

УДК 004.75; 004.031.2; 681.2-5

МАСШТАБИРУЕМАЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВАЯ СРЕДА УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ОДНОРАНГОВОЙ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ АРХИТЕКТУРЫ

Р. В. Нестуля, О. В. Сердюков, А. Н. Скворцов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: oleg@tornado.nsk.ru*

Разработан и апробирован новый подход к организации программно-технических комплексов (ПТК), предназначенных для автоматизации крупных, функционально сложных технологических объектов с объёмом каналов контроля и управления порядка 10^4 . Новизна предложенного подхода состоит в применении единой информационной магистрали для взаимодействия всех элементов системы управления (устройств ввода/вывода, управляющих компьютеров, рабочих станций и серверов) или одноранговой распределённой среды управления (ОРСУ). Результаты разработки воплощены в ПТК «Торнадо-N» и внедрены на ряде объектов энергетики в России и за рубежом. Подтверждены на практике преимущества систем управления с архитектурой ОРСУ в гибкости, масштабируемости, отказоустойчивости и производительности в сравнении с классическими многоуровневыми системами.

Ключевые слова: автоматизированная система мониторинга и управления технологическими процессами (АСУТП), одноранговая распределённая система управления реального времени, управляющий компьютер (УК), устройства связи с объектом (УСО), Fast Ethernet, Modbus, ISaGRAF.

Введение. Многоуровневость существующих сегодня программно-технических комплексов (ПТК) является следствием ограничений «вчерашних» технологий. Современные технологии позволяют реализовать одноуровневую (одноранговую) распределённую среду управления (ОРСУ) [1], которая имеет ряд преимуществ перед традиционной многоуровневой архитектурой [2]. Основа одноранговой архитектуры — общая для всех элементов системы информационная магистраль, например компьютерная сеть. Единая магистраль обеспечивает непосредственное взаимодействие всех элементов системы управления друг с другом. Для реализации ОРСУ достаточно взять за основу высокоскоростную коммутируемую сеть Fast Ethernet, разработать устройства ввода/вывода или устройства связи с объектом (УСО), управляющие компьютеры (УК), имеющие возможность прямого подключения и взаимодействия друг с другом по сети [3, 4]. Устройства связи с объектом, оснащённые интерфейсом Ethernet, появились около 10 лет назад, но не было попыток создания комплексного решения, которое обеспечило бы высокую надёжность, устойчивость, производительность и реализацию задач достаточно «жёсткого» реального времени в интервале десятков миллисекунд. В этих условиях новым решением явилась разработка ПТК «Торнадо-N», который на сегодняшний день единственный на рынке ПТК с архитектурой ОРСУ.

В данной работе описаны принципы организации программно-технического комплекса «Торнадо-N» с архитектурой ОРСУ, на базе которого успешно внедрены автоматизированные системы мониторинга и управления технологическими процессами на энергоблоках ряда крупных объектов теплоэнергетики в России и за рубежом.

Результаты разработки ПТК «Торнадо-N» используются в рамках российской технологической платформы «Интеллектуальная энергетическая система России» [5], главная

цель которой — формирование высокоэффективной, экологически чистой, надёжной и безопасной энергетической системы на основе внедрения интеллектуальных технологий, обеспечивающих инновационный прорыв в развитии отрасли.

Выполненная работа лежит в русле одного из основных направлений данной технологической платформы — создания усовершенствованных методов управления на базе распределённых интеллектуальных систем управления реального времени, позволяющих реализовать новые алгоритмы и методики управления энергосистемой, включая управление её активными элементами.

Нижний (контроллерный) уровень всех существующих сегодня ПТК является многоуровневым: УСО вместе с УК образуют контроллеры, для взаимодействия которых необходима сеть следующего уровня управления. Объём контроллеров всегда технически ограничен — самые крупные из них могут обрабатывать порядка 1000 каналов ввода/вывода. В сложных и масштабных системах управления объёма даже самых мощных контроллеров недостаточно для охвата всего объекта автоматизации, поэтому ПТК для крупных объектов включает в себя несколько контроллеров, связанных между собой сетью уровня управления.

