

**СЕТЕВЫЕ ВСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ****Н.А. Захаров, В.И. Клепиков, Д.С. Подхватилин (НПП «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ»)**

*Рассмотрены особенности сетевых встраиваемых систем управления, электронные модули которых интегрированы с узлами и агрегатами управляемого объекта. Перечислены способы обеспечения отказоустойчивости систем. Показана перспективность применения технологии ИТСС при изготовлении электронных модулей. Отмечены преимущества применения сетевых протоколов с обменом по расписанию. Представлена аппаратно-программная платформа Дозор для построения распределенных встраиваемых систем управления, удовлетворяющая современным требованиям.*

*Ключевые слова: Industry 4.0, ИТСС, встраиваемые системы, распределенные системы управления, диагностика, резервирование, супервизор конфигурации, синхронно-временной протокол.*

**Введение**

Технологии четвертой промышленной революции (Industry 4.0) активно используют децентрализацию выполняемых задач и функций. Соответственно, возрастает роль сетевых встраиваемых систем. По мере развития компонентной базы встраиваемая электроника появляется во все более мелких элементах технологических объектов управления — в датчиках, электро- и гидроприводах, реле и т. д. Интерфейсом таких элементов становятся не физические сигналы, а цифровые каналы информационного обмена. Встроенная электроника не только преобразует сигналы из последовательного протокола в физические и обратно, но и выполняет различные локальные функции управления, контроля, диагностики, защиты и т. д. При этом при построении системы управления сложным динамическим объектом, таким как газотурбинный двигатель, система становится распределенной в том смысле, что различные функции реализуются на пространственно разнесенных измерительных, исполнительных и вычислительных элементах. Наряду с очевидными преимуществами таких систем — уменьшение кабельных и разъемных соединений, снижение массы и габаритов систем, повышение технологичности эксплуатации, ремонта и модернизации и т. д. — при их проектировании и отработке возникают новые вопросы, которые в централизованных моноблочных системах решаются уже ставшими традиционными методами. К таким вопросам относятся, прежде всего, обеспечение жесткой синхронизации работы отдельных элементов по времени и по данным, обеспечение реконфигураций системы при отказах и сбоях, необходимость применения инструментальных средств отработки сетевых систем и др. [1]. На первое место выдвигаются вопросы совершенствования методик и инструментов проектирования системного уровня, вопросы надежного и безопасного проектирования встраиваемых систем для ответственных применений, развитие вычислительных архитектур в направлениях повышения параллелизма, гибкости, энергоэффективности вычислений.

**Отказоустойчивость системы управления**

К современным системам управления предъявляется требование отказоустойчивости. Оно особенно актуально для систем управления сложными

дорогостоящими опасными объектами, такими как газотурбинные установки, предприятия химической и нефтехимической отрасли и т. д. Распространенным способом обеспечения отказоустойчивости является применение резервирования, в том числе тройного модульного резервирования (triple modular redundancy — TMR). Его прямолинейное применение приводит к значительному усложнению системы за счет увеличения числа узлов и сетей [2]. В [2] вводится понятие интегрированной архитектуры. Архитектура называется интегрированной, если один ее узел может поддерживать несколько разделов, которые могут содержать различные функции, а физический провод может содержать множество различных виртуальных каналов связи. Уменьшение числа узлов и сетей в результате интеграции приводит к повышению надежности обслуживания и снижению его стоимости. Однако повышенная сложность, вызванная интеграцией, требует применения соответствующих архитектурных решений, поддерживающих строгую инкапсуляцию различных функций, реализуемых в одном узле. Для возможности различать отказы аппаратных компонентов и сбой программного обеспечения в узле нужна реализация диагностических функций в системе.

Интегрированная система может быть скомпонована из почти автономных распределенных прикладных подсистем. Каждая подсистема состоит из набора распределенных задач, которые распределяются по разделам внутри выбранных узлов интегрированной архитектуры. Каждая задача имеет доступ к соответствующим датчикам либо непосредственно через каналы ввода/вывода, либо через виртуальный канал связи.

Среда исполнения и коммуникации каждой подсистемы должны контролироваться предусмотренной в архитектуре диагностической службой. Каждый сбой в подсистеме должен быть обнаружен до того, как он успеет оказать влияние на любую другую подсистему. Отказоустойчивость критических функций может быть реализована путем размещения реплик соответствующих подсистем на различных узлах и локализации сбоя одной задачи по технологии тройного модульного резервирования с голосованием.

