

# СнК "МИЛАНДР" В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Н.Захаров, В.Клепиков, Д.Подхватилин, Д.Семикин, А.Шепелев  
nazakharov@npp-dozor.ru

Распределенные системы управления (PCY) все чаще применяются в современной технике, вытесняя централизованные моноблочные системы автоматического управления (CAУ). Ключевые элементы PCY – локальные управляющие контроллеры, которые встраиваются в датчики и исполнительные устройства и объединяются в единую систему цифровыми информационными каналами. В качестве локальных контроллеров могут использоваться 32-битные системы на кристалле (СнК) 1986BE91 фирмы "Миландр". Разработанные в НПП "Дозор" модули PCY на основе отечественной элементной базы, а также микросхемы и микросборки на базе СнК 1986BE91 применяются в системах управления ответственного назначения.

Современная тенденция развития систем управления в робототехнике, автомобильной и авиационной технике – переход от централизованных моноблочных систем автоматического

управления к распределенным системам управления. Преимущества перехода к PCY заключаются, прежде всего, в снижении массогабаритных показателей систем и стоимости жизненного цикла CAУ. Функциональность

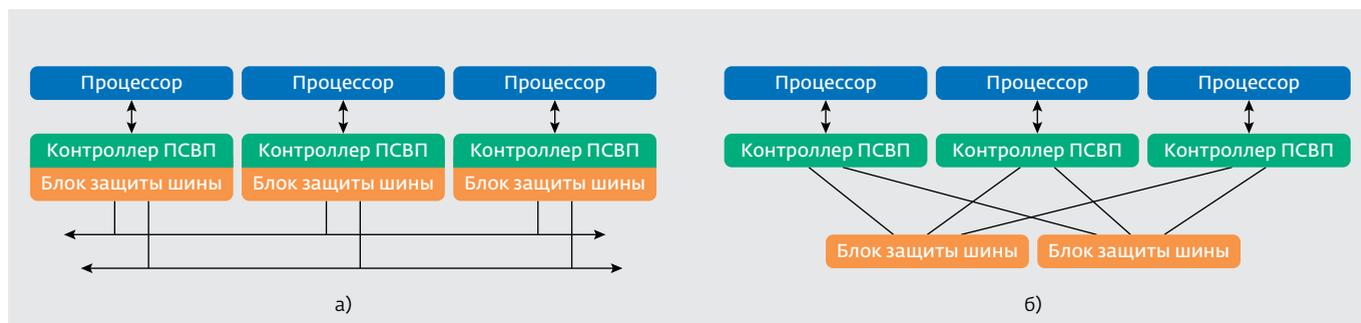


Рис.1. Архитектура системы с СВП



Рис.2. Цикл работы кластера системы с СВП

системы сосредоточивается в локальных контроллерах, а на их разработку и модификацию требуется существенно меньше времени и затрат, чем на модификацию всей централизованной системы.

PCY широко применяются в АСУ и АСУТП химических, нефтяных и газовых производств, в электроэнергетике и других отраслях промышленности. Но в большинстве случаев пространственно разнесенные компоненты выполняют лишь операции сбора, уплотнения и передачи данных в центральную

управляющую машину, которая вычисляет требуемые воздействия и отправляет их на исполнительные модули. В таких системах при управлении сложными удаленными объектами используются локальные контроллеры – по сути, это полнофункциональные системы управления, способные работать и при потере связи с центральной машиной. В качестве каналов информационного обмена в таких системах используются протоколы CAN, Profibus, Ethernet, RS-232/422/485, ARINC-429, Mil-1553 и др.

