



Николайчук О.И.

Системы малой автоматизации

Командно-информационные сети

Схемотехника универсальных

технологических контроллеров

Проектирование систем

малой автоматизации

ISBN 5-98003-036-0



9 785980 030360



УДК 621.396.218
ББК 32.884.1
H28

О. И. Николайчук

H28 Современные средства автоматизации / О. И. Николайчук — М.: СОЛОН-Пресс, 2010. 256 с. — (Серия «Библиотека инженера»)

ISBN 5-98003-287-8

Книга призвана ознакомить читателей с современными принципами и приемами разработки систем малой автоматизации — распределенных систем управления и контроля, реализованных на основе специализированных малых и средних локальных вычислительных сетей, ориентированных на работу в режиме реального времени. Эти системы широко применяются для автоматизации небольших технологических, измерительных, исследовательских и лабораторных установок, обычно территориально расположенных в пределах одного помещения, а в последнее время и для автоматизации домашнего хозяйства.

Предназначена для широкого круга читателей, интересующихся микроконтроллерной техникой, как профессионалов, так и любителей.

ISBN 5-98003-287-8

© Макет и обложка «СОЛОН-Пресс», 2010
© О. И. Николайчук, 2010

1. Системы малой автоматизации

1.1. Предпосылки создания систем малой автоматизации

История развития современной вычислительной техники берет свое начало с середины 40-х годов прошлого века. По инициативе гарвардского математика Говарда Эйкена при финансовой поддержке президента компании ИВМ Томаса Уотсона в 1939 году начались работы по созданию первой вычислительной машины Mark-1, которая была официально передана Гарвардскому университету в 1944 году. В то же время был сформулирован ряд идей, которые и по настоящее время считаются концептуальными. К этим идеям следует отнести: концепцию хранения программы в памяти компьютера, предложенную в 1944 году американским инженером Джоном Эккертом; идеи по архитектуре электронных вычислительных машин, предложенные в 1946 году Джоном фон Нейманом; книгу американского ученого Норберта Винера «Кибернетика, или управление и связь у животных и машин», в которой изложены основные предпосылки развития теории автоматов, а также вводится понятие кибернетики как науки об управлении и передаче информации; книгу Клода Шеннона «Математическая теория передачи информации». Все эти события способствовали созданию в 1951 году под руководством Сергея Александровича Лебедева первой отечественной цифровой электронно-вычислительной машины МЭСМ (Малая Электронная Счетная Машина). В 1952 году была создана отечественная Быстродействующая Электронная Счетная Машина — БЭСМ [1—5].

Первые цифровые электронно-вычислительные машины имели центральное процессорное устройство (*CPU — Central Processor Unit*), которое управляло абсолютно всеми периферийными устройствами. По мере дальнейшего развития научной и инженерной мысли в области вычислительной техники, а также элементной базы, создавались все более совершенные электронные вычислительные машины (*CS — Computing Systems*). Они оснащались все большим набором периферийных устройств: всевозможных инженерных пультов, алфавитно-цифровых дисплеев, алфавитно-цифровых печатающих устройств, устройств ввода-вывода информации, устройств хранения информации на различных носителях (магнитных картах, лентах, дисках) и т. п. Периферийные устройства также все время совершенствовались. Постепенно управление ими все более усложнялось, что отвлекало все большие вычислительные мощности со стороны *CPU*. Со временем возникла ситуация, когда разработчики вычислительной техники поняли, что дальнейшее усложнение периферийных устройств будет отбирать все больше вычислительной мощности от *CPU* и что альтернативой этому будет оснащение периферийной техники собственными устройствами управления или локальными *CPU*, которые будут управлять непосредственно периферийным устройством. Таким образом, идея децентрализации управления перифе-

рийной техникой позволяла освободить значительную часть вычислительной мощности основного *СРU*.

Следует отметить, что в то время в СССР, как и в других странах, существовали два независимых направления в развитии средств вычислительной техники: гражданское и военное.

Первое направление было ориентировано на создание *СS* и их применение в различных областях народного хозяйства, для проведения различных научных и инженерных расчетов. В рамках этого направления работали многочисленные научно-исследовательские учреждения Академии наук и вузов, а также промышленные предприятия. В середине 60-х годов в русле этого направления началось создание *СS* для управления производственными и технологическими процессами в реальном времени, развитие которых было поручено Минприбору СССР [1]. Дальнейшее развитие элементной базы, совершенствование архитектуры средств вычислительной техники, научной и инженерной мысли привело к созданию управляющих вычислительных машин — *ССS (Control CS)*. В тоже время развитие научных исследований и появление ряда новых научно-исследовательских задач способствовало развитию идей децентрализации и созданию распределенных модульных систем автоматизации научных исследований и производства [6].