Альтернативой применению резервированных реплик подсистем является метод супервизоров конфигурации [3, 4]. Под конфигурацией понимается совокупность компонентов системы, обеспечиваю-

щих выполнение определенной функции. При этом на современном уровне избыточности распределенных систем управления, в том числе встраиваемых выполнение одной и той же функции может быть реализовано несколькими конфигурациями, не копирующими друг друга. Например, некоторые компоненты системы могут входить в несколько конфигураций одновременно, часть показаний датчиков может быть заменена результатами расчетов по встроенной математической модели. Временные, вычислительные и коммуникационные ресурсы системы позволяют организовать параллельную работу нескольких конфигураций. Результаты параллельно работающих конфигураций проверяются на корректность специальными программными и аппаратными модулями, называемыми супервизорами конфигурации. Супервизор конфигурации может либо выключить из дальнейшей работы конфигурацию, выдающую недостоверные решения, либо вычислить усредненный результат расчетов, выданных несколькими конфигурациями, либо допустить результаты нескольких конфигураций для работы на общий для них исполнительный элемент системы. Определение достоверности конфигурации на основе информации об исправности входящих в нее компонентов дополняется оценками достоверности работы конфигураций, формируемыми на основе анализа выходных данных конфигураций. Полученные оценки достоверности работы конфигураций используются в качестве обратной связи для получения оценок исправности образующих конфигурации компонентов. Подробно формализованная постановка задачи управления конфигурацией и алгоритмы ее решения приведены в [3, 4].

#### Технология LTCC

Следствием размещения компонентов встраиваемых систем в узлах и агрегатах технологического оборудования являются жесткие условия их эксплуатации, в частности, высокая температура окружающей среды. Опыт показывает, что электронные модули, изготовленные на текстолитовых печатных платах, часто выходят из строя по причине возникающих от нагрева микротрещин, а срок их службы намного меньше, чем при обычных для средств автоматизации условиях окружающей среды.

Современной альтернативой печатному монтажу на текстолите является технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (Low Temperature Cofired Ceramic -LTCC) [5–7]. Рассмотрим преимущества изготавливаемых по данной технологии многослойных керамических подложек:

- линейный коэффициент температурного расширения LTCC близок к коэффициенту расширения кремния и арсенида галлия. Это позволяет монтировать микросхемы в бескорпусном исполнении непосредственно на плату LTCC;

- высокая надежность при термоциклировании. Рабочие температуры подложки достигают 350 °С, ра-

бочая температура изделия ограничивается характеристиками полупроводниковых элементов;

- высокая теплопроводность материала по сравнению с текстолитом, что облегчает отвод тепла, выделяемого при работе устройства. Для облегчения охлаждения возможно введение в 3D структуру LTCC металлических теплопроводящих элементов;

- возможность изготовления и интеграции в подложку внутренних пассивных компонентов, что облегчает миниатюризацию изделия и упрощает логистику при производстве;

- минимальные потери сигнала на частотах до 60 ГГц. Для изделий на текстолитовых платах рабочая частота ограничена величиной 2 ГГц. Высокая частота требуется для реализации устройств, работающих в сетях 5G [8]. Технология 5G в ближайшем будущем станет основой сетевой инфраструктуры объектов Industry 4.0 [9].

#### Платформа Дозор для встраиваемых сетевых систем управления жесткого реального времени

В ходе многолетних работ Научно-производственного подразделения «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ» (Кизлярский электромеханический завод) накоплен набор решений по проектированию и отработке встраиваемых распределенных систем управления жесткого реального времени. В результате сформирована платформа, включающая набор взаимосвязанных конструктивных, схемотехнических, программных и коммуникационных решений. Данный платформенный подход с успехом использован при построении ряда авиационных и промышленных встраиваемых систем управления.

#### Аппаратные решения платформы Дозор

Распределенные системы управления НПП «Дозор» строятся на основе объединенных в сеть управляющих контроллеров со значительными (относительно масштабов системы) ресурсами и небольших унифицированных встраиваемых модулей. Модули обеспечивают логическое управление, одно- и двухканальное регулирование в замкнутом контуре. Путем загрузки требуемого прикладного программного обеспечения они настраиваются на выполнение функций управления, регулирования и контроля соответствующими узлами, агрегатами и подсистемами.

Модуль в корпусе из алюминиевого сплава имеет защиту от молнии и статического электричества, при необходимости он может помещаться в дополнительный корпус с необходимой степенью взрывозащиты и защиты от пыли и влаги. Электроника модуля может быть размещена непосредственно в корпусе агрегата управляемого объекта. Для уменьшения габаритов контроллера используются гибко-жесткие платы и микросборки на бескорпусных элементах и на подложках LTCC. Использование технологии LTCC позволяет повысить надежность модуля и увеличить его ресурс при эксплуатации в условиях высокой температуры.