Типичный контроллер [1] состоит из процессорного устройства, взаимодействующего с устройствами ввода/вывода через внутреннюю магистраль. Организация подсистемы ввода/вывода может быть пространственно распределённой или централизованной, но обработка данных всегда осуществляется централизованно на процессорном устройстве. Заметим, что процессорное устройство контроллера имеет непосредственный доступ только к собственной подсистеме ввода/вывода, к которой привязано изолированное подмножество каналов сопряжения с технологическим оборудованием. Причём максимально возможное количество подключаемых к контроллеру каналов всегда ограничено и зависит от быстродействия процессорного устройства и организации ввода/вывода.

Из-за ограничений в производительности процессорных устройств и скорости сбора данных в системах управления большими и сложными технологическими объектами приходится применять не один, а несколько контроллеров (рис. 1), взаимодействующих через сеть уровня управления. При построении таких сетей часто используются специализированные частнофирменные программные и технические средства.

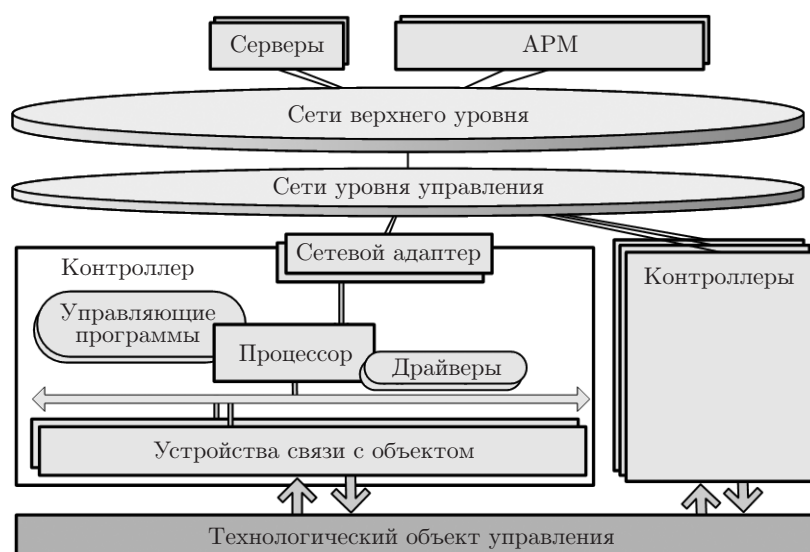


Рис. 1. Классическая архитектура системы управления

Серверы и рабочие станции (автоматизированные рабочие места (АРМ) обслуживающего персонала), составляющие верхний уровень системы, подключаются к сетям верхнего уровня, которые взаимодействуют с сетями уровня управления.

Следует также заметить, что в традиционно организованной системе управления для каждого используемого типа магистрали передачи данных реализован собственный специализированный стек протоколов, зачастую уникальный.

На всех этапах жизненного цикла систем классической многоуровневой архитектуры приходится учитывать ряд присущих им жёстких ограничений. Например, исполняемая на контроллере управляющая программа получает текущие значения параметров привязанных к ней контролируемых точек на порядок быстрее, чем текущие значения из других контроллеров по сети уровня управления, являющиеся сетевыми переменными. Может оказаться, что такие текущие значения, поступающие с существенными сетевыми задержками, невозможно будет использовать на критических по времени реакции участках управляющих программ. Чтобы снизить нагрузку на сети нижнего уровня и обеспечить детерминированность сетевого взаимодействия, необходимо минимизировать число сетевых переменных. Как следствие, при создании комплексов автоматизации сложных и масштабных промышленных объектов требуется тщательно компоновать систему по контроллерам в соответствии с разбиением объекта на локальные контуры управления, что сложно осуществить при неполной готовности проектной документации на объект.

В тех нередких случаях, когда топология имеющихся кабельных трасс не соответствует функционально-технологической структуре объекта, передаваемые по отдельному кабелю сигналы следует вводить не в один, а в несколько контроллеров. Для этого полевой кабель приходится подключать к дополнительным коммутационным элементам, а затем через вторичные цепи — сигналы к контроллерам. Стоимость ПТК может заметно повыситься при одновременном снижении его надёжности и усложнении обслуживания.

Модификация систем классической архитектуры также затруднена. Например, если ранее введённый в систему сигнал необходимо подключить к другому контроллеру, приходится существенно изменять и технические средства, и управляющие программы. Стоимость такой переделки может быть относительно высокой.