Второе направление не менее интенсивно и широко развивалось в организациях военно-промышленного комплекса. Оно практически не было, в силу известных причин, отражено в открытой печати. Уже в конце 50-х годов начались интенсивные работы по применению вычислительной техники в различных системах военного назначения: противовоздушной и противоракетной обороны, контроля космического пространства, управления полетами в авиации и космосе, системах управления разными родами войск [7]. Эти системы по понятным причинам были территориально рассредоточены, занимали очень большие площади, но в то же время требовали четкой согласованности действий и оперативной связи для обмена информацией. Одновременно начали интенсивно развиваться бортовые специализированные вычислительные машины — *ССS (Specialized Computing Systems)*. Они были предназначены для управления различной военной техникой: самолетами, танками, морскими кораблями и т. п. [8—10]. Многие бортовые системы вначале создавались как автономные, территориально рассредоточенные *СS* для управления различными подсистемами и агрегатами, а лишь затем, в ходе совершенствования техники, возникла необходимость в жесткой координации их действий и оперативному обмену данными между ними. Это привело к попыткам связи рассредоточенных *СS* в единую целостную систему с общим управлением. Таким образом, примерно к концу 60-х годов окончательно сформировались идеи и накопился некоторый начальный опыт создания рассредоточенных систем [11—13].

В далеком 1962 году в рамках работ, развернутых по инициативе президента США Эйзенхауэра совместно с военными ведомствами и ставивших своей целью обеспечение превосходства США в науке и техническом развитии (в ответ на запуск в СССР первого искусственного спутника Земли, 04.10.1965), было создано агентство *ARPA (Advanced Research Projects Agency)*. При этом

агентстве был создан новый департамент технологий обработки информации (*Information Processing Techniques Office, IPTO*), которому было поручено изучать и совершенствовать технологии контроля и управления. Первым директором IPTO был психолог, специалист по поведению человека, сотрудник Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер (*Joseph Carl Licklider*). В середине 1960-х он опубликовал свои идеи относительно будущей роли вычислителей, взаимодействующих друг с другом в среде передачи данных с множественным доступом. Считается, что именно эти идеи явились первым предвестником создания вычислительных сетей. Немного раньше, в 1961 году в Массачусетском технологическом институте была опубликована работа Леонарда Клейнрока (*Leonard Kleinrock*), будущего теоретика *Internet*. В этой работе впервые высказывалась идея технологии «коммутации пакетов». Смысл этой идеи заключался в том, что при передаче информации на неопределенно большое расстояние в течение неопределенно большого времени через неопределенное количество промежуточных узлов блок передаваемого сообщения должен быть заключен в капсулу, содержащую все необходимые сведения о сообщении для того, чтобы любой промежуточный узел мог определить его дальнейшее направление, а приемный узел — принять и проверить целостность. Эти идеи послужили, в некотором смысле, основой для создания и развития в дальнейшем сетевых технологий. В 1963 году в США был создан Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (*IEEE*), ставший впоследствии главным разработчиком массовых стандартов в области локальных сетей (*LAN — Local Area Network*). Первая в мире *LAN* была создана в 1967 г. Дональдом Дэвисом (*Donald Davies*) в Национальной физической лаборатории Великобритании (*British National Physics Laboratory*). Что было далее? Далее в мире начался процесс создания все новых и новых сетевых технологий, который часто называют «сетевым бумом» [14—18].

Появление на рубеже 70-х годов принципиально новой элементной базы — микропроцессоров послужило предпосылкой для создания и развития новых систем обработки данных — систем с распределенной структурой, называемых также децентрализованными или распределенными системами управления (*DCS — Distributed Control System*) [19—24]. Одновременно развивались и идеи создания различных сетей: в первую очередь глобальных, а затем и локальных. Схожесть целей и путей реализации *DCS* и *LAN*, а также их практически одновременное параллельное развитие часто приводило к некоторой путанице в терминологии. Только значительно позже, с развитием классификации и стандартизации, были определены основные отличия между этими понятиями.

Опыт создания периферийных микропроцессорных контроллеров, а также быстрое развитие архитектуры и возможностей микропроцессоров привели к ускоренному развитию *DCS*. Создавались как глобальные (например родом войск) и средние распределенные системы управления (распределенная система управления заводом), так и малые распределенные системы управления (автомобилем, отдельным конвейером, танком и т. п.). В 1975 году в ФИАН им. П. Н. Лебедева (Москва) была разработана первая в СССР локальная сеть [14]. В то же

время начали развиваться системы автоматизации научных исследований и системы управления технологическими процессами в реальном времени [6, 13—18].

К сожалению, так называемая «компьютерная революция» происходила достаточно медленно примерно до второй половины 70-х годов, что было обусловлено совершенствованием архитектуры и технологии производства микропроцессорной техники.

Одновременно с этим процессом происходило переосмысливание основных принципов построения буквально всех изделий, связанных с вычислительной техникой и, конечно же, эти процессы повлияли на идеи и принципы развития *DCS* и *LAN*.

Повышение степени интеграции привело к созданию новых мощных микропроцессоров и микроконтроллеров и систем на их основе — *MPS* (*Microprocessor Systems*), выполненных на одной или нескольких больших интегральных схемах (*ICs*), что окончательно сделало экономически выгодным развитие *DCS* и *LAN* [19—35].

Начиная с 80-х годов и по настоящее время темпы развития *DCS* постоянно возрастают. Этому способствует постоянное расширение сферы производства, совершенствование элементной базы при неуклонном снижении ее стоимости, развитие научно-технической мысли в областях архитектуры вычислительных систем и сетевых технологий, расширение областей автоматизации человеческой деятельности и т. п. В тоже время постепенно в мире снижается удельный вес гигантских промышленных предприятий и научно-исследовательских центров. Их заменяют экономически выгодные и мобильные (в научном и производственном отношении), а также менее энергоемкие малые промышленные фирмы и исследовательские центры.

