

© 2012 г. Р.В. Нестуля, канд. физ.-мат. наук

О.В. Сердюков, канд. техн. наук

А.Н. Скворцов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

АРХИТЕКТУРА ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СРЕДЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ АСУТП КРУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Разработан и опробован на практике новый подход к созданию комплексных систем автоматизации крупных технологических объектов. Реализована и исследована высокопроизводительная система с одноранговой распределенной архитектурой, обладающей возможностью проектирования структур любой степени резервирования с требуемым коэффициентом готовности.

ARCHITECTURE OF FAILURE-SAFE DISTRIBUTED CONTROL ENVIRONMENT FOR LARGE TECHNOLOGICAL OBJECTS / R.V.

Nestulya, O.V. Serdyukov, A.N. Skvortsov (Institute of automatic equipment and elektrometriya of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Ak.Koptyuga ave. 1, Novosibirsk 630090, E-mail: wirr@tornado.nsk.ru). The new approach to creation of complex systems of automation of large technological objects is developed and tested in practice. The high-efficiency system with the peer distributed architecture possessing possibility of design of structures of any extent of reservation with demanded factor of readiness is realized and investigated.

1. Введение

Существующие системы управления сложными технологическими объектами строятся на основе специализированных устройств — контроллеров. Контроллеры обеспечивают ввод текущих значений параметров технологического оборудования, исполнение управляющих программ и формирование сигналов управления.

Типичный контроллер состоит из процессорного устройства, взаимодействующего через магистраль (шину) со своей подсистемой ввода-вывода, представленной различным интерфейсным оборудованием: устройствами сопряжения с объектом управления (УСО), сетевыми интерфейсами и т.д.

Структура подсистемы ввода-вывода контроллера может быть пространственно распределенной за счет применения последовательных шин (Field buses) в качестве внутренней магистрали передачи данных, либо централизованной в случае крейтового исполнения. Но обработка данных в типовой структуре контроллера всегда является централизованной. Важно отметить, что здесь процессорное устройство имеет прямой доступ только к оборудованию своей подсистемы ввода-вывода.

Как правило, для управления малыми технологическими объектами достаточно использовать один контроллер. В этом случае можно сказать, что все элементы комплекса объединены единой одноранговой магистралью.

Для решения более сложных и крупных задач управления одного контроллера недостаточно, поэтому приходится использовать несколько взаимодействующих контроллеров (рисунок 1).