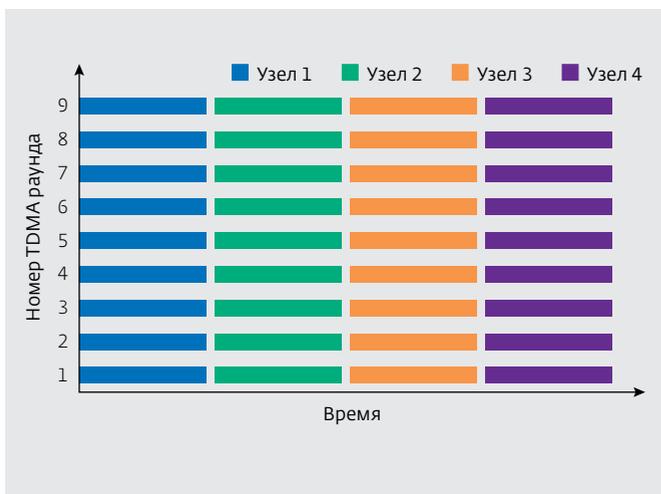


Рис.3. Пример работы системы с СВП

Однако в РСУ с элементами, объединенными последовательными интерфейсами в единую управляющую сеть, коммуникационные каналы оказываются включенными в замкнутые динамические контуры управления и регулирования. Сетевой коммуникационный канал в этом случае становится общим разделяемым ресурсом для множества сетевых узлов, требующих гарантированной передачи и доставки информации с заданной частотой следования и отсутствием "временного дребезга" (джиттера). Невыполнение этих требований может сказаться на качестве регулирования и на устойчивости динамической системы. Кроме того, в сетевой распределенной системе повышенные требования предъявляются к надежности и отказоустойчивости коммуникационного канала. Наиболее серьезная проблема здесь – отказ типа "болтун", при котором узел из-за аппаратного или программного сбоя начинает посылать в канал произвольную информацию, блокируя информационный обмен между другими узлами.

Для критичных к надежности и временным характеристикам коммуникационных каналов распределенных систем применение событийных (event-triggered) протоколов (CAN, Profibus, Ethernet и др.) неприемлемо. Как правило, в таких случаях разработчики переходят от сетевой структуры системы к организации межузловых связей типа "точка-точка", а это опять-таки влечет повышение сложности, массы системы и снижение ее надежности. Чтобы решить эти принципиальные

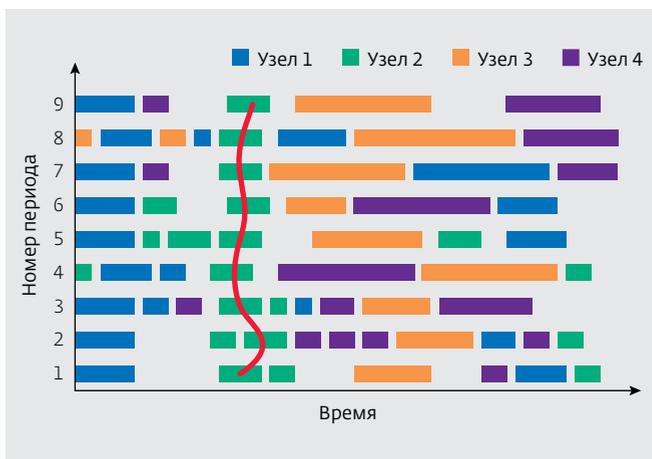


Рис.4. Пример работы системы с событийным переключением

проблемы, в последнее десятилетие активно развиваются так называемые синхронно-временные протоколы (СВП), такие как TTP (Time Triggered Protocol) и FlexRay. Так, консорциумом SAE International введен в действие международный стандарт SAE AS6003 TTP Standard.

Система на основе СВП строится из сетевых узлов, включенных по схеме шина (bus, рис.1а) или звезда (star, рис.1б). Узел состоит из процессора с памятью, подсистемы ввода-вывода, коммуникационного TTP-контроллера, операционной системы и соответствующего прикладного ПО. Все это реализуется в едином модуле, а в идеале – в едином кристалле. Дублированная TTP-шина объединяет узлы в кластер. TTP-шина и коммуникационные контроллеры узлов вместе образуют коммуникационную систему, которая функционирует автономно на основе заранее определенного периодического расписания в режиме множественного доступа с разделением по времени (TDMA, Time Division Multiple Access).

Коммуникационная подсистема читает сообщения (пакеты данных) сетевого коммуникационного интерфейса (CNI, communication network interface) узла в определенные расписанием моменты времени и отправляет их в CNI других узлов, обновляя информацию, записанную туда ранее. Моменты времени чтения и записи сообщений содержатся в едином для всех узлов кластера расписании в виде описателя сообщений (MEDL, Message Descriptor List). Копии MEDL хранятся в каждом узле. Блок защиты шины

(БЗШ) функционирует автономно и защищает каналы передачи данных кластера от временных ошибок отдельных узлов.