В области развития *DCS* также происходят некоторые перемены. Такие традиционные области применения *DCS*, как малые системы автоматизации производства реального времени, малые специализированные распределенные системы управления, малые системы автоматизации научного эксперимента и малые информационно-измерительные системы, которые долгое время развивались независимо и параллельно, в последнее время все чаще проектируются по сходным принципам и, в некотором смысле, объединяются. Во многих развитых странах такие же системы применяются и для автоматизации домашнего хозяйства [36]. В специальной литературе такие малые распределенные системы управления реального времени часто называются *системами малой автоматизации* — *SAS* (*Small Automation Systems*).

В системах *SAS* используются все знания и практический опыт, накопленные при создании вышеперечисленных систем *DCS* и малых локальных сетей *LAN*. Современные *SAS* выполняются на самой современной элементной базе и работают в режиме реального времени. В то же время характерными основными чертами этих систем является низкая стоимость, простота реализации, высокие надежность и быстродействие. Основам схемотехники именно таких систем посвящена настоящая книга.

1.2. Основные понятия о распределенных системах управления

Для того чтобы сформулировать основные признаки распределенных систем управления *DCS*, следует более подробно остановиться на особенностях применения микропроцессоров (*MP — Microprocessor*), а позднее и микроконтроллеров (*MC — Microcontroller*) в различных системах.

Во-первых, отметим, что для большинства микропроцессоров и микроконтроллеров их вычислительная мощность не является основной чертой. Немаловажное значение для них имеют управляющие, коммутирующие и логические возможности. Именно они, в первую очередь, важны для организации эффективного взаимодействия *MP* и *MC* между собой (в сложных системах со многими *MP*) и с объектами управления (или измерения). Существует также некоторое обратное воздействие «решаемой задачи» на структуру и организацию *MP*.

Практически все современные *MC* кроме собственно вычислительного ядра оснащены дополнительными (периферийными) функциональными узлами, не свойственными ранним моделям, которые появились вследствие анализа наиболее часто встречающихся задач [12, 19, 20].

Во-вторых, снижение стоимости и повышение вычислительной мощности *MP* и *MC* привели к перераспределению ценовых акцентов в вычислительных системах. Ведь если раньше наиболее дорогостоящим в вычислительных системах было именно *CPU*, а периферийное оборудование стоило относительно недорого, то в последнее время именно периферийное оборудование имеет в вычислительных системах наибольший ценовой вес. Например, если ранее существовали тенденции к созданию распределенных вычислительных систем с целью повышения общей вычислительной мощности, то в настоящее время достаточно часто создаются распределенные системы с целью коллективного пользования дорогостоящим периферийным оборудованием. Все это, в конечном итоге, приводит к новым способам внутрисистемного взаимодействия и организации распределенных систем.

В-третьих, при создании распределенных систем разработчики стремятся разделить задачу на некие автономные, слабо взаимосвязанные фрагменты. Это существенно упрощает аппаратную и программную реализацию управления небольшими фрагментами объекта управления. С другой стороны, это приводит к тому, что *DCS* может содержать достаточно большое количество *MP* (или *MC*) — от десятков до нескольких сотен. Таким образом, эти системы являются мультимикропроцессорными (*MMPS — Multi Microprocessor Systems*). Наличие такого большого количества автономно работающих узлов предъявляет высокие требования к общей координации системы. Это означает, что в таких системах необходимо обеспечить достаточно простой и эффективный обмен данными, обнаружение и устранение конфликтных ситуаций при одновременной попытке нескольких устройств воспользоваться каким-либо общим ресурсом.

В-четвертых, низкая себестоимость и малые габариты *MPS*, в сочетании с достаточно большой вычислительной мощностью, позволяют устанавливать их

непосредственно возле управляемого объекта, создавая территориально достаточно большие (протяженные) системы. Для таких систем взаиморасстояние компонентов *DCS* может достигать от нескольких единиц до нескольких сот метров. Все это накладывает определенные требования на систему связи между компонентами. Иногда встречаются случаи, когда производительности одного *MP* или *MC* не хватает для решения локальной задачи управления объектом. В таких случаях непосредственно в рамках одной *MPS* может быть организована сосредоточенная многопроцессорная система, ориентированная на решение определенной задачи.

Таким образом, как было показано выше, важной особенностью децентрализованных систем управления является не столько рассредоточенное расположение аппаратуры, сколько разделение всей функции обработки и управления на несколько слабосвязанных функций и распределение этих функций между несколькими *MPS*.

Итак, основными причинами появления децентрализованных систем можно считать:

- снижение стоимости *MPS*;
- более простую аппаратную и программную реализацию отдельных функций *DCS*;
- интерактивный характер многих задач децентрализованных систем [23];
- предпочтительность расположения средств обработки данных на основе *MPS* непосредственно возле рассредоточенных в пространстве источников и приемников данных (объектов управления или измерения);
- вследствие недостаточной мощности *MP* (*MC*) может возникнуть необходимость в создании локальных централизованных *MMPS* или в обработке данных одного объекта с помощью нескольких децентрализованных *MPS*;
- необходимость коллективного использования дорогостоящего периферийного оборудования.

Из вышесказанного следует, что главенствующую роль при создании *DCS* играет организация взаимодействия и каналы связи между децентрализованными *MPS*.