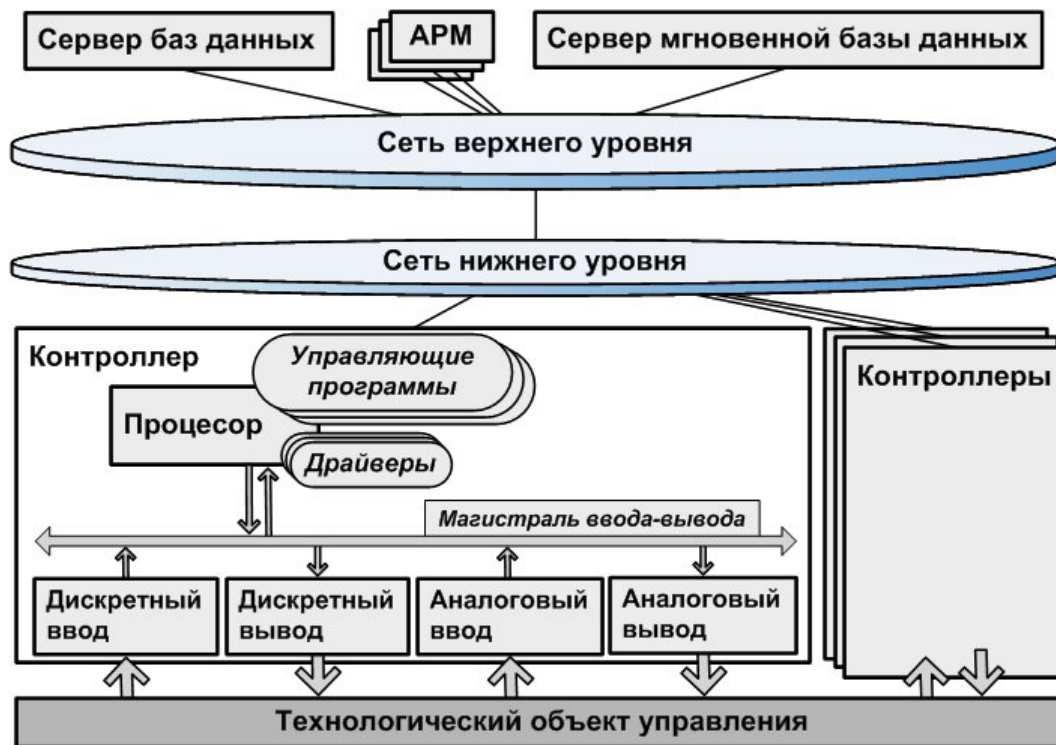


Рисунок 1 – Традиционная архитектура ПТК АСУТП

Для обмена данными между контроллерами в программно-технических комплексах (ПТК) используются специализированные сети нижнего уровня, обеспечивающие передачу данных в реальном времени.

Сети нижнего уровня взаимодействуют с сетями верхнего уровня ПТК, к которым подключаются различные серверы и автоматизированные рабочие места (АРМ) обслуживающего персонала.

Важно отметить, что механизм взаимодействия управляющей программы с источниками данных подсистемы ввода-вывода собственного контроллера существенно отличается от механизмов взаимодействия с источниками, которые подключены к другим контроллерам. В первом случае данные поступают непосредственно и потому максимально быстро из внутренней подсистемы ввода-вывода, а во втором взаимодействие осуществляется через сеть нижнего уровня и другой контроллер, к которому подключен источник данных.

Время получения текущих значений «сетевых» переменных значительно больше, чем время передачи данных в собственной подсистеме ввода-вывода. Кроме того, при передаче по сети может нарушаться детерминизм взаимодействия.

Поэтому в больших комплексах автоматизации сложных и масштабных промышленных объектов важно тщательно скомпоновать систему по контроллерам в соответствии с разбиением объекта на локальные контуры управления в составе технологических функциональных узлов, чтобы минимизировать число «сетевых»

переменных в системе, снизить нагрузку на сеть нижнего уровня и обеспечить детерминированность сетевого взаимодействия.

При этом оказывается практически невозможно выполнить компоновку контроллеров прежде, чем полностью готова проектная документация на АСУТП.

Надо отметить, что топология имеющихся кабельных трасс не всегда соответствует функционально-технологической структуре объекта, и потому нередко приходится прокладывать кабель не к ближайшему месту установки контроллеров, а к тому контроллеру, который обрабатывает тот функциональный узел, к которому относится конкретный сигнал.

Непростой задачей является перепривязка сигнала: его переброска от одного контроллера к другому.

Также непросто расширять такую систему. При этом практически невозможно избежать существенного и потенциально разрушительного вмешательства в ранее отлаженные реализации технических и программных средств.

Между тем, структура системы управления с одним контроллером значительно проще и не имеет вышеперечисленных ограничений. Хотелось бы не иметь таких ограничений и при создании крупных систем управления.

Решение этой задачи возможно при организации однорангового сетевого взаимодействия произвольного количества процессорных устройств с общей подсистемой ввода-вывода. Фактически создается «облачный» контроллер, один для всей системы, обеспечивающий требуемое быстродействие с циклами обработки и управления от 100 до 20 миллисекунд и способный охватить любой по объему и сложности решаемых задач объект управления, накрытый «облаком» ввода-вывода в десятки тысяч каналов. При этом также обеспечивается высокая степень надежности, устойчивости и готовности системы управления.

2. Новая архитектура ПТК

Во всех существующих АСУТП крупных и сложных технологических объектов используются только ПТК с традиционной архитектурой, организованные как совокупность отдельных контроллеров.

В реализованном нами ПТК опробована архитектура одноранговой распределенной отказоустойчивой высокопроизводительной среды управления (рисунок 2), обладающей новыми свойствами и преимуществами в сравнении с традиционной.



Рисунок 2 – Новая архитектура АСУТП

Чтобы служить основой АСУТП, такая система управления должна, в обязательном порядке, обеспечивать охват всего объекта автоматизации, без исключений.