Непростой задачей является и расширение систем классической архитектуры (реализация дополнительных функций и/или подключение дополнительных сигналов). При этом практически невозможно избежать потенциально разрушительного вмешательства в ранее отлаженные реализации технических и программных средств. Часто оказывается, что проще и дешевле добавить в систему ещё один контроллер, чем модернизировать ранее установленные.

Отметим, что вышеперечисленные ограничения отсутствуют в небольших системах управления с одним контроллером, в котором все элементы находятся на одном уровне и связаны через общую сеть передачи данных. Но в таких одноранговых системах ограничены сверху вычислительная мощность процессорного устройства и количество подключаемых к нему устройств сопряжения с оборудованием.

Выбор классической архитектуры системы управления был оправдан при использовании технических средств небольшой производительности. Чтобы в таких условиях гарантированно обеспечивать детерминированность выполнения управляющих программ, выбирались наиболее простые решения. Например, сбор информации со всех подключённых к одной магистрали пассивных устройств ввода/вывода может проводиться централизованно за фиксированное время единственным подключённым к магистрали мастером — активным процессорным устройством.

С усложнением системы автоматизации и технологических алгоритмов, увеличением её объёма анализ системы с точки зрения выполнения функций в требуемом масштабе реального времени становится всё более трудоёмким, что может приводить к невер-

ным оценкам. С учётом этого обстоятельства целесообразно проектировать систему «с запасом» производительности, заведомо превышающим теоретически рассчитанный минимум [6, 7].

Но одновременно с ростом сложности систем автоматизации увеличивалась и производительность процессорных устройств и коммуникационных сетей. Десять лет назад при решении задач автоматизации загрузка процессорных устройств и сетей была близка к 100 %, поэтому, чтобы обеспечить выполнение функций в реальном времени, требовался точный теоретический расчёт нагрузки на каждый элемент системы. Многие ПТК, такие как "Ovation" (фирма "Emerson", США) и другие, имеют в своём составе специальные утилиты расчёта загрузки контроллеров. Если бы в систему можно было добавлять вычислительные мощности без влияния на уже спроектированную часть ПТК, чтобы обеспечить средний уровень загрузки (на уровне не более 30 %), это значительно облегчило бы её проектирование и гарантировало выполнение функций в требуемом масштабе реального времени [8].

Представляется, что если построить одноранговую систему управления, в которой нет верхнего предела для используемой вычислительной мощности и нет ограничений на количество УСО, такое решение можно успешно применять при автоматизации промышленных объектов любого масштаба и ограничения, присущие системам с классической многоуровневой архитектурой, не будут действовать [9, 10].

Для проверки этого предположения была разработана, исследована, применена на практике и усовершенствована архитектура ПТК «Торнадо-N» для автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) крупных энергогенерирующих объектов.

Архитектура ПТК «Торнадо-N». В ПТК «Торнадо-N» опробована архитектура одноранговой распределённой отказоустойчивой высокопроизводительной среды управления (рис. 2), обладающей новыми свойствами и преимуществами перед традиционной архитектурой ПТК для АСУТП [3].

При разработке ПТК учитывались требования, обязательные для АСУТП крупных энергетических объектов: 1) охват всего объекта автоматизации без исключений; 2) устойчивость к любым единичным отказам; 3) отсутствие критических элементов отказа.

Также учитывалось, что система управления для АСУТП является системой «мягкого» реального времени с характерной длительностью цикла порядка 10^{-2} с, в которой допускаются относительно редкие единичные «отставания от графика». При наличии требования жёсткого реального времени (например, для регистрации аварийных ситуаций в электрической части с периодичностью 10^{-3} – 10^{-4} с) следует использовать специализированные программно-технические средства в виде отдельных подсистем.

Системообразующей основой ПТК служит однородная распределённая среда передачи данных, объединяющая на одном уровне все элементы системы: УСО; процессорные

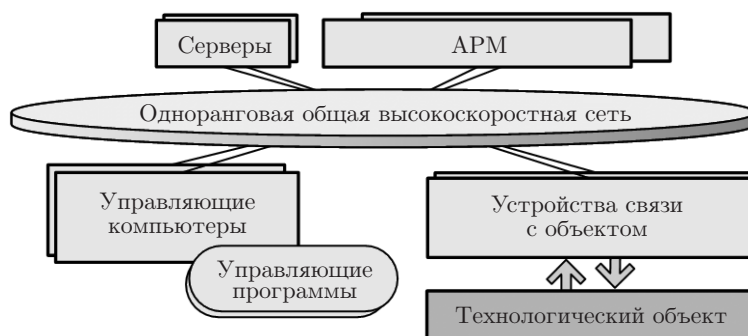


Рис. 2. Организация среды управления с одноранговой архитектурой

устройства, обрабатывающие информацию в реальном времени; серверы и рабочие станции для обслуживающего персонала.