В топологии "шина" БЗШ входит в состав микросхемы-контроллера ППР и получает от него информацию о текущем слоте, но работает от независимого генератора синхронизации. В топологии же "звезда" центральный блок защиты шины выполняется в виде отдельного устройства и независимо реализует алгоритм синхронизации часов кластера.

СВП обеспечивает следующие основные функции:

- передачу сообщений между узлами кластера;
- соответствие заранее установленному расписанию;
- синхронизацию часов всех узлов;
- соблюдение целостности кластера;
- старт и останов узлов.

Обмен данными в кластере организован в виде циклов фиксированной длительности и структуры (рис.2). В течение цикла происходит повторяющийся обмен полным набором сообщений. Расписание обмена

хранится в коммуникационных контроллерах узлов в виде таблицы описателей сообщений. Кластер может иметь несколько режимов работы с разными расписаниями и переключаться между ними – эту возможность обеспечивает протокол. Цикл кластера разделен на слоты. За каждым узлом кластера закреплен один или несколько слотов, в которых в каждом цикле осуществляется передача пакетов.

Узлы в кластере могут быть соединены двумя и более шинами. При передаче сообщения каждый узел синхронно посылает в обе шины одинаковые сообщения. При приеме ожидается получение корректного сообщения хотя бы с одной шины.

СВП обеспечивает строго синхронный обмен данными (рис.3), что невозможно в event-triggered-протоколах, основанных на дисциплине доступа по событию. В таких протоколах для разрешения конфликтов применяются различные виды арбитража, в результате чего могут возникать задержки в передаче сообщений и цикл оказывается плавающим (волнистая линия на рис.4).