Еще одно важное требование к системе — ее устойчивость к любым единичным отказам и отсутствие критических элементов отказа.

Также следует отметить, что система управления для АСУТП является системой «мягкого» реального времени, в которой допускаются редкие единичные «отставания от графика». При создании подсистем «жесткого» реального времени (например, для регистраторов аварийных ситуаций) следует использовать специализированные контроллеры, подключаемые к остальной системе.

Основная идея предлагаемой концепции состоит в создании единой однородной распределенной среды, объединяющей на одном уровне все элементы системы управления:

- ~ устройства сопряжения с технологическим оборудованием (УСО);
- ~ процессорные устройства, обрабатывающие информацию в реальном времени,
- ~ серверы и рабочие станции для обслуживающего персонала.

Любой элемент системы может взаимодействовать с любым другим элементом через общую одноранговую скоростную магистраль передачи данных.

В качестве «системообразующей» магистрали была опробована среда передачи данных «Fast Ethernet», выбор которой обусловлен следующим:

- ~ широкая номенклатура сетевых средств, выпускаемых большими сериями;
- ~ хорошо проработанный стек протоколов и богатый выбор общедоступного сетевого программного обеспечения;
- ~ отсутствие проблем совместимости устройств и программного обеспечения различных производителей;
- ~ высокая скорость передачи данных (100 Мбит в секунду);
- ~ использование массово выпускаемого дешевого кабеля типа «витая пара», который хорошо защищен от помех, типичных для промышленных объектов;
- ~ подключения узлов «звездой» сводит к минимуму эффект единичных отказов, в отличие от подключений типа «общая шина» и «от узла к узлу».

К единой магистрали системы управления подключаются модули УСО и процессорные устройства (управляющие компьютеры).

Модули УСО пассивны: взаимодействие с ними осуществляется только по инициативе управляющего компьютера.

Модули УСО с функциями ввода осуществляют:

- ~ ввод текущих физических значений контролируемых параметров технологического оборудования;
- ~ первичную обработку сигналов (линеаризацию, масштабирование, табличные преобразования и др.);
- ~ частотную фильтрацию;
- ~ определение качества (статуса) измерений;
- ~ формирование сетевых пакетов с текущими значениями.

Модули УСО с функциями вывода формируют управляющие сигналы, принимая сетевые пакеты с текущими значениями этих сигналов.

В реализованном ПТК применена пакетная передача данных между модулями УСО и управляющими компьютерами по протоколу Modbus поверх протокола UDP по сети Ethernet со скоростью 100 Мбит в секунду.

Применение сети Ethernet для построения детерминированной среды передачи данных требует внимательного анализа и тщательного обоснования.

Каждый запрос для модуля ввода передается в форме пакета предельно короткой длины, а каждый ответ упаковывается в пакет, в котором пересылаются текущие значения из нескольких или всех каналов ввода модуля.

Важно отметить, что все передаваемые по сети пакеты имеют ограниченную сверху длину, их фрагментация невозможна, их передача осуществляется по статически заданным маршрутам, а вероятность потери пакета практически равна нулю. Для оценки свойств детерминизма предложенной коммуникационной среды надо оценить максимальное теоретическое время опроса любого модуля (обозначим его CSR), как сумму следующих максимальных интервалов времени:

CSP – подготовка пакета с запросом в управляющем компьютере,

NST – передача пакета с запросом по сети,

MRP – подготовка пакета с ответом в модуле УСО,

NRT – передача пакета с ответом по сети,

CRP – обработка пакета с ответом в управляющем компьютере.

Времена CSP и CRP равны и зависят от быстродействия компьютера. В реализованном ПТК максимальные значения CSP и CRP можно принять равными 160 мкс (по результатам измерений для процессора Celeron 1 ГГц).

Время MRP зависит от реализации модуля УСО. В реализованном ПТК оно не превышает 100 мкс.

Время передачи пакетов по сети зависит от организации сетевого сегмента, соединяющего управляющий компьютер (УК) и модуль УСО (рисунок 3), а также методов функционирования сетевых коммутаторов (Switch). Для обеспечения свойств детерминизма коммутаторы должны работать по алгоритму «Store & Forward», что позволяет рассчитать и обеспечить гарантированное максимальное время опроса модулей.