Следует отметить, что само понятие «распределенная система управления», несмотря на почти 30-летний стаж существования, — недостаточно устоявшееся и порой противоречивое. Описанные в современной специальной литературе распределенные системы очень сильно отличаются друг от друга и по принципам организации, и по другим признакам. Как правило, такие системы создаются при наличии достаточно сложного объекта управления, как следствие, субъективно в качестве главных выделяются разные характеристики объекта и неоднозначно трактуются системы управления. Наиболее часто подчеркиваются следующие характеристики *DCS*: высокая вычислительная мощность, эффективность организации, быстрота реакции, высокая пропускная способность каналов связи, высокая надежность, живучесть, малая стоимость, модульная организация, легкость наращивания, гибкость структуры; совместное использование ресурсов; хорошее поведение при перегрузках и т. п.

На первом этапе создания *DCS* в научной литературе отмечались следующие характерные признаки:

1. Наличие в системе множества процессоров (*MP* или *MC*) или *MPS*, а также других элементов системы, которые собственно и образуют собой распределенные ресурсы системы.

2. Территориальное рассредоточение этих элементов системы (ресурсов).

3. Объединение элементов системы через общие линии связи (каналы) и протоколы.

4. Наличие разбиения системы на иерархические уровни. Наличие аппаратуры и программного обеспечения *SW (Software)* верхнего уровня, которые координируют работу всей системы. Наличие программного обеспечения собственно *MC (MP) — FW (Firmware)* в элементах системы нижнего уровня.

5. Наличие простой интерактивной системы взаимодействия пользователя с системой (наиболее часто — с элементом верхнего уровня), аналогичной взаимодействию с централизованной системой.

6. Время, требуемое на обмен сообщениями, должно быть одного порядка со временем между событиями процесса, и им нельзя пренебрегать.

Раньше считалось, что если время обмена сообщениями много меньше времени между событиями процесса, то первым можно пренебречь и, соответственно, признак 6 не удовлетворяется, следовательно, распределенной системы обработки данных нет [12]. Следует отметить, что на практике все перечисленные признаки удовлетворяются довольно редко, хотя системы и называются *DCS*. Например, в некоторых современных системах используются высокоскоростные каналы передачи данных, а интенсивность обмена между элементами несоизмеримо ниже, чем интервалы между событиями процесса вследствие высокой производительности *MPS* и значительного объема первичной обработки данных в них. В соответствии с приведенными признаками такая система не могла бы называться *DCS*, т. к. не выполняется признак 6, хотя на самом деле таковой является. Как будет показано ниже, в настоящее время существует более лояльный подход к определению *DCS*. В заключение следует отметить, что указанные выше признаки характерны не только для *DCS*, но и для многих других рассредоточенных систем, в том числе, например, и для глобальных сетей *CS*.

Основными отличиями *DCS*, например, от глобальных систем являются:

1. В состав глобальных сетей входят большие *CS*, а в состав *DCS*, как правило, входят только *MPS*.

2. Обмен сообщениями в глобальных сетях происходит в режиме коммутации пакетов с длинами сообщений — несколько тысяч байтов, а в *DCS* длина сообщений намного короче и редко достигает тысячи байт.

3. В *DCS* используются линии связи с длиной, редко превышающей несколько километров, а в глобальных сетях длина канала может достигать десятков и сотен километров.

4. Многие *DCS* имеют упрощенный протокол передачи и механизм обнаружения и устранения конфликтов.

5. Связь между элементами *DCS* обычно производится в режиме коммутации каналов.

Наиболее распространенные структуры. В современных *DCS* особенно важным является система передачи данных между отдельными *MPS*. Это обусловлено, в первую очередь, стоимостью аппаратуры и собственно каналов передачи данных. Наиболее распространенные варианты структур децентрализованных систем показаны на рис. 1.1 [12].

На рисунке квадратами обозначены *MPS*, а кружками — устройства управления передачей данных. Рис. 1.1 иллюстрирует соединения: а) «звезда»; б) замкнутое кольцо с централизованным управлением; с) замкнутое кольцо с децентрализованным управлением; д) разомкнутое кольцо (шина) с централизованным управлением; е) разомкнутое кольцо (шина) с децентрализованным управлением.

Топологическая децентрализация *MPS* предполагает пространственное распределение датчиков, регуляторов и других исполнительных устройств, а также *МС* или другой аппаратуры обработки данных. Для обеспечения оптимальной топологической децентрализации число и места установки периферийных узлов выбираются так, чтобы минимизировать суммарную длину кабеля и состав аппаратуры связи. Обычно координирующим элементом является один из *MPS* или персональный компьютер (*PC* — *Personal Computer*). Периферийные элементы называются обычно станциями (*Stations*).

Наиболее часто используются: звездная (радиальная), кольцевая и шинная организации, а также смешанная организация, где одновременно присутствуют различные типы связи.

В радиальной (звездоподобной) структуре (рис. 1.1, а) периферийные станции обмениваются друг с другом только через центральный или координирующий элемент *MPS*. Программное обеспечение станций весьма просто за счет усложнения его в координирующем элементе *MPS*. Кроме того, такая организация, особенно при большом количестве станций, значительно усложняет реализацию и стоимость аппаратуры связи, т. к. требует использования в центральном узле коммутаторов, концентраторов и т. п.