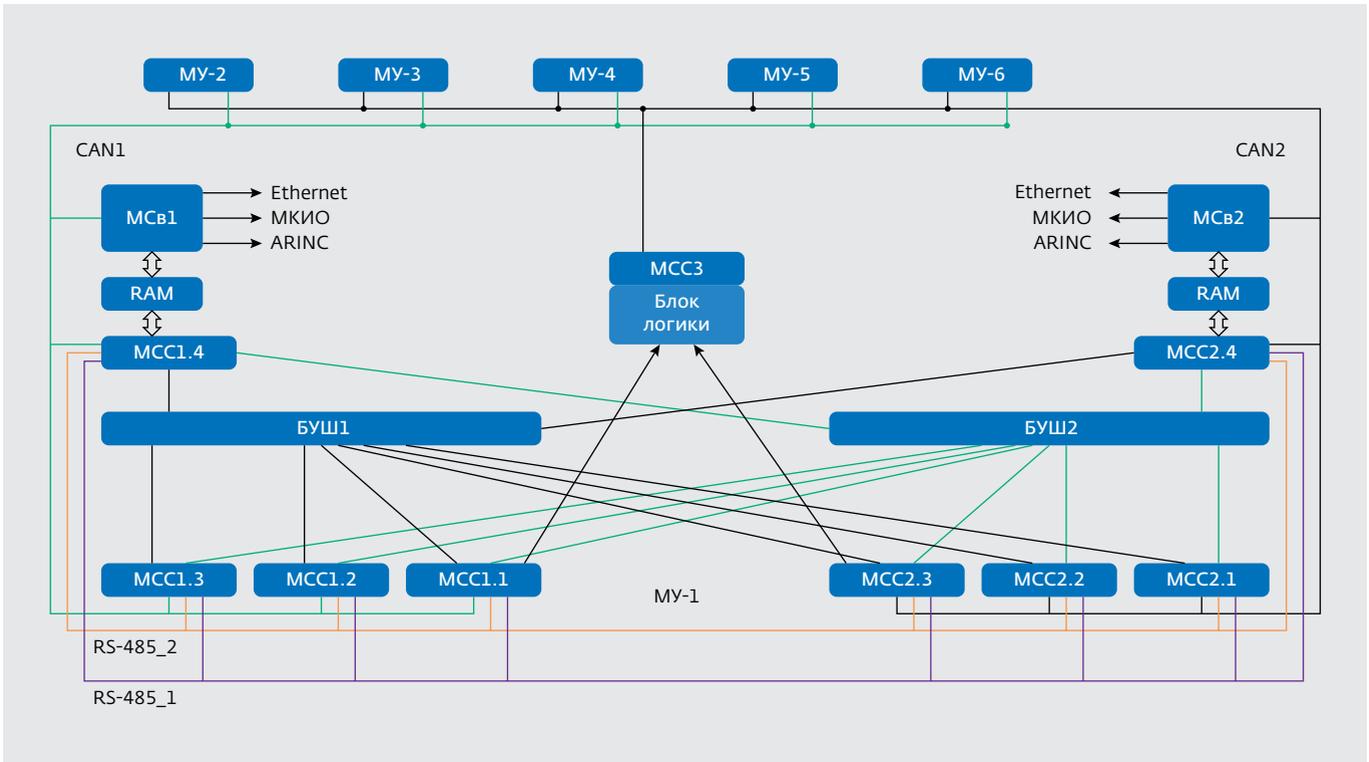


Рис.5. Структура РСУ с СВП

Работа шины FlexRay, как и TTP, основана на временном разделении сообщений. FlexRay, однако, позволяет совместить в одной шине преимущества жесткого временного разделения (TTP) с событийным управлением, свойственным шине CAN.

В НПП "Дозор" были созданы спецификации СВП для ответственных применений, требующих использования исключительно отечественной элементной базы. На основе этих спецификаций были проведены разработки

для комплексной системы управления (КСУ) самолета, систем управления общесамолетным оборудованием (СУОСО) и силовой установкой. Основной вычислительный и управляющий элемент этих систем – 32-разрядные микроконтроллеры серии 1986BE91 производства фирмы "Миландр", построенные на базе процессорного ядра ARM Cortex-M3. Периферия процессора, включающая контроллер USB-интерфейса со встроенным аналоговым приемопередатчиком, стандартные

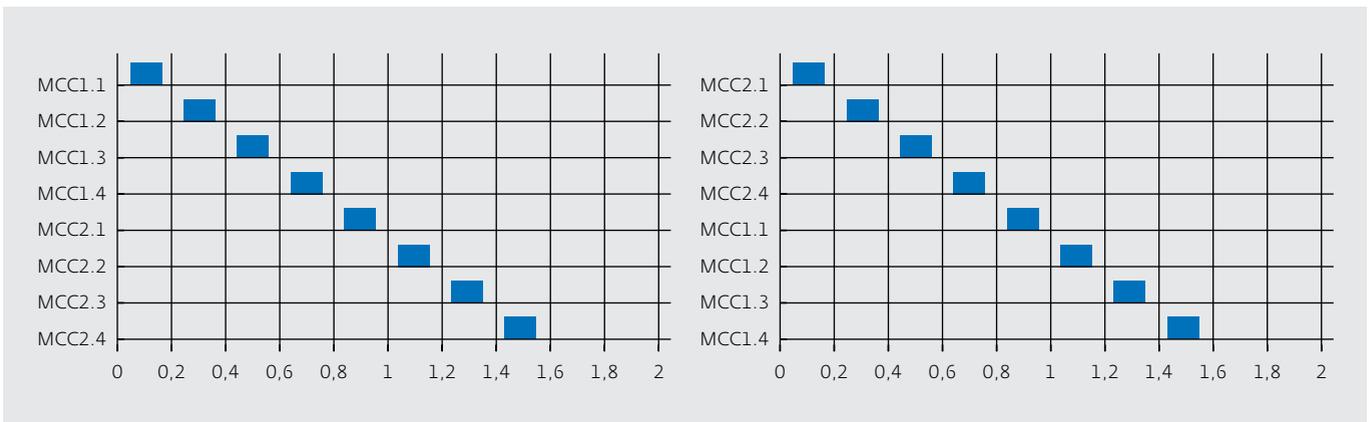


Рис.6. Циклограммы БУШ1 и БУШ2



**Рис.7.** Управляющий модуль распределенной системы управления

интерфейсы CAN, UART, SPI и I<sup>2</sup>C и контроллер внешней системной шины, позволяет работать с внешними микросхемами СОЗУ и ПЗУ, памятью NAND Flash и реализовывать эффективные каналы межпроцессорного информационного обмена в РСУ. Встроенные АЦП и ЦАП дают возможность организовать взаимодействие с датчиками и исполнительными элементами.