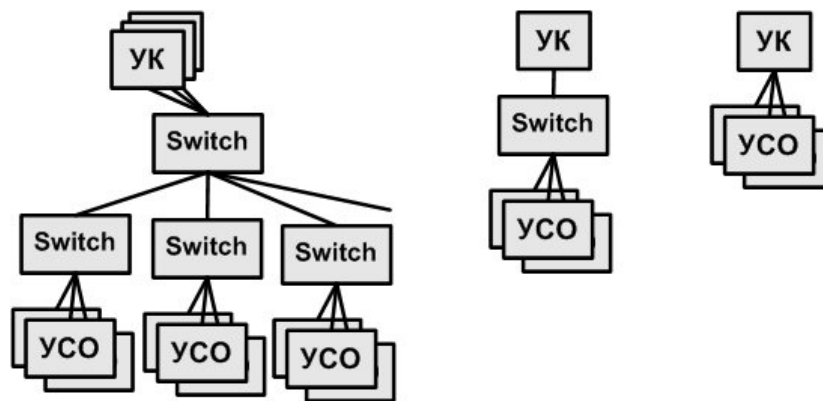


Рисунок 3 – Примеры организация сегментов сети системы управления

В случае, когда компьютер непосредственно соединен с модулем отдельной линией связи, максимальное время NST передачи пакета с запросом, при максимальной длине этого пакета 90 байт и при скорости передачи 100 Мбит/с, равно 7 мкс.

Далее, здесь максимальное время NRT передачи пакета с ответом, при максимальной длине этого пакета 130 байт и при скорости передачи 100 Мбит/с, равно 10 мкс.

Общее время опроса одного модуля УСО в данном случае:

$$CSR = CSP + NST + MRP + NRT + CRP = 160 + 7 + 100 + 10 + 160 = 437 \text{ мкс}$$

Если передача пакетов между УК и УСО осуществляется через один сетевой коммутатор, работающий по алгоритму «Store&Forward», сетевая задержка складывается из времени приема пакета коммутатором, времени хранения пакета в коммутаторе и времени передачи пакета коммутатором. Если времена приема и передачи определены и зависят от длины пакета и скорости передачи данных по сети, то максимальное время хранения пакета линейно зависит от количества подключенных к коммутатору модулей УСО и достигает своего теоретически максимального значения только тогда, когда все модули одновременно отправили пакеты в коммутатор.

Оценим эти времена при скорости передачи 100 Мбит/с.

Длина пакета Ethernet с запросом для модуля УСО не превышает 90 байт, поэтому максимальное время NT1 передачи и приема такого пакета равно 7 мкс.

Время хранения пакета с запросом в коммутаторе при передаче запроса от УК теоретически равно 0, так как целесообразно логически распределить модули УСО по отдельным УК.

Максимальная длина пакета с ответом из модуля УСО не превышает 130 байт, поэтому максимальное время NT2 передачи и приема такого пакета равно 10 мкс.

Время хранения пакета при передаче от УСО в УК теоретически может варьироваться от 0 до $(N-1) \times NT2$ в случае одновременного ответа всех модулей УСО, подключенных к коммутатору, где N число подключенных модулей. Примем N равным 50, поскольку в реализованном ПТК к одному УК рекомендуется приписывать не более 50 модулей УСО. Тогда теоретически максимальное время хранения пакета с ответом в коммутаторе составит 490 мкс.

Для случая с одним коммутатором имеем:

$$NST = NT1 + 0 + NT1 = 14 \text{ мкс},$$

$$NRT = NT2 + (N-1) \times NT2 + NT2 = (N+1) \times NT2 = 510 \text{ мкс}.$$

Итого общее время опроса из УК одного модуля УСО через один коммутатор:

$$CSR = CSP + NST + MRP + NRT + CRP = 160 + 14 + 100 + 510 + 160 = 944 \text{ мкс} < 0,95 \text{ мс}$$

Этот расчет подтверждается реальными измерениями: измеренное на практике время CSR для такой топологии соединения УК и модулей УСО не превышает 1 мс.

Также заметим, что время CSR опроса модуля УСО из отдельного УК линейно зависит от суммарного количества всех модулей, опрашиваемых этим УК.