Решение задачи обеспечения надежной работы модуля в зоне повышенной температуры окружающей среды достигается конструктивными и схемотехническими решениями. В модуле используются импульсные и ключевые режимы работы всех высоконагруженных элементов — вторичных источников питания, схем управления клапанами и электрогидравлическими преобразователями. Таким образом сведено к минимуму внутреннее тепловыделение, за счет чего внутренний перегрев блока  $\leq 15$  °С при температуре окружающего воздуха 100 °С. То есть внутренняя температура блока  $\leq 115$  °С, в то время как применяемая элементная база работоспособна при температуре  $< 125$  °С. Дополнительно конструкцией предусмотрен контакт теплонагруженных элементов с корпусом блока через теплопроводящий материал.

Модули работают в общей сетевой структуре жесткого реального времени на основе синхронно-временного протокола (СВП) и выполняют функции в соответствии с загруженным ПМО. При этом часть контроллеров может находиться в горячем резерве. Модули имеют встроенные средства 100%-го обнаружения собственных отказов, а также отказов подключенных к ним измерительных, исполнительных и коммуникационных каналов. Контроллер, находящийся в горячем резерве, постоянно контролирует наличие и содержание информационного обмена по каналу СВП и автоматически вступает в работу через 1...2 мс после обнаружения отказа основного контроллера. Вычислительные и коммуникационные ресурсы представленной платформы позволяют организовать и более сложные схемы, а также алгоритмы обеспечения отказоустойчивости путем рассмотренного выше управления конфигурациями.

В качестве примера рассмотрим модуль управления гидроприводом. Для реализации функций управления контроллер может обрабатывать сигналы от следующих датчиков:

- два датчика давления с выходным сигналом в диапазоне 0...5 В;
- два индуктивных датчика частоты вращения;
- четыре датчика положения типа LVDT (Linear Variable Differential Transformer, дифференциальный трансформатор для измерения линейных перемещений);
- две термопары (ХА);
- два терморезистора;
- сигнал 4 ...20 мА;
- четыре дискретных сигнала.

Выходные каналы: по четыре аналоговых и дискретных выхода.

Вычислительным ядром встраиваемого модуля является 32-разрядный микроконтроллер 1986 ВЕ1 Т компании АО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград).

#### **Протокол сетевого обмена**

Реализация распределенных сетевых встраиваемых систем часто требует учета специфических для них требований, например, для таких систем, как САУ га-

*Неудачи и отказы - важнейшая составляющая успеха. На ошибках мы учимся, приближаясь к успеху.*  
Адам Джексон

зотурбинной установки, требуется реализация сетевой пространственно распределенной структуры, работающей в жестком реальном времени с циклом обмена данными и управляющими командами порядка 0,5 мс. При этом необходимы минимальные и стабильные по времени задержки в передаче и получении данных по сети (джиттер), так как последовательные каналы информационного обмена оказываются включенными в замкнутые контуры управления и регулирования [10]. Данным требованиям в полной мере удовлетворяют системы, построенные с использованием синхронно-временного протокола [10], основанного на спецификации ТТР — Time Triggered Protocol [11].

Система на основе СВП строится из сетевых узлов, включенных по схеме шина или звезда. В качестве узла используется локальный управляющий микропроцессорный модуль, интеллектуальный датчик, вычислительное устройство и т. п. В его состав входит коммуникационный контроллер СВП. Дублированная СВП шина объединяет узлы в кластер. СВП шина вместе с коммуникационными контроллерами узлов образуют в кластере коммуникационную систему, которая функционирует автономно на основе заранее определенного периодического расписания. Коммуникационная подсистема читает сообщения (пакеты данных) сетевого коммуникационного интерфейса узла в определенные расписанием моменты времени и отправляет их в другие узлы, обновляя записанную туда ранее информацию. Копии расписания хранятся в каждом узле.

СВП обеспечивает строго синхронный обмен данными, что невозможно в протоколах, основанных на дисциплине доступа по событию, таких как CAN или Ethernet, так как в них для разрешения конфликтов применяются различные виды арбитража, в результате чего могут возникать задержки в передаче сообщений и цикл оказывается плавающим.

В СВП реализована концепция парирования одиночных сбоев и отказов, заключающаяся в том, что системы связи на его основе содержат достаточную избыточность, чтобы одиночный сбой или отказ никаким образом не отразились на поведении системы: ни с точки зрения функциональности, ни во временных соотношениях. Концепция парирования одиночных сбоев основана на том, что вероятность одновременного проявления отказов в двух различных компонентах ничтожно мала. Контроллер СВП реализован НПП «Дозор» совместно с АО «ПКК Миландр» в виде микросхемы K5600 ВГ2У.