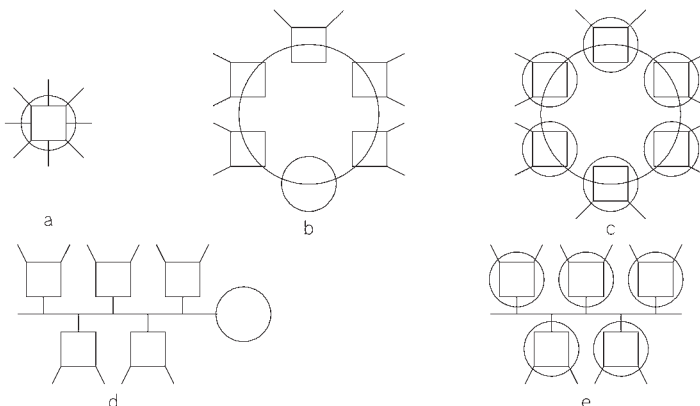


Рис. 1.1. Наиболее распространенные варианты соединения элементов децентрализованных систем

Кольцевая организация (рис. 1.1, b и рис. 1.1, c) упрощает взаимодействия между элементами станции и сокращает длину линии связи, но аппаратная реализация и программное обеспечение *FW* также достаточно сложны из-за особенностей протоколов взаимодействия.

Наибольшей популярностью в настоящее время пользуется соединение типа шина (разомкнутое кольцо). В специальной литературе опубликованы результаты анализа экономической целесообразности применения централизованных и децентрализованных систем управления шиной. Показано, что централизация систем управления экономически оправдана при большой степени территориальной сосредоточенности точек контроля и управления либо при малом их числе. В остальных случаях выгоднее децентрализация управления [12]. Кроме того, *DCS* с шинной организацией и централизованным доступом имеет минимальную длину линий связи и один координирующий *PC*, что очень выгодно при построении малых технологических и специализированных систем [14, 24—27].

Следует отметить, что в ранних *DCS* связь между станциями осуществлялась с помощью различных параллельных многопроводных интерфейсов. Такие системы связи имели высокую стоимость и по мере развития сетевых технологий и протоколов передачи данных были вытеснены системами передачи данных на основе последовательных интерфейсов. В настоящее время *DCS* практически всегда проектируются на основе *LAN* с использованием современных сетевых технологий и протоколов.

1.3. Основные понятия о локальных вычислительных сетях

Стандартизация. Локальная вычислительная сеть (*LAN*) представляет собой, в общем случае, коммуникационную систему, которая принадлежит одной организации и позволяет при помощи единой передающей среды общаться друг с другом однотипным или разнородным средствам вычислительной и микропроцессорной техники [18, 28]. Довольно большой промежуток времени, начиная с 1967 года по начало 80-х годов, *LAN* разрабатывались достаточно бессистемно, хотя отдельные фирмы и создавали ряд стандартов на разработанные ими сети. В 1980 году при *IEEE* был создан комитет *802* по стандартизации *LAN*. Стандартизацией сетей больших машин занимался в то время комитет *X3T9.5* при институте *ANSI*.

В результате работ по стандартизации были созданы ряд основополагающих стандартов, приведенных в табл. 1.1.

Таблица 1.1

IEEE 802.1	«Введение в LAN»
IEEE 802.2; ISO 8802.2	«Управление логическим звеном» (уровень данных)
IEEE 802.3; ISO 8802.3; ECMA-80/81/82	«Шина со случайным доступом» (физический уровень)
IEEE 802-4; ISO 8802.4; ECMA-00	«Шина с маркерным доступом» (физический уровень)
IEEE 802.5; ISO 8802.5; ECMA-89	«Кольцо с маркерным доступом» (физический уровень)
ISO 8802.7	«Кольцо с тактированным доступом» (физический уровень)

Однако на этом развитие новых типов *LAN* и соответствующих стандартов не остановилось и продолжается до сих пор. Кроме того, очень многие современные локальные сети разрабатываются с нестрогим соответствием приведенным стандартам.

Классификация LAN. К настоящему времени существует достаточно много вариантов классификации *LAN* [29—34]. В качестве классификационных признаков используются: сфера применения, назначение, размеры, трафик, топология, физическая среда, метод доступа к среде и т. д. Мы остановимся только на некоторых, наиболее интересных для нашей темы, классификационных признаках.

По размерам (количеству станций) *LAN* подразделяются на:

- малые *LAN* — до 16—20 станций;
- средние *LAN* — до 32—128 станций;
- большие *LAN* — до 500 станций;
- очень большие *LAN* — свыше 500 станций.

По признаку используемой физической среды *LAN* подразделяются на выполненные с:

- витой парой;
- многожильным кабелем;
- коаксиальным кабелем;
- силовым кабелем;
- волоконно-оптическим кабелем;
- радиоканалом;
- инфракрасным каналом и микроволновым каналом.

По признаку топологии *LAN* подразделяются на:

- шинную;
- кольцевую;
- звездообразную;
- петлевую;
- древовидную;
- смешанную;
- полносвязную.

Важнейшим классификационным признаком *LAN* является сфера применения (или функциональная ориентация). По этому признаку *LAN* подразделяются на сети для: автоматизации управления технологическими и другими производственными процессами; автоматизации делопроизводства; сбора и передачи данных; создания информационных систем и других автоматизированных систем; специальных применений; автоматизации научных исследований; автоматизации домашнего хозяйства и т. д.