Все элементы системы могут взаимодействовать друг с другом через общую одноранговую скоростную магистраль передачи данных.

Выбор в качестве общей магистрали в ПТК среды передачи данных Fast Ethernet обусловлен следующими преимуществами сети:

- широкая номенклатура сетевых средств, выпускаемых большими сериями и, что существенно для внедрения, относительно недорогих по сравнению со специализированными сетевыми средствами;
- стандартные стеки протоколов и богатый выбор общедоступного сетевого программного обеспечения, также относительно недорогого по сравнению со специализированным программным обеспечением;
- отсутствие проблем совместимости устройств и программного обеспечения различных производителей;
- высокая скорость передачи данных (100 Мбит/с);
- использование массово выпускаемого дешёвого кабеля типа «витая пара», который хорошо защищён от помех, типичных для промышленных объектов;
- подключение узлов по топологии «звезда» сводит к минимуму эффект единичных отказов в отличие от подключений типа «общая шина» и «от узла к узлу».

К общей магистрали ПТК подключаются модули УСО и процессорные устройства (управляющие компьютеры) промышленного исполнения.

Модули УСО пассивны: взаимодействие с ними путём сетевого обмена пакетами осуществляется только по инициативе управляющего компьютера.

Модули УСО с функциями ввода выполняют:

- ввод текущих физических значений контролируемых параметров;
- диагностику работоспособности полевых технических средств;
- первичную обработку сигналов (линеаризацию, масштабирование, табличные преобразования и др.);
- частотную фильтрацию;
- определение качества (статуса) измерений;
- формирование пакетов с первично обработанными физическими значениями.

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

Связь между УК и модулями УСО осуществляется через одноранговую сеть Fast Ethernet, при построении которой используются два уровня коммутаторов (рис. 3, уровни SW1, SW2). Такая организация обусловлена требованиями компоновки в ПТК для удобства его монтажа, наладки и технического обслуживания: модули УСО устанавливаются в отдельных шкафах и подключаются к коммутаторам первого уровня, установленным в тех же шкафах, а к коммутаторам второго уровня подключаются управляющие компьютеры и коммутаторы первого уровня.

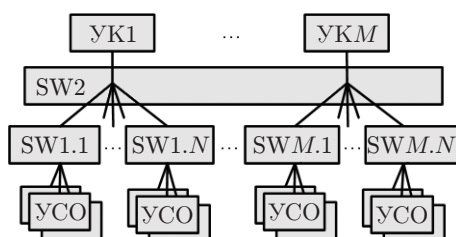


Рис. 3. Организация сетевого взаимодействия в ПТК «Торнадо-N»

Программное обеспечение управляющего компьютера осуществляет:

- опрос и диагностику работоспособности модулей УСО;
- дополнительную обработку сигналов;
- обмен данными с другими УК;
- обмен данными с верхним уровнем АСУТП (серверами и рабочими станциями);
- исполнение управляющих программ в реальном времени.

Управляющие программы работают в среде ISaGRAF, в которой единицей исполнения является цикл. В его начале опрашиваются текущие значения каналов ввода, привязанных к программе, затем выполняется очередной шаг управляющей программы, а в конце цикла могут быть изменены текущие значения в каналах вывода.

Для каждой управляющей программы (ISaGRAF) устанавливается фиксированная разрешённая длительность цикла T_c , определяющая шаг дискретизации. Например, для задач управления в теплоэнергетике рекомендуемая длительность цикла ISaGRAF равна 100 мс [11].

Если очередной цикл i начался в момент времени t_i и выполнялся за время $\Delta_i < T_c$ (рис. 4, *a*), тогда следующий цикл $i + 1$ начнётся в момент времени $t_{i+1} = t_i + T_c$ через ненулевое свободное время $F_i = T_c - \Delta_i$.

Если очередной цикл i начался в момент времени t_i и выполнялся за время $\Delta_i \geq T_c$ (рис. 4, *b*), тогда следующий цикл $i + 1$ начнётся в момент времени $t_{i+1} = t_i + \Delta_i$, т. е. сразу же после окончания цикла i . При этом F_i (свободное время цикла i) равно нулю.

