятность возникновения воздушных зазоров между проводящими частями соединителя.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Электрические соединители с конструкцией контактов в виде гиперboloидной проволочной корзины (см. рис. 2) обладают рядом преимуществ по сравнению с классическими соединителями

телями, особенно в условиях воздействия критических значений ВВФ [5]. Технология организации электрического контакта получила название гиперboloидной, а гнездо соединителя, соответственно, гиперboloидного гнезда, поскольку его проволоки изогнуты в форме гиперболы.

Уникальность конструкции таких соединителей обеспечивается гнездом, выполненным в виде корзины, состоящей из натянутых упругих проволок. Проволоки изготавливаются из сплава, обладающего требуемыми значениями жёсткости и упругости, и закрепляются в двух кольцах, образуя, таким образом, упругий цилиндр (см. рис. 3), а также формируют внутреннюю контактирующую поверхность гнезда, имеющую переменное сечение. У двух оснований гнезда – в местах крепления проволок – сечение контактирующей поверхности максимальное. В середине корзины – минимальное, причём оно даже меньше диаметра штыря соединителя. При сочленении контактной пары проволоки раздвигаются, деформируются и за счёт упругости плотно охватывают штырь, образуя контактную поверхность со значительным усилием нажатия.

Гиперboloидный разъём, таким образом, имеет множество точек контактирования между упругой корзиной и штырём; эти точки определяются касательными поверхностями упругих проволок с поверхностью штыря. Теоретически касательная между двумя соприкасающимися цилиндрическими поверхностями (проволокой и штырём) представляет собой прямую линию. На практике, ввиду шероховатости поверхностей, контактные площадки между корзиной и штырём имеют форму прямоугольников, длина которых ограничена длиной корзины, а ширина определяется чистотой обработки и состоянием поверхности в зоне контакта.

С течением времени и ростом износа за счёт числа сочленений – расчленений конкретного соединителя площадь контактной поверхности увеличивается, что приводит к снижению переходного сопротивления. Наличие множества точек контактирования, как видно из выражения (2), снижает величину сопротивления стягивания в количестве раз, определяемое числом упругих проволок корзины.

Гиперboloидный соединитель обеспечивает значительно большее по сравнению с классическими штырьковыми контактами усилие контактного нажа-

тия. Это позволяет уменьшать величину активной составляющей переходного сопротивления при коммутации высокочастотных цепей и избегать возникновения воздушных зазоров при механических воздействиях. Кроме того, показатель степени, в которую необходимо возводить P_k (см. (3)), для соединителей, выполненных по гиперболоидной технологии, будет равен максимально возможному значению – 2, поскольку, как было отмечено выше, контактные площадки гиперболоидных соединителей представляют собой множество плоскостей, по форме приближающихся к прямоугольникам.

В силу достаточно высокого усилия контактного нажатия и обеспечения высокой поверхности контактирования соединения гиперболоидные соединители обладают малым значением переходного сопротивления, что важно при использовании в ВКС. Кроме того, конструкция гиперболоидного гнезда обеспечивает постоянство переходного сопротивления.

При минимальном изменении сопротивления величина тока относительно постоянна и э.д.с. самоиндукции стремится к нулю (см. (4)). Практическое отсутствие в соединителях явления самоиндукции означает отсутствие в них паразитных сигналов, помех и шумов. Таким образом, конструкция гиперболоидных контактов удовлетворяет жёстким требованиям к соединителям, предъявляемым в космических и авиационных системах, объектах техники и вооружения всех родов войск, транспортной, индустриальной и медицинской

техники. Особенности контактной системы и преимущества, которые обеспечивает технология гиперболоидных соединителей, представлены в [6].

Используя указанные преимущества, компания Hypertronics разработала и представила на рынке соединители для ВКС, состоящих из множества миниатюрных гиперболоидных контактов (см. рис. 4). Это – изделия серии VITA; в настоящее время NASA завершает их сертификацию. Изделие KVPX данной серии обладает низким усилием сочленения – расчленения, что чрезвычайно важно для ВКС, и в то же время обеспечивает достаточное усилие контактного нажатия. Изделие позволяет собирать соединители различных конфигураций, выдерживает сертификационные пороги ВВФ и адаптируется к аппаратуре ВКС. Внешний вид соединителя представлен на рисунке 5.

Цена выхода из строя компонентов в аэрокосмической сфере слишком высока, поэтому преимущества высоконадёжных соединителей такого класса оценили проектировщики аэрокосмической техники, где жизненно необходимо обеспечить высокую надёжность коммутаций в экстремальных условиях воздействия механических и климатических факторов.

Выводы

Встраиваемые компьютерные системы являются развитием технологии разработки и применения вычислительных средств. Такие преимущества ВКС, как аппаратная унификация, высокая производительность и низкая се-

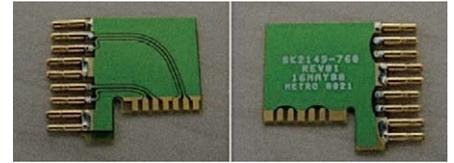


Рис. 5. Внешний вид изделия KVPX серии VITA

бестоимость, делают их привлекательными и на рынках военно-аэрокосмической аппаратуры. Однако жёсткие условия применения и высокие требования к точности и надёжности объективно накладывают ограничения на применение общегражданских комплектующих и электрических соединителей в частности.

Существующие и перспективные технологии коммутирующих устройств, положительно зарекомендовавших себя в критичных областях применения, способствуют раскрытию потенциала ВКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов А.К., Савченко В.С. Электрические разъёмные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. Энергия, 1967.
2. Левин А.П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры (расчет и конструирование). Советское радио, 1972.
3. Ляровский В.Ф., Мурадян О.Б. Электрические соединители: справочник. Радио и связь, 1988.
4. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Т. 1–3. Наука, 1985.
5. www.hypertronics.com.
6. Гаманюк Д.Н. Технология гиперболоидных контактов в технике. Современная электроника. 2008. № 9.