

## ВСТРАИВАЕМЫЙ КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЖЕСТКИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Н.А. Захаров, В.И. Клепиков, И.В. Литвинова, Д.С. Подхватилин,  
Д.В. Семикин, М.В. Сизов (НПП «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ»)

*Предложен встраиваемый контроллер для построения распределенных систем управления объектов, эксплуатируемых в жестких условиях, в том числе по температуре окружающей среды и вибрации. Отмечены схмотехнические и конструктивные особенности, описан сетевой протокол передачи данных, рассмотрены механизмы обеспечения отказоустойчивости. Контроллер разработан на отечественной элементной базе.*

*Ключевые слова: распределенная система управления, жесткие условия эксплуатации, синхронно-временной протокол, импортозамещение.*

### Введение

Размещение управляющего контроллера непосредственно на объекте управления уменьшает или совсем устраняет необходимость использования шкафов управления, устанавливаемых вне объекта. Это позволяет упростить эксплуатацию и техническое обслуживание системы управления и объекта в целом, уменьшить число проблем с электромагнитными и радиочастотными помехами из-за меньшей длины кабелей. Важным преимуществом размещения управляющих контроллеров на узлах и агрегатах объектов управления является возможность реализации принципа распределенного управления. Контроллеры монтируются и настраиваются на предприятиях-изготовителях соответствующих агрегатов или на предприятии-изготовителе объекта, что снижает сроки и стоимость монтажа и, соответственно, ввода объекта в эксплуатацию. Размещение контроллеров непосредственно на узлах и агрегатах объекта управления не исключает возможность установки контроллеров традиционным способом — в шкафах управления вместе с другим оборудованием. Оба подхода могут успешно существовать в рамках одной большой системы управления, предоставляя проектировщику возможность оптимального выбора.

### Особенности реализации контроллера

Реализация распределенной системы управления, состоящей из локальных контроллеров, размещенных на узлах сложного объекта управления, такого как газоперекачивающий агрегат (ГПА) на базе газотурбинного провода (ГТП), требует решения ряда проблем, связанных с применением элементов, работающих в расширенном диапазоне температур (-60...120 °С), с защитой контроллеров от чрезмерно высоких температур и вибраций, обеспечения высокоскоростного отказоустойчивого сетевого взаимодействия локальных контроллеров в жестком реальном времени [1].

Решение обозначенных проблем может быть найдено в применении архитектур, элементной базы, коммуникационных протоколов и программного обеспечения, разработанных для нужд оборонной промышленности. При этом решаются также и такие критичные проблемы, как обеспечение технологической независимости, импортозамещения, безопасности использования программного обеспечения.

Далее рассмотрим встраиваемые промышленные контроллеры серии «Дозор», в основе которых лежат решения, успешно использованные при построении ряда авиационных систем управления, в том числе бортовых САУ ГТД.

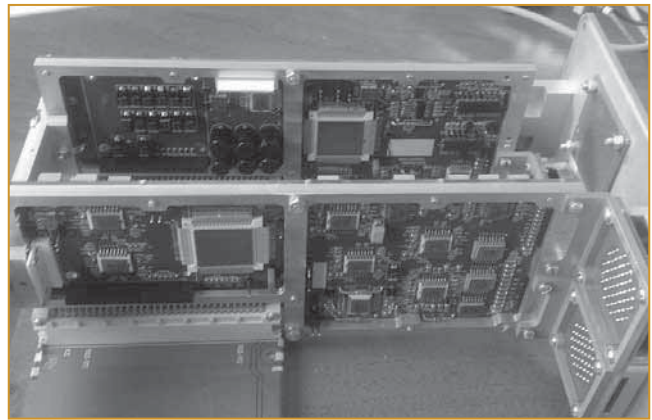
Контроллеры представляют собой набор модулей как в стандарте Евромеханика, которые устанавливаются в 19-дюймовый кейт высотой 6U (рис. 1), так и модулей, предназначенных для установки в корпус с заданными заказчиком габаритными и посадочными размерами (рис. 2). Модули также могут не иметь собственного корпуса и располагаться в корпусах агрегатов объекта.