Чтобы обеспечить детерминированность выполнения программы, каждый её цикл должен выполняться за время $\Delta_i < T_c$.

Как правило, в условиях промышленного применения необходимо обеспечить гарантированное ненулевое свободное время в каждом цикле ISaGRAF. Контроль этого условия в ISaGRAF осуществляет счётчик циклов, выполнение которых не уложилось в T_c , куда входит и время опроса модулей УСО. Указанное требование всегда учитывается разработчиками: при необходимости уменьшается объём вычислений, выполняемых на каждом шаге управляющей программы.

В ПТК «Торнадо-N» реализована пакетная передача данных между модулями УСО и управляющими компьютерами по протоколу Modbus поверх протокола UDP по сети Ethernet со скоростью 100 Мбит/с.

Для обеспечения надёжного взаимодействия по информационной магистрали сеть Fast Ethernet дублируется. Для опроса входящих каналов модулей УСО используется следующий алгоритм. В первый порт Ethernet модуля через сеть 1 посылается UDP-пакет с запросом, содержащим список всех опрашиваемых каналов ввода в данном модуле. Следом во

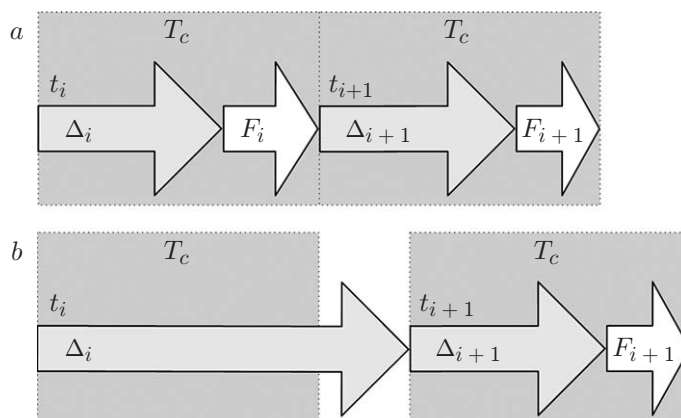


Рис. 4. Разрешённая и текущая длительности цикла ISaGRAF и свободное время

второй порт через сеть 2 посылается дублирующий UDP-пакет. Не дожидаясь ответов на уже сделанные запросы, высылаются запросы в следующие модули УСО, опрашиваемые в начале цикла ISaGRAF.

Первый принятый без ошибок UDP-пакет с ответом считается действительным. Если оба пакета из модуля УСО приняты с ошибками или за время тайм-аута, равное 3 мс, не получен ни один из них, повторная посылка запросов не производится. В качестве текущих используются самые последние значения, достоверно зафиксированные на стороне ISaGRAF. При троекратной ошибке приёма по обеим сетям в трёх циклах ISaGRAF подряд опрашиваемый модуль УСО считается неисправным, а поступающие из него текущие значения контролируемых параметров помечаются как недостоверные. Если за время тайм-аута не получен дублирующий UDP-пакет, диагностируется неисправность одной из сетей. Такой способ реализации опроса не увеличивает времени опроса и цикла программы в случае отказа оборудования. Многие современные ПТК не обладают этим важным свойством — в случае отказа оборудования время опроса возрастает многократно, что может привести к потере свойств детерминизма.

Определение неисправности модуля УСО с каналами вывода производится аналогичным образом: модуль считается неисправным, если по обеим сетям в трёх циклах ISaGRAF подряд в ответ на переданный в модуль UDP-пакет с новыми текущими значениями в управляющем компьютере не получен или получен с ошибками UDP-пакет с подтверждением приёма со стороны модуля УСО.

В ПТК применены управляющие компьютеры относительно небольшой производительности с тактовой частотой процессора 1 ГГц. При этих условиях оптимальное количество модулей УСО, с которыми может взаимодействовать один управляющий компьютер ПТК, оказалось равным 50, что соответствует порядка 1000 точкам ввода/вывода. Измеренное время опроса 50 модулей УСО из одного управляющего компьютера не превышает 1–2 мс. Среднее время длительности цикла ISaGRAF для алгоритмов в теплоэнергетике на 1000 точек составляет порядка 20–30 мс. При таких характеристиках можно гарантировать, что цикл исполнения программы будет не больше $T_c = 50$ мс.