### РЕАЛИЗАЦИЯ РСУ С СВП НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ 1986ВЕ91

РСУ силовой установки авиационного комплекса (рис.5) имеет несколько модулей управления (МУ-1-МУ-6), связанных информационным дублированным каналом CAN. Каждый модуль управления состоит из восьми модулей следящих систем (МСС1.1-МСС2.4), объединенных СВП в единую управляющую сетевую структуру, двух модулей связи (МСв1, МСв2) и резервного модуля следящих систем МСС3. МСС получают данные с датчиков системы и выполняют расчет и выдачу управляющих воздействий. Функция модулей связи – информационный обмен с внешними системам по каналам Ethernet, ARINC-429 и Mil-1553 (МКИО). Через двухпортовое ОЗУ модули связи обмениваются информацией с МСС1.4 и МСС2.4.

На физическом уровне СВП реализован на базе стандарта RS-485, управление доступом к шине и функции защиты шины выполняются аппаратно реализованными блоками управления шиной (БУШ1 и БУШ2). БУШ последовательно предоставляют всем модулям следящих систем доступ к шине на передачу данных в соответствии с циклограммами (рис.6), при этом все остальные модули принимают информацию с каждой из шин RS-485.

Для каждой шины RS-485 процессор и его передатчик получают доступ на 1 мс. При этом передающему процессору необходимо зарезервировать не менее 75 мкс для начала передачи,



**Рис.8.** ПЛИС-реализация СВП с отладочной платой 1986ВЕ91

а принимающим процессорам – не менее 75 мкс для приема и обработки посылки, а на саму посылку отводится 850 мкс. При частоте работы канала RS-485 2,0 МГц за 850 мкс может быть передано 1700 бит информации. Длина байта в протоколе СВП составляет 10 бит (8 информационных + бит старта или стопа + бит четности). Таким образом, каждый модуль за 850 мкс может передать 170 байт информации. Интервалы времени с 8 до 9 мс и с 9 до 10 мс зарезервированы и могут рассматриваться как дополнительное время для обработки принятых сообщений.

Резервный модуль МСС3 также реализован на СнК 1986ВЕ91. Изначально он обесточен и вступает в работу при отказе модулей МС1.3 и МСС2.3. "Холодный" резерв позволяет избежать выхода модуля из строя при неблагоприятных обстоятельствах. Программное обеспечение процессора резервного модуля хранится во внешнем ПЗУ 1645РТ2, рассчитанном на жесткие условия эксплуатации, что повышает надежность устройства по сравнению с хранящим ПО во флеш-памяти.



Рис.9. Микросхема K5600BG2U

В системе использованы следующие микросхемы производства ЗАО "ПКК "Миландр": модули следящих систем - 1986BE91, модули связи - 1986BE1, двухпортовое ОЗУ - 1645PK1, однократно программируемое ПЗУ - 1645PT2. Конструктивно модули распределенной системы выполнены в алюминиевых корпусах с жидкостным охлаждением (рис.7).

ПО РСУ основано на операционной системе uOS. Для его отладки был создан комплекс инструментального ПО, позволяющего выполнять в реальном времени мониторинг информационных потоков по всем каналам обмена.

В 2011 году специализированные модули производства НПП "Дозор" успешно прошли испытания на молниестойкость, электромагнитную совместимость и на устойчивость к воздействию спецфакторов. Ведется совместная разработка микросхемы-аналога контроллера 1986BE91 со встроенным однократно программируемым ПЗУ и встроенным контроллером СВП.

**МИКРОСХЕМЫ И МИКРОСБОРКИ НА ОСНОВЕ СнК 1986BE91**

В НПП "Дозор" реализованы варианты дублированного и троированного СВП на ПЛИС фирм Actel и Xilinx (рис.8) для применения в различных авиационных системах управления. При использовании несогласованной экранированной витой пары был осуществлен обмен информацией без ошибок: при длине