Рис. 1. Контроллер «Дозор» в кейтовом исполнении



а)



б)

Рис. 2. Контроллер «Дозор» в заказном корпусе:  
а) общий вид; б) установка модулей

Крейт (рис. 1) может иметь исполнения как для установки в 19-дюймовую стойку, так и для установки на раму объекта, число модулей в крейте может меняться в зависимости от требований и доступных габаритов объекта.

Заказные корпуса могут быть изготовлены из алюминия или стали в зависимости от требуемой степени защиты от пыли и влаги, молнии, статического электричества и взрывозащиты. Для снижения воздействия вибраций корпус может устанавливаться на виброгасители (амортизаторы).

Обеспечение надежной работы контроллера в зоне повышенных температур окружающей среды достигается применением высокотемпературных компонентов и схемотехническими решениями. В контроллере используются импульсные и ключевые режимы работы всех высоконагруженных элементов — это вторичные источники питания, схемы управления силовыми клапанами и электрогидравлическими преобразователями и др. Этим сведено к минимуму внутреннее тепловыделение, за счет чего внутренний перегрев блока не превышает 15 °С при длительной работе при температуре окружающего воздуха 100 °С. Таким образом внутренняя температура блока ≤115...120 °С, в то время как применяемая отечественная элементная база работоспособна до 125 °С.

Вычислительным ядром контроллера «Дозор» является 32-разрядный микроконтроллер 1986BE1T ЗАО "ПКК Миландр".

Контроллер обеспечивает ввод сигналов от различных датчиков объекта: дискретных, термопар, терморезисторов, потенциометрических, частотных, датчиков положения типа LVDT/RVDT, датчиков с вольтовым и токовым выходами. В качестве выходных используются сигналы управления электромагнитными реле, электрогидравлическими клапанами и электрогидравлическими преобразователями. Некоторые модули содержат как входные, так и выходные каналы, что позволяет использовать их в качестве локальных контроллеров в замкнутых многокаскадных контурах регулирования со сложными

**Основные характеристики микроконтроллера 1986BE1T**

Ядро .....	32-битное RISC,
Тактовая частота ядра, МГц .....	≤ 144,
Объем встроенной энергонезависимой FLASH-памяти, Кб .....	128
Объем встроенного ОЗУ, Кбайт .....	48
АЦП .....	12-разрядный (до 8 каналов)
ЦАП .....	двухканальный 12-разрядный
ШИМ .....	32-разрядный (до 8 каналов)
Контроллеры интерфейсов .....	2xCAN,
.....	Ethernet 10/100, PHY Transceiver,
.....	USB с функциями Device и Host,
.....	2xUART, 3xSPI
Число пользовательских линий ввода/вывода, ед. ....	≤ 96

динамическими передаточными функциями. Все входные и выходные каналы контроллера имеют развитую аппаратную и программную диагностику собственной работоспособности и работоспособности подключенных к ним датчиков и исполнительных устройств. Наличие в каждом модуле процессора позволяет реализовать алгоритмические методы обнаружения неисправностей как датчиков и исполнительных элементов, так и самого объекта управления. Возможные методы подробно рассмотрены в [2].

Для аналого-цифрового преобразования в контроллере используются как встроенные в процессор АЦП, так и микросхемы АЦП на основе базовых матричных кристаллов (БМК) серии 5503, изготавливаемых НПК «Технологический центр» по техническим заданиям НПП «Дозор». Принцип работы реализованного в данных микросхемах АЦП основан на преобразовании измеряемого напряжения в длительность импульса, которая стабилизирована на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [3]. Данные АЦП в зависимости от настраиваемой частоты преобразования обеспечивают разрешающую способность до 24 разрядов.

В качестве внутренней шины, объединяющей все модули контроллера (как размещенные в одном корпусе, так и удаленные), выступает шина RS-485, которая может быть дублированной.