От функционального назначения сети зависят алгоритмы ее работы, состав включаемого (поддерживаемого) оборудования, используемые интерфейсы, выбор среды передачи данных, форматы передаваемых данных, скорости передачи данных, метод доступа станций к сети и многое другое. Некоторые из вышеперечисленных функционально-ориентированных *LAN* должны работать в режиме

реального времени (т. е. должно гарантироваться время доступа к сети или время выполнения отдельных операций). Режим реального времени необходим при управлении технологическими или производственными процессами, в некоторых системах сбора данных, в системах для спецприменений, в системах автоматизации научных исследований. В других *LAN* временной параметр не является столь критичным, например в системах автоматизации делопроизводства, в информационных системах. Значительно зависит от функционального назначения и состав оборудования. Например, в управляющих системах редко возникает необходимость в подключении к сети стандартной компьютерной периферии и, наоборот, такое требование почти всегда присутствует при создании информационных систем или систем автоматизации делопроизводства.

Очевидно, что и длина передаваемых сообщений также сильно зависит от назначения системы, так, в управляющих системах длина сообщений обычно невелика, а в информационных — наоборот, значительна.

Большинство разработанных и стандартизованных типов сетей относятся к средним и большим. Это, как правило, информационные, делопроизводственные и другие сети общего назначения. Лишь небольшое число существующих типов сетей можно отнести к малым сетям (*SAN* — *Small Area Networks*). По приведенной выше классификации под этот термин подпадают малые (до 16—20 станций) и средние (до 32—128 станций) локальные сети.

Малые локальные сети характеризуются меньшей сложностью, стоимостью и иногда функциональной возможностью, чем обычные (большие) локальные сети. Малые локальные сети наиболее целесообразны для небольших производств, учреждений, предприятий, лабораторий, учебных заведений и контор, когда средние и большие сети избыточны, дороги и неэкономичны. Еще чаще они разрабатываются для автоматизации определенного типа территориально рассредоточенного оборудования (в производстве, научных исследованиях, домашнем хозяйстве, изделиях спецтехники, сложных измерительных системах и комплексах) [12—14, 17, 34—39]. Фактически именно *SAN*, как правило, работают в режиме реального времени, именно они являются не чем иным, как распределенными системами управления (*DCS*), именно такие системы в последнее время наиболее часто называют системами малой автоматизации.

Очевидной отличительной чертой всех *LAN* (включая *SAN*) является наличие непосредственной физической связи между абонентами сети. Другая картина наблюдается в глобальных сетях. По этой причине в глобальных сетях наиболее важной проблемой является проблема маршрутизации сообщений, а локальных сетях — проблема совместного использования общего канала передачи данных.

По методам доступа абонентов к общему каналу локальные сети разделяются на сети со случайным доступом, с детерминированным доступом, с централизованным управлением и с комбинированным доступами [24, 26, 30, 34].

В сетях со случайным доступом все абоненты равноправны и могут выходить на передачу в любое время. Это приводит к возможности появления конфликтов между абонентами при одновременной попытке нескольких из них обратиться к каналу (в силу ошибок программного обеспечения, аппаратных сбоев, помех, аварийных ситуаций). Иными словами, абоненты должны состязаться

за доступ к каналу. Поэтому метод случайного доступа иногда называют методом «состязаний». При этом методе возможно наложение в канале нескольких передач. В настоящее время существует целый ряд способов и алгоритмов минимизации конфликтных ситуаций (коллизий) и механизмов их устранения. Достоинством сетей этого типа является простота управления. Эти сети имеют достаточно широкое распространение. Недостатками сетей со случайным доступом являются: отсутствие гарантии времени доставки сообщения или команды, рост конфликтных ситуаций с увеличением интенсивности потока информации в канале и трудность реализации приоритетного доступа абонента.

От указанных недостатков свободны сети с детерминированным доступом к общему каналу. В этих сетях общий канал распределяется между абонентами в детерминированные моменты времени по некоторым алгоритмам централизованным или распределенным способом. Алгоритм обычно основывается на временном разделении возможности доступа каждого из абонентов сети, т. е. на формировании временных «окон». При этом в каждом временном «окне» канал используется только парой связывающихся друг с другом абонентов. К такому методу доступа относится широко распространенный на практике метод последовательных передач («эстафетный», «жезлов», «маркеров»), при котором доступ к общему каналу предоставляется только тому абоненту, у которого в данный момент находится «маркер». После завершения сеанса связи держатель «маркера» передает его следующей станции. Недостатком этого метода является сложность разработки эффективного алгоритма захвата канала и передачи «маркера». В системах реального времени маркерный метод доступа имеет преимущество перед методом «состязаний». Это связано с тем, что механизм обнаружения и устранения конфликтов вносит в *LAN* со случайным доступом дополнительные задержки, что в таких системах нежелательно.

Централизованный способ управления каналом используется преимущественно в *SAN* и некоторых специализированных системах. Он характерен тем, что в сети выделяется один главный узел, который часто называют «мастером» или «диспетчером». Остальные узлы сети имеют статус «ведомого» (пассивный статус). Как правило, они не имеют права по своей инициативе осуществлять доступ к сети, за редким исключением аварийных ситуаций. Диспетчер-узел управляет всеми передачами в сети и контролирует появление коллизий. Достоинствами сетей с централизованным управлением доступом является максимальное упрощение программного и аппаратного обеспечения ведомых узлов. Недостатком, соответственно, — усложнение программного обеспечения диспетчера.