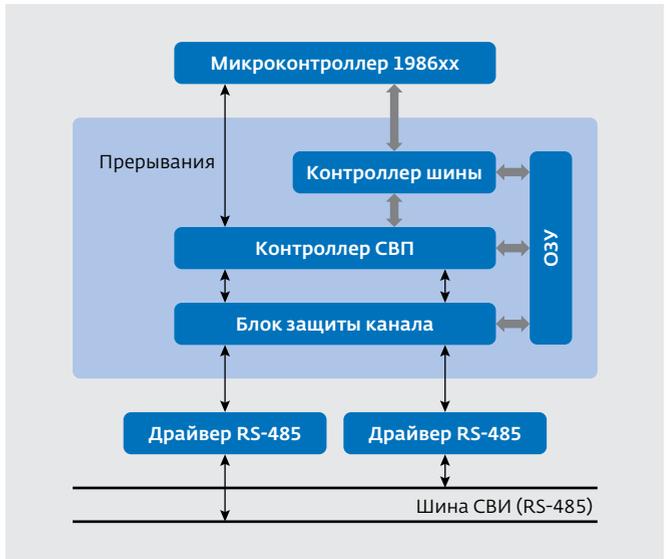


Рис.10. Структура микросхемы-контроллера СВП

кабеля 150 м на частоте 10 МГц и длине кабеля 125 м на частоте 20 МГц. Совместно с ЗАО "ПКК "Миландр" разработана микросхема контроллера СВП K5600BG2U (рис.9).

Микроконтроллер (рис.10) состоит из трех основных модулей: контроллера СВП (КСВП) с блоком защиты канала, ОЗУ и контроллера шины (КШ). В качестве внешнего микроконтроллера используются микропроцессоры серии 1986BE9x. КШ выполняет роль арбитра обращений к ОЗУ между КСВП и внешним микроконтроллером (МК). МК взаимодействует с микросхемой СВП по последовательной шине SPI или по параллельной шине, на него также заводится прерывание nIRQ от КСВП. КСВП взаимодействует с ОЗУ через КШ по внутренней параллельной шине. На физическом уровне используется шина RS-485 (два независимых канала, скорость обмена - до 10 Мбит/с). КСВП имеет два канала физической линии - основной и резервный.

В НПП "Дозор" совместно с Ростовским научно-исследовательским институтом радиосвязи (РНИИРС) разработана серия специализированных микросборок на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC) [3] с использованием бескорпусных микросхем 1986BE91 (рис.11). Кроме микроконтроллера 1986BE91, микросборки содержат различные интерфейсные микросхемы - CAN, драйверы управления электрогидравлическими преобразователями со схемами контроля тока, схемы обработки сигналов

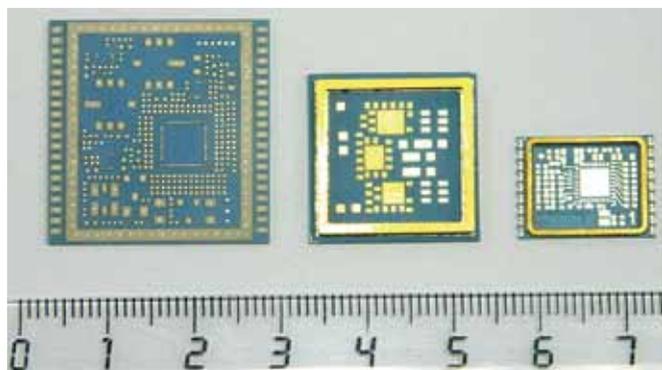


Рис.11. Платы микросборок на основе LTCC

с терморезисторов и термопар и каналы обработки сигналов дифференциальных трансформаторов.

\* \* \*

В СнК 1986ВЕ91 специалисты ЗАО "ПКК "Миландр" удачно объединили мощный 32-рядный микроконтроллер на базе ядра ARM Cortex-M3 и развитую периферию – коммуникационные интерфейсы, встроенные аналогово-цифровые и цифроаналоговые

преобразователи и контроллер внешней шины для связи с микросхемами памяти и внешними коммуникационными контроллерами. На основе СнК 1986ВЕ91 и микроконтроллера синхронного временного протокола K5600ВГ2У есть возможность разрабатывать модули и микросборки для создания встраиваемых распределенных систем управления ответственного назначения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Копетц Н.** A comparison of CAN and TTP. Technische Universitaet Wien, Austria, [http://tierra.aslab.upm.es/~sanz/cursos/DRTS/Comparison\\_CAN-TTP.pdf](http://tierra.aslab.upm.es/~sanz/cursos/DRTS/Comparison_CAN-TTP.pdf)
2. **Клепиков В.И., Калинин С.В., Захаров Н.А., Подхватилин Д.С.** Архитектура распределенных систем управления жесткого реального времени. – Радиоэлектронные и компьютерные системы, 2008, №5, с.57–61.
3. **Егоров Г., Капкин С., Стельмахович Л., Трофименков В., Хрипко В.** Многослойные керамические микросхемы. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика. – Электроника: НТБ, 2006, №5, с.60–65.