Благодаря одноранговой организации ПТК любая управляющая программа может взаимодействовать с любым модулем УСО, что позволяет создавать конфигурации АСУТП, устойчивые к единичным и множественным отказам на полевом уровне системы, непосредственно взаимодействующем с технологическим оборудованием.

Для обеспечения устойчивости к отказам могут быть также дублированы или резервированы основные элементы ПТК. Обязательно в ПТК дублируется информационная магистраль и резервируются управляющие компьютеры. При отказе основного компьютера в паре резервный автоматически берёт на себя функции управления объектом. После восстановления работоспособности основного компьютера к нему автоматически возвращаются функции управления. Для синхронизации контекстов исполнения управляющих программ на основном и резервном компьютерах устанавливаются идентичные комплекты управляющих программ и специальное программное обеспечение. Контексты передаются между компьютерами в каждом цикле через выделенные дублированные линии связи.

Новые возможности ПТК. Разработанная архитектура (рис. 5) расширяет возможности в проектировании и эксплуатации систем управления, для неё нет ни топологических, ни конструктивных ограничений, в любой момент можно перераспределить нагрузку, добавить вычислительные мощности и каналы ввода/вывода [4].

В системе реализовано общее «коммутационное поле», через которое от каждого активного элемента системы управления может быть статически проложен и настроен виртуальный канал связи с любым другим пассивным элементом с гарантированным сетью временем доставки не более 2 мс при опросе УК не более 50 модулей УСО. В реализации такого виртуального канала используются не специализированные, а широко распространён-

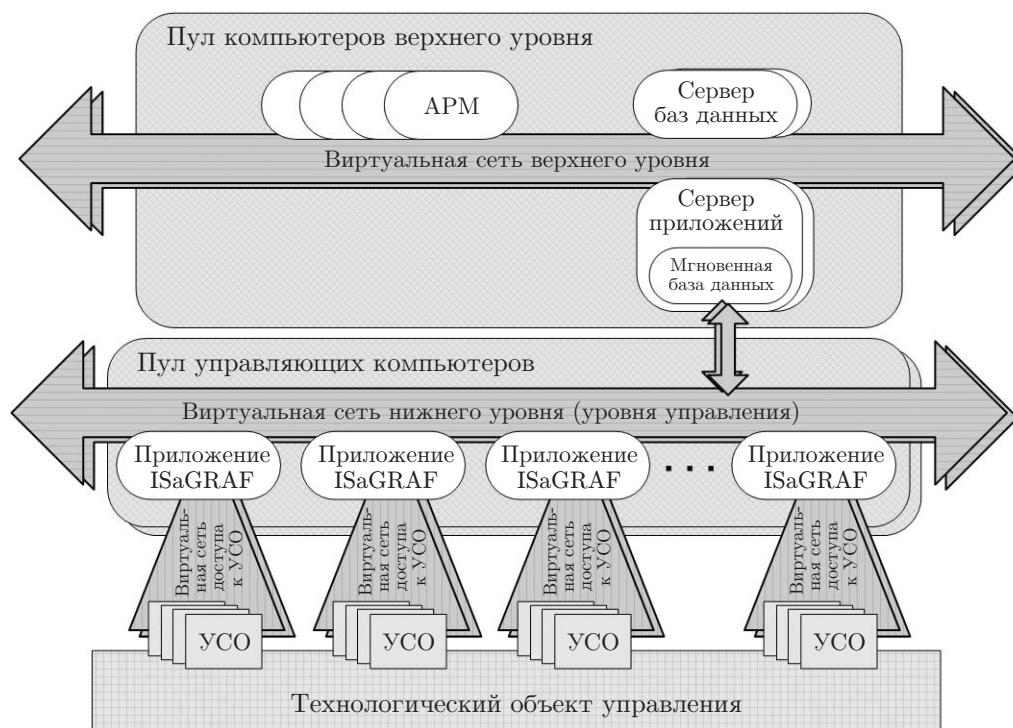


Рис. 5. Новая архитектура АСУТП на базе ПТК «Торнадо-N»

ные недорогие программные и технические сетевые средства коммутируемой Ethernet. Это решение намного экономичнее, чем, например, организация гарантированной доставки с применением специальных сетевых средств типа Profibus и других «полевых» шин.