В реализованном ПТК применен следующий алгоритм опроса модулей УСО. За каждым управляющим компьютером статически закреплена собственная группа модулей УСО. Все приписанные к данному компьютеру модули опрашиваются программами управления, функционирующими на этом компьютере. Каждая программа опрашивает свой набор модулей. Суммарно за одним УК для сложных задач рекомендуется закреплять не более 50 модулей УСО. Если передача данных между УК и модулями УСО осуществляется через один коммутатор на скорости 100 Мбит/с, получим следующее значение параметра GSR – максимального времени опроса всех модулей УСО, приписанных к одному УК:

$$GSR = (N-1) \times CSR + CSR = 49 \times 944 + 944 = 46856 \text{ мкс} < 8,8 \text{ мс}$$

где N – количество опрашиваемых модулей УСО (50),

CSR – максимальное время подготовки пакета с запросом в компьютере (160 мкс),

CSR – максимальное время опроса одного модуля через один коммутатор (944 мкс).

Такое время опроса всех модулей, которое меньше 9 мс, вполне приемлемо для задач управления с циклами управления 50–100 мс. При этом надо отметить, что здесь максимальный вклад в общую задержку дает задержка при обработке IP-стека протоколов в управляющем компьютере. Применение процессоров большей производительности частично решает эту проблему.

Длительность цикла 50–100 мс вполне приемлема для типовых управляющих программ, например, для объектов теплоэнергетики. На таких объектах требуемое минимальное время цикла равно 50 миллисекундам, для самых критических по времени реакции программ защит. Благодаря многозадачному режиму работы УК, в нем реализуется требуемое число виртуальных контроллеров, где каждый контроллер – это программа управления. Каждая такая программа обрабатывает в среднем 10 модулей УСО, и время опроса модулей УСО для такой программы соответственно в 5 раз ниже.

Заметим, что в реализованном ПТК загрузка общей сети передачи данных не превышает 2% в нормальных условиях эксплуатации АСУТП крупной теплоэлектростанции, в которой для реализации 8300 физических каналов контроля/управления используются 475 модулей УСО и десять пар дублированных процессорных блоков.

Также следует заметить, что при таком алгоритме опроса модулей УСО вероятность одновременной передачи пакетов с ответами из двух модулей чрезвычайно мала, а вероятность одновременной передачи трех и более пакетов – практически нулевая. Поэтому вычисленная выше теоретическая оценка сверху не достигается практически никогда.

Далее, если в приведенном выше расчете скорость передачи данных между коммутатором и модулями УСО оставить равной 100 Мбит/с, скорость передачи данных между коммутатором и управляющим компьютером увеличить до 1 Гбит/с, а производительность управляющих компьютеров увеличить вдвое, получатся следующие оценки.

Подготовка (CSP) и обработка пакета (CRP) в управляющем компьютере = 80 мкс

Передача пакета с запросом из УК в коммутатор (NST1) = 0,7 мкс

Передача пакета с запросом из коммутатора в модуль УСО (NST2) = 7 мкс

Передача пакета с запросом из УК в модуль УСО через коммутатор (NST) = 7,7 мкс

Передача пакета с ответом из модуля УСО в коммутатор (NRT1) = 10 мкс

Передача пакета с ответом из коммутатора в УК (NRT3) = 1 мкс

Максимальное время хранения ответа в коммутаторе (NRT2) = (N-1)×NRT3 = 49 мкс

Передача пакета с ответом из модуля УСО в УК через коммутатор:

$NRT = NRT1 + NRT2 + NRT3 = 10 + 49 + 1 = 60$ мкс

Итак, в данном случае время опроса одного модуля УСО:

$CSR = CSP + NST + MRP + NRT + CRP = 80 + 7,7 + 100 + 60 + 80 = 327,7$ мкс < 0,33 мс

Этот показатель почти в 3 раза лучше, чем в первом расчете, где он равен 944 мкс.

Для этого случая осталось рассчитать максимальное время опроса из одного УК всех модулей УСО общим количеством N=50:

$GSR = (N-1) \times CSP + CSR = 49 \times 80 + 327,7 = 4247,7$ мкс < 4,25 мс.

Как видим, теоретическая максимальная скорость опроса всех модулей одной группы во втором расчете (4,25 мс) более чем в 2 раза лучше, чем в первом (8,8 мс).