В некоторых сетях используется комбинированный метод. Например, при малых потоках информации используется случайный доступ, а при больших — один из вариантов детерминированного доступа. В некоторых типах *SAN*, например командно-информационных, комбинируется метод централизованного управления (в фазе передачи команды) и случайный доступ.

В *SAN* наиболее часто используется канал со случайным доступом. Существует несколько методов (правил) управления каналом со случайным доступом:

- «асинхронный» базовый метод;
- с синхронизацией путем тактирования моментов начала передач;

- контроль (прослушивание) занятости канала перед началом передач, который иногда называют правилом «слушай, прежде чем говорить»;
- контроль (прослушивание) канала во время передачи, который также называют «слушай, пока говоришь».

Эти методы (правила) могут использоваться либо по отдельности, либо в комбинации.

Самым простым по реализации является базовый «асинхронный» метод, однако он обеспечивает самый низкий коэффициент использования канала, не превышающий 18 %. При этом методе узлы сети могут осуществлять доступ к сети в произвольные моменты времени, соответственно даже при небольшом количестве узлов очень велика вероятность наложения нескольких передач. Следует отметить, что информация в локальных сетях передается блоками фиксированной или переменной длины, которые имеют детерминированную структуру и наиболее часто называются фреймами (*frame*) или кадрами. Принимающий узел проверяет принятый фрейм обычно по контролирующей последовательности или контрольной сумме, передаваемым в конце фрейма. В случае безошибочного приема фрейма принимающий узел отправляет передающему узлу подтверждение правильности приема в виде фрейма «квитанции». В случае наличия искажений данных в принятом фрейме передается фрейм ошибки. Время передачи ответного фрейма обычно ограничено. Если передающий узел не получил ответный фрейм в отведенное время, он производит еще некоторое количество попыток передачи фреймов с данными. В таких сетях каждый узел имеет свой адрес, для него определено время задержки передачи ответа и количество попыток. Если ни одна из отведенных попыток не завершилась успешно, виртуальный канал объявляется дефектным и закрывается [26].

Второй метод позволяет повысить коэффициент использования примерно в два раза и достичь 37 %. Метод заключается в том, что в канал через определенные равные промежутки времени передаются тактовые импульсы, а любой узел может начинать передачу только в момент появления этого импульса. Во всем остальном принцип обмена по сети такой же, как у предыдущего метода.

Использование третьего правила «слушай, прежде чем говорить» позволяет достичь примерно 80 %. Метод (правило) основывается на том, что узел, желающий осуществить доступ к каналу, сперва контролирует наличие передачи в канале, и если «чужая» передача обнаружена, ожидает ее завершения. Конфликт фреймов в этом случае может произойти только тогда, если два (или несколько) узлов одновременно, не обнаружив передачи в канале, начнут свои передачи. Недостатком этого метода является то, что если несколько узлов начали свои передачи, они их продолжают до конца, т. к. они не контролируют искажения информации во время передачи.

Этот недостаток устраняется при четвертом методе, который отличается от третьего тем, что собственная передача фрейма контролируется самим узлом-передатчиком в момент передачи. Если узел обнаруживает искажение передачи, он ее прерывает и пытается повторить снова.

Комбинация двух последних методов чрезвычайно эффективна и позволяет использовать 95—98 % пропускной способности канала.

Многие фирмы, разработавшие *LAN*, предлагают свои спецификации протоколов сети в качестве стандартов.

Протоколы сети указывают, что и как должны делать узлы сети для осуществления связи. В частности, протоколы определяют такую важную характеристику сети, как формат кадра передаваемого сообщения. Обычно фрейм имеет преамбулу (признак начала фрейма) и ряд полей (байтов, слов и т. п.), содержащих информацию об адресе передатчика, адресе приемника, длине фрейма, иногда скорости передачи, собственно данных и контрольной сумме. Длины фреймов у различных сетей сильно отличаются. От длины фрейма и его структуры достаточно сильно зависит такой важный параметр, как максимальная производительность сети, под которой обычно понимается предельно возможное количество полных циклов обмена в сети без учета возможных коллизий в единицу времени.

В табл. 1.2 приведены форматы фреймов некоторых из первых известных *LAN*.

Таблица 1.2

Название сети	Преамбула, байт	Адрес приемника, байт	Адрес источника, байт	Поле команды, байт	Поле типа фрейма, байт	Поле длины фрейма, байт	Поле данных, байт	Контрольная сумма, байт
NBS (1975)	1	1	8	1–2	–	*	0–128	2
Ethernet (1976)	1	1	8	–	–	–	0–500	2
Xerox (1980)	4	6	48	2	*	–	46–1500	2
DIX (1980)	8	6	48	2	–	*	46–1500	4
Proway (1981)	1	1	8	1	*	+	1–20	2
IEEE Proj 802 (1981)	1–4	1–2	8–56	1–7	1–7	*	0–20	4
DIX (1981)	4	8	64	–	+	*	46–1024	4

Приведенный список постоянно пополняется. Разрабатываются все новые и новые сети. К настоящему моменту в мире насчитывается уже несколько тысяч типов *LAN* и интерфейсов *DCS*. Достаточно глубоко описаны такие *LAN*, как *ETHERNET*, *RING*, *FIBRENET*, *FIELDBUS*, *PROFIBUS*, *LONWORKS*. Также хорошо описаны интерфейсы распределенных систем управления *DCS*, таких как: *PROWAY*, *IPM*, *BITBUS*, *MAP*, *MIL-1553*, *MIL-1773*, *RS422*, *RS485*, *CAN*.