При добавлении в систему новых технических и программных средств необходимо выполнить только их настройку без изменения существующей и настроенной части системы. Для систем такой архитектуры возможна любая требуемая степень резервирования. Для организации резервированных структур следует использовать отдельные дублированные сети.

Также кардинально меняются 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 размещаются модули из разных функциональных узлов. Перепривязка сигнала (его переброска от одной управляющей программы к другой) производится только программно (без физического переключения к другому контроллеру и определения сетевой переменной). Фактически любой сигнал в системе можно привязать к любой управляющей программе, выполняемой на любом управляющем компьютере. При расширении и модернизации системы добавляются отдельные модули УСО, а не новые контроллеры с вновь разработанными программами.

Управляющее программное обеспечение выделяется в полностью обособленный слой системы. Его декомпозиция зависит от запроектированного функционала системы и никак не зависит от компоновки технических средств. Вместо дорогих решений сложных технических проблем применяются относительно простые способы перенастройки и/или перекомпоновки программного обеспечения. Упрощается и снимается множество ограничений в организации проектных работ. Для конкретного объекта, конкретных исполнителей и конкретных условий производства можно задать оптимальную последовательность проектирования, разработки и изготовления системы управления.

Заключение. Предложенное в данной работе решение апробировано на ряде прототипов ПТК и затем реализовано в ПТК «Торнадо-N». Этот комплекс успешно внедрён на десятках объектов [12, 13], в том числе были внедрены полномасштабные АСУТП на крупных тепловых станциях и энергоблоках мощностью 200, 300 и 400 МВт. На сегодняшний день это единственный ПТК с архитектурой ОРСУ для крупных и сложных объектов, например в генерирующей теплоэнергетике. Одноранговая архитектура имеет преимущества перед другими ПТК с устаревшей многоуровневой контроллерной архитектурой, разработанной более двадцати лет назад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Skeie T., Johannessen S., Brunner C.** Ethernet in substation automation // IEEE Control Systems Magazine. 2002. **22**, Is. 3. P. 43–51.
2. **Федоров Ю. Н.** Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. Учеб.-практ. пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2008. 928 с.
3. **Potter D.** Using Ethernet for industrial I/O and data acquisition // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC). 1999. Vol. 3. P. 1492–1496.
4. **Vitturi S.** On the use of Ethernet at low level of factory communication systems // Comput. Standards & Interfaces. 2001. **23**, Is. 4. P. 267–277.
5. **Российская** технологическая платформа «Интеллектуальная энергетическая система России». URL: http://www.hse.ru/org/hse/tp/energ_intel (дата обращения: 12.11.2013).
6. **Lee K. C., Lee S., Lee M. H.** Worst case communication delay of real-time industrial switched Ethernet with multiple levels // IEEE Trans. Industr. Electron. 2006. **53**, Is. 5. P. 1669–1676.
7. **Lee K. C., Lee S.** Performance evaluation of switched Ethernet for real-time industrial communications // Comput. Standards & Interfaces. 2002. **24**, Is. 5. P. 411–423.
8. **Georges J.-P., Krommenacker N., Divoux T., Rondeau E.** A design process of switched Ethernet architectures according to real-time application constraints // Eng. Appl. of Artif. Intelligence. 2006. **19**, Is. 3. P. 335–344.
9. **Felser M.** Real-time Ethernet — industry prospective // Proc. of the IEEE. 2005. **93**, Is. 6. P. 1118–1129.
10. **Decotignie J. D.** Ethernet-based real-time and industrial communications // Proc. of the IEEE. 2005. **93**, Is. 6. P. 1102–1117.
11. **РД 153-34.1-35.127-2002.** Общие технические требования к программно-техническим комплексам для АСУ ТП тепловых электростанций. РАО «ЕЭС России», 2002. 67 с.
12. **Сердюков О. В., Нестуля Р. В., Кулагин С. А. и др.** Опыт разработки АСУТП энергоблока ПГУ-410 Краснодарской ТЭЦ на базе программно-технического комплекса «Торнадо-N» // Теплоэнергетика. 2011. № 10. С. 20–25.
13. **Сердюков О. В.** Применение программно-технического комплекса «Торнадо-N» на базе Ethernet для объектов теплоэнергетики // Сб. докл. Третьей Всеросс. конф. «Реконструкция энергетики-2011». Москва, 7–8 июня 2011. С. 88–91.

Поступила в редакцию 28 декабря 2012 г.