Заметим, что при таких характеристиках технических средств системы управления задержки при передаче пакетов по сети вносят относительно небольшой вклад в общее

время опроса всех модулей УСО из одного УК. Чтобы существенно уменьшить это время, нужно увеличить производительность управляющего компьютера.

Например, при увеличении производительности управляющих компьютеров еще в 2 раза получим следующие результаты:

$$CSR = CSP + NST + MRP + NRT + CRP = 40 + 7,7 + 100 + 60 + 40 = 247,7 \text{ мкс} < 0,25 \text{ мс}$$

$$GSR = (N-1) \times CSP + CSR = 49 \times 40 + 247,7 = 2207,7 \text{ мкс} (\sim 2,2) \text{ мс}$$

В данном случае теоретическая максимальная скорость опроса всех модулей (2,2 мс) в 4 раза лучше, чем в первом (8,8 мс). Поэтому в таком ПТК можно в 4 раза уменьшить минимально возможную длительность цикла управляющих программ, с 50 до 12 мс.

Система управления с такими характеристиками будет иметь качественно иные возможности применения, по сравнению с реализованной.

Но вернемся к описанию архитектуры нашей системы.

Управляющие компьютеры осуществляют:

- ~ опрос модулей УСО;
- ~ дополнительную обработку сигналов;
- ~ обмен данными с другими активными элементами управляющей системы;
- ~ обмен данными с верхним уровнем АСУТП (серверами и АРМ);
- ~ исполнение управляющих программ в реальном времени.

Управляющие программы могут работать как строго независимо, так и согласованно: каждая из них может получать текущие значения переменных из других программ посредством реализованного в системе единого механизма сетевого обмена.

Текущие значения доступных по сети экспортируемых из управляющей программы переменных (сетевых переменных), обновляются только в конце каждого цикла исполнения этой программы.

Опрос всех необходимых для управляющей программы текущих значений сетевых переменных организован так же, как и опрос всех необходимых для этой программы текущих значений каналов модулей УСО, и осуществляется только в начале каждого цикла выполнения управляющей программы. При этом передающий текущие значения сетевых переменных управляющий компьютер исполняет роль пассивного элемента системы, как и модуль ввода УСО.

Теоретическая оценка максимального времени опроса всех необходимых управляющей программе сетевых переменных линейно зависит от их количества, вычисляется аналогично оценке сверху для времени опроса группы модулей УСО и имеет тот же порядок, то есть она на порядок меньше длительности цикла любой управляющей программы в АСУТП.

Заметим, что при наступлении события, вызвавшего изменение сетевой переменной, использующая эту переменную управляющая программа сможет среагировать на данное событие не раньше, чем через время, равное сумме длительности цикла программы, изменяющей сетевую переменную, и цикла программы, использующей сетевую переменную. В реализованном ПТК можно считать несущественным влияние скорости сетевого обмена на это время реакции.

Любая из управляющих программ может взаимодействовать с любым из модулей УСО, что позволяет создавать конфигурации системы, устойчивые к единичным и множественным отказам.

Для обеспечения устойчивости к отказам основные элементы системы могут быть дублированы или резервированы.

Например, в реализованном ПТК дублируется информационная магистраль, и резервируются управляющие компьютеры.

При отказе основного компьютера резервный компьютер автоматически берет на себя функции управления объектом. После восстановления работоспособности основного компьютера к нему автоматически возвращаются функции управления. Для этого на основном и резервном компьютерах устанавливаются идентичные комплекты управляющих программ и специальное программное обеспечение для согласования контекстов исполнения управляющих программ. Контексты передаются между компьютерами в реальном времени через выделенные дублированные линии связи.

3. Новые возможности

Такая архитектура дает полную свободу в проектировании и эксплуатации систем управления, для нее нет ни топологических, ни конструктивных ограничений, в любой момент можно перераспределить нагрузку, добавить дополнительные недостающие вычислительные мощности и каналы ввода-вывода.

При добавлении новых технических и программных средств необходимо выполнить только их настройку, но не требуется вносить изменения в ранее установленные средства системы.

Система такой архитектуры может иметь любую требуемую степень резервирования. Для организации резервированных структур необходимо использовать отдельные резервированные сети.