#### Сетевой протокол передачи данных

Для распределенных систем, критичных к надежности и временным характеристикам коммуникационных каналов, применение событийных (event-triggered) сетевых протоколов, таких как CAN, оказывается неприемлемым. Для таких систем в последнее десятилетие ведущими фирмами активно развиваются так называемые синхронно-временные протоколы (СВП) или ТТР (Time Triggered Protocol) [4].

В распределенных системах управления реализуются контуры управления и регулирования, состоящие из датчиков, исполнительных устройств и управляющих контроллеров, связанных между собой в единую управляющую сеть цифровыми последовательными интерфейсами. В этом случае сетевой коммуникационный канал оказывается общим разделяемым ресурсом для множества сетевых узлов, требующих гарантированной передачи и доставки информации с заданной частотой следования, фиксированным транспортным запаздыванием и отсутствием «временного дребзга» (джиттера).

Архитектурно контроллер «Дозор» состоит из сетевых узлов, включенных по схеме шина (bus). Узел состоит из процессора с памятью, подсистемы ввода/вывода, коммуникационного СВП контроллера, операционной системы и соответствующего прикладного ПО. 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 в режиме множественного доступа с разделением 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 записанную туда ранее информацию. 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. При передаче сообщения каждый узел синхронно помещает на обе шины одинаковые копии сообщения. При приеме ожидается получение корректного сообщения хотя бы с одной шины.

В СВП реализована концепция парирования одиночных сбоев и отказов, заключающаяся в том, что системы 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 времен-

ных соотношениях. Концепция парирования одиночных сбоев основана на том, что вероятность одновременного проявления отказов в двух различных компонентах ничтожно мала. Для исключения блокирования или «забивания» шины отказавшим узлом контроллер СВП содержит блок защиты шины. Последний гарантирует, что узел может выполнять передачу только один раз в течение TDMA раунда, исключая тем самым монополизацию шины отказавшим узлом. При появлении множественных отказов, которые не могут быть парированы самим протоколом, СВП информирует об этом прикладную программу, которая может принять решение о прекращении своей работы или о переходе в безопасный режим.

Контроллер СВП реализован НПП «Дозор» совместно с ЗАО «ПКК Миландр» в виде микросхемы K5600ВГ2У. Используя физический уровень RS-485, контроллер СВП обеспечивает работу до 64 узлов при точности синхронизации узлов 1 мкс и скорость передачи данных 10 Мбит/с при длине линии до 120 м или 5 Мбит/с при длине 175 м.

#### Механизм резервирования

Применение СВП позволяет для всех узлов контроллера «Дозор» создать единое информационное пространство, то есть в каждом узле контроллера на каждом шаге содержатся данные обо всех источниках (датчиков, моделей, алгоритмов контроля), синхронизированные по времени и по значениям. Благодаря этому в контроллере реализуется механизм многократного аппаратного и информационного резервирования путем выбора на каждом такте управления оптимальной аппаратной и программной конфигурации [5, 6].

Все узлы РСУ работают в общей сетевой структуре жесткого реального времени на основе синхронно-временного протокола (СВП) и выполняют функции в соответствии с загруженным прикладным программным обеспечением. При этом часть узлов РСУ может находиться в горячем резерве по отношению другим узлам. Узлы РСУ имеют встроенные средства обнаружения собственных отказов и отказов подключенных к ним измерительных, исполнительных и коммуникационных каналов. Узел, находящийся в горячем резерве, постоянно контролирует наличие и содержание информационного обмена по каналу СВП и автоматически вступает в работу через 1 мс после обнаружения отказа основного узла.

#### Операционная система

В основе программного обеспечения контроллера «Дозор» лежит разработанная в НПП «Дозор» операционная система uOS, обеспечивающая работу в жестком реальном времени. Система занимает исключительно малые вычислительные ресурсы и обеспечивают 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 КВ ПЗУ и 200 байт ОЗУ, набор применяемых модулей конфигурируется под конкретную задачу;
- расширяемость: состав модулей системы 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 обобщенного 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 кроссплатформенные свободные средства разработки, основанные на GCC и Eclipse.