#### **Операционная система жесткого реального времени**

В основе программного обеспечения платформы Дозор лежит операционная система uOS, обеспечивающая работу в жестком реальном времени. Систе-

ма занимает исключительно малые вычислительные ресурсы и обеспечивает быстрое переключение задач. Основными преимуществами uOS являются:

- переносимость: uOS портирована на большое число архитектур процессоров: AVR, i386, MSP430, ARM, MIPS32, в частности, на микроконтроллеры российских фирм Миландр и Элвис);
- модульность: базовый модуль ядра занимает около 2 килобайт ПЗУ и 200 байт ОЗУ, набор применяемых модулей конфигурируется под конкретную задачу;
- расширяемость: состав модулей системы очень просто может быть расширен пользователем системы;
- вытесняющая многозадачность;
- высокая готовность: малое время инициализации системы (единицы миллисекунд), малое время задержки обработки прерывания и малые накладные расходы на переключение задач;

- внутренняя простота: в uOS используется концепция обобщённого мьютекса как единого примитива синхронизации, который работает как мьютекс или семафор с возможностью передачи сигналов;

- поддержка сетевого стека протоколов TCP/IP v4. uOS является системой с открытыми исходными кодами, которые могут быть получены с сайта проекта (<http://code.google.com/p/uos-embedded/>). Для сборки проектов под uOS используются кросс-платформенные свободные средства разработки, основанные на GCC и Eclipse.

uOS удовлетворяет самым жестким требованиям (категория А) к программному обеспечению, в том числе для бортовой аппаратуры и систем. Система поставляется с пакетом сертификационных документов по стандартам ГОСТ 51904 и КТ-178 В.

#### Заключение

Развитие компонентной базы и сетевых технологий привело к глубокой интеграции электронных модулей с узлами и агрегатами технологических объектов управления. Модули связаны друг с другом и центральным управляющим вычислительным устройством через цифровые интерфейсы. Вычислительные и коммуникационные ресурсы современных распределенных сетевых систем управления позволяют реализовывать различные схемы и алгоритмы обеспечения их отказоустойчивости, что значительно повышает безопасность эксплуатации объекта управления. Электронные модули встраиваемых систем часто эксплуатируются в жестких условиях, в том числе при высокой температуре. Это требует как разработки стойкой к воздействию высокой температуры компо-

*Никогда не принимайте отказ в качестве окончательного ответа!*

Ричард Брэнсон

нентной базы, так и перехода от широко распространенных печатных плат на текстолите к керамическим LTCC подложкам. Для реализации регулирования в распределенной встраиваемой системе требуется сетевая инфраструктура, поддерживающая обмен данными с фиксированным временем цикла. Представлен протокол обмена, удовлетворяющий указанным требованиям. Для построения вычислительных модулей используется операционная система жесткого реального времени с открытым кодом.

#### Список литературы

1. Клепиков В.И. Отказоустойчивость распределенных систем управления. М. «Золотое сечение». 2014. 392 с.
2. H. Kopetz, "An integrated architecture for dependable embedded systems," Proceedings of the 23rd IEEE International Symposium on Reliable Distributed Systems, 2004., Florianopolis, Brazil, 2004, pp. 160-161. doi: 10.1109/RELDIS.2004.1353016.
3. Захаров Н.А., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С. Управление избыточностью сетевых распределенных систем необслуживаемой авионики // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 3. С. 3-12.
4. Агеев А.М., Бронников А.М., Буков В.Н., Гамаюнов И.Ф. Супервизорный метод управления технических систем с избыточностью // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 72-82.
5. Кондратюк Р. LTCC – Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // Наноиндустрия. 2011. № 2 (26). С. 26-30.
6. Потапов Ю. Особенности технологии проектирования и производства LTCC модулей // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2008. № 1. С. 39-44.
7. Смирнов А.М. Особенности конструирования многослойных керамических изделий, изготавливаемых по технологии LTCC // Технологии ЭМС. 2009. № 3. С. 69-80.
8. F. Foglia Manzillo et al., "A Multilayer LTCC Solution for Integrating 5G Access Point Antenna Modules," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 7, pp. 2272-2283, July 2016. doi: 10.1109/TMTT.2016.2574313.
9. Захаров Н.А. 5G и Industry 4.0 // Автоматизация в промышленности. 2019. № 12. С. 3-6.
10. Захаров Н.А., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С. Синхронно-временной протокол для распределенных систем управления // Автоматизация в промышленности. 2013. № 2. С. 37-39.
11. TTP Communication Protocol. SAE Aerospace Standard AS-6003. 2011-02.

*Захаров Николай Анатольевич – канд. техн. наук, руководитель,*

*Клепиков Владимир Иванович – канд. техн. наук, заместитель руководителя по науке и новым технологиям,*

*Подхватилин Дмитрий Станиславович – начальник отдела*

*Научно-производственного подразделения «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ».*

*Контактный телефон (495) 640-09-47.*

*E-mail: nazakharov@npp-dozor.ru*