Набор типовых элементов такой системы — это современный конструктор, позволяющий решать любые задачи управления.

Новая архитектура кардинально меняет способы и стоимость решения многих задач.

Компоновка (распределение модулей по шкафам) может точно соответствовать топологии кабельных трасс: единицей привязки становится не контроллер, а модуль ввода-вывода. В одном шкафу могут быть размещены модули из разных функциональных узлов.

Перепривязка сигнала (его переброска от одной управляющей программы к другой) производится только программно, а не программно и технически. Фактически, любой сигнал в системе можно привязать к любой управляющей программе;

При расширении и модернизации системы можно добавлять только отдельные модули УСО, а не новые контроллеры с вновь разработанными программами.

Управляющее программное обеспечение выделяется в полностью обособленный слой системы. Его декомпозиция зависит только от спроектированного функционала системы и никак не зависит от компоновки технических средств. Поэтому можно параллельно выполнять работы по компоновке и по разработке программ. Причем это можно делать по частям, по мере проработки логически замкнутых частей рабочей документации.

Вместо дорогих решений сложные технические проблемы решаются относительно простыми задачами по перенастройке и/или переконфигурации программного обеспечения.

Появляется практически ничем не ограниченная свобода в части организации работ по проектам. Для конкретного объекта, конкретных исполнителей и конкретных условий производства можно задать уникальную адекватную решаемой задаче дисциплину проектирования, разработки и изготовления системы управления.

4. Заключение

Разработан и опробован на практике новый подход к созданию комплексных систем автоматизации технологических процессов, требующих от системы управления повышенной отказоустойчивости, высокой надежности и масштабируемости по ключевым показателям, в том числе по детерминированности системы управления в диапазоне от сотен до единиц миллисекунд и по объему системы от сотен до нескольких десятков тысяч каналов контроля/управления.

Предложенное решение не имеет аналогов в мировой практике создания АСУТП и обладает фактически неограниченными возможностями по показателям производительности, масштабируемости, надежности и отказоустойчивости.

Технология построения системы на базе общей магистрали Fast Ethernet является инновационной.

В будущем системы управления с такой «облачной» архитектурой могут стать типовой основой для построения АСУТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов А.И., Капник О.В. Проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами. М: Издательство «Энергия», 1974.
2. Сердюков О.В. Контроллеры для автоматизации крупных промышленных объектов // Датчики и системы, 2000, №3 (12), с. 2-10.
3. Елизаров И.А., Мартемьянов Ю.Ф., Схиртладзе А.Г., Фролов С.В. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры: Учебное пособие. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. 180 с.
4. Елисеев Ю.В., Сердюков О.В., Скворцов А.Н. Исследование опыта разработки и внедрения современных АСУТП в энергогенерирующей отрасли России // Промышленные АСУ и контроллеры, раздел «АСУ для промышленных предприятий», 2005, № 4. С. 3-10
5. Serdyukov O. DCS with Homogeneous Architecture based on Ethernet Network // Proceedings of the IASTED International Conferences on Automation, Control, and Information Technology (ACIT 2010). Control, Diagnostics, and Automation. June 15 – 18, 2010, Novosibirsk, Russia. P. 11-14.
6. Сердюков О.В., Нестуля Р.В., Кулагин С.А., Скворцов А.Н., Тимошин А.И., Дорошкин А.А., Сорокин И.В. Современные промышленные ПТК на базе Ethernet // Информатизация и системы управления в промышленности (ИСУП), 2011, № 1 (31). С. 21–24.
7. Сердюков О.В., Нестуля Р.В., Кулагин С.А., Скворцов А.Н., Тимошин А.И., Журавлёва Л.В., Пасеко С.М., Камочкин А.В. Опыт разработки АСУТП энергоблока ПГУ-410 Краснодарской ТЭЦ на базе программно-технического комплекса «Торнадо-Н» // Теплоэнергетика, 2011, № 10. С. 20–25.
8. Сердюков О.В. Применение программно-технического комплекса «Торнадо-Н» на базе Ethernet для объектов теплоэнергетики // Сборник докладов Третьей Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2011» (Россия, Москва, 7–8 июня 2011). С. 88–91.