Для отработки программного обеспечения контроллера «Дозор» разработано инструментальное ПО, которое функционирует на персональном компьютере под ОС Windows или Linux. Инструментальное ПО позволяет подключиться к сетевой структуре по каналу СВП, CAN или Ethernet; поддерживает работу с сетью, содержащей до 64 узлов, позволяет выполнить загрузку ПО в каждый из узлов, вывести на экран ПК в табличном или графическом виде любые переменные каждого модуля контроллера, подавать в контроллер инициирующие команды.

Инструментальное ПО обеспечивает: наглядный графический интерфейс пользователя, ведение баз данных эксплуатационных параметров, контроль в реальном времени состояния объекта и системы, анализ отказов и трендов, анализ ошибок эксплуатации, настройку агрегатов объекта, градуировки датчиков, контроль работ по обслуживанию объекта и его агрегатов.

## Заключение

Предложенный контроллер может эксплуатироваться в жестких условиях и быть встроен непосредственно в объект управления. Примененные схемотехнические решения позволяют минимизировать выделение тепла внутри корпуса контроллера, что в сочетании с выбранной элементной базой позволяет поднять допустимую рабочую температуру контроллера. В разработке использована отечественная элементная база, что решает вопросы импортозамещения. Для обеспечения отказоустойчивости применен протокол сетевого обмена с парированием одиночных сбоев и отказов, а также предусмотрено горячее резервирование узлов РСУ. В основу разработки положены решения НПП «Дозор» для авиационных бортовых систем управления, рассмотренный выше контроллер ориентирован в первую очередь на газоперекачивающие агрегаты и энергоблоки малой энергетики с газотурбинным приводом, модульная сетевая архитектура и широкий выбор вариантов исполнения делают перспективным его применение и на других объектах.

## Список литературы

1. Федюкин В.И., Клепиков В.И., Киселёв Д.В. Обеспечение технологической независимости при разработке систем управления газотурбинными приводами (САУ ГПА) // Крылья Родины. 2014. №11. С.43-47.
2. Клепиков В.И. Отказоустойчивость распределенных систем управления. М. «Золотое сечение». 2014. 392 С.
3. Сизов М., Клепиков В., Захаров Н., Подхватилин Д. Микросхемы АЦП с ФАПЧ на БМК // Электронные компоненты. 2018. №9. С.52-56.
4. Захаров Н.А., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С. Синхронно-временной протокол для распределенных систем управления // Автоматизация в промышленности. 2013. № 2. С.37-39.
5. Захаров Н.А., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С. Управление избыточностью сетевых распределенных систем необслуживаемой авионики // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 3. С.3-12.
6. 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.

*Захаров Николай Анатольевич — канд. техн. наук, начальник отдела, Клепиков Владимир Иванович — канд. техн. наук, заместитель руководителя по науке и новым технологиям, Литвинова Ирина Васильевна — начальник отдела, Подхватилин Дмитрий Станиславович — начальник отдела, Семикин Дмитрий Васильевич — ведущий инженер, Сизов Михаил Васильевич — ведущий инженер Научно-производственного подразделения «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ». Контактный телефон (495) 640-09-47. E-mail nazakharov@npp-dozor.ru*

## Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:

- по электронному каталогу "Почта России" ФГУП Почта России - подписной индекс **П7753**.
- в России - в любом почтовом отделении по каталогу "Газеты. Журналы" агентства "Роспечать" (подписной индекс **81874**) или по каталогу "Пресса России" (подписной индекс **39206**).
- в России, странах СНГ и дальнего зарубежья - через редакцию ([www.avtprom.ru](http://www.avtprom.ru)).

Все желающие, вне зависимости от места расположения, могут оформить подписку, начиная с любого номера, прислав заявку в редакцию или оформив анкету на сайте [www.avtprom.ru](http://www.avtprom.ru)  
В редакции также имеются экземпляры журналов за прошлые годы.