1.4. Основные понятия о системах малой автоматизации

В предыдущих разделах мы ознакомились с основными понятиями о распределенных системах управления *DCS* и малых локальных сетях *LAN*. Эти понятия достаточно близки, т. к. практически все современные *DCS* реализуются на основе малых и средних *LAN*, соответственно они имеют перекрывающиеся признаки и области применения.

Системами малой автоматизации — *SAS* называются малые распределенные системы управления или контроля (*DCS*), реализованные на основе специализированных малых и средних локальных сетей (*SAN*), ориентированные на работу в режиме реального времени (*Real Time*). Первостепенными качествами систем малой автоматизации считаются низкая себестоимость, обеспечение режима реального времени, относительно простое проектирование, модернизация и эксплуатация, относительно простое программное и аппаратное обеспечение в сочетании с достаточно высокой надежностью.

Эти системы широко применяются для автоматизации небольших технологических, измерительных, исследовательских систем (обычно территориально расположенных в пределах одного помещения), а в последнее время и для автоматизации домашнего хозяйства.

Рассмотрим основные факторы, способствующие развитию этих систем:

1. Постоянное снижение цен на персональные компьютеры (*PC*) при значительном повышении их вычислительной мощности и надежности привело к тому, что стало экономически выгодным использование *PC* на верхнем уровне управления даже очень простых *SAS*. При этом оптимально решаются проблемы визуализации, хранения и документирования данных системы.

2. Быстрое развитие высокопроизводительных и дешевых *x51*-совместимых микроконтроллеров фирм *Cygnal* и *Atmel* и семейства *AVR* фирмы *Atmel*. Эти микроконтроллеры характеризуется высокой производительностью, соизмеримой с производительностью *i386*-компьютеров, а некоторые из новых микроконтроллеров фирмы *Cygnal* (семейства *F12x*) даже достигают производительности *5x86*- и *PII*-компьютеров. Эти микроконтроллеры имеют очень мощный набор периферийных узлов, большие объемы памяти программ, они ориентированы на работу в сложных условиях эксплуатации, имеют высокопроизводительные последовательные каналы передачи данных *UART*. Многие из них имеют также встроенные многоканальные аналого-цифровые преобразователи *ADC* (*Analog-to-Digital Convertor*) и несколько встроенных цифроаналоговых преобразователей *DAC* (*Digital-to-Analog Convertor*), аналоговые компараторы *CPT*, охранные таймеры *WDT* (*WatchDog Timer*), последовательные интерфейсы *SPI*, *SMBus* (*I2C*), *CAN* и т. п. Перечисленные достоинства современных микроконтроллеров позволяют создавать на их базе мощные малогабаритные универсальные локальные контроллеры управления и измерения (которые часто называют универсальными технологическими контроллерами), которые при этом имеют достаточно низкую стоимость и относительно простую аппаратную реализацию.

3. Наблюдаемая в последнее десятилетие глобальная тенденция к реструктуризации крупных производственных и научных учреждений и созданию на их основе малых производственных фирм и научно-исследовательских центров повышает актуальность создания малых систем автоматизации. А снижение или полное прекращение во многих странах объемов централизованного финансирования автоматизации производства и научных исследований приводит к тому, что *SAS*, обладающие более низкой первоначальной стоимостью и высокой гибкостью, чем большие универсальные *DCS*, становятся экономически все более выгодными и оправданными.

4. Развитие сетевых технологий и создание новых типов *SAN*, обладающих низкой стоимостью при высоких качественных показателях, специально ориентированных на работу в составе *SAS*, также способствует их быстрому развитию. Наиболее часто в современных *SAS* используются так называемые командно-информационные сети — *CI-LAN* (*Command — Information LAN*). Мы подробно ознакомимся с ними в одной из следующих глав, а сейчас только поясним смысл названия. Сети *CI-LAN* характеризуются тем, что имеют в своем составе только один персональный компьютер (или мощный специализированный контроллер, оснащенный полным комплектом периферийного оборудования), и некоторое количество универсальных (или специализированных) контроллеров — станций. Сеть работает по принципу опроса. Компьютер является инициатором всех обменов в сети, т. е. «ведущим» узлом. Он передает всем станциям фрейм команды, содержащий, в том числе, и адрес одной из станций. Все станции пассивны, т. е. работают в режиме «ведомого». Они не имеют права инициализировать обмены в сети (за исключением аварийных ситуаций). Они принимают и анализируют фрейм команды, но только одна из них, адрес которой совпал с адресом фрейма, выполняет предписанные командным фреймом действия и либо сообщает компьютеру о выполнении команды, либо передает в него полученные данные. Таким образом, полный цикл обмена состоит из команды и ответной информации, отсюда и термин — командно-информационные сети. Этот тип *SAN* обладает всеми требуемыми качествами для создания малых систем автоматизации и находит в последнее время широкое применение.

Типовая структура современных систем малой автоматизации, построенных с использованием *CI-LAN*, приведена на рис. 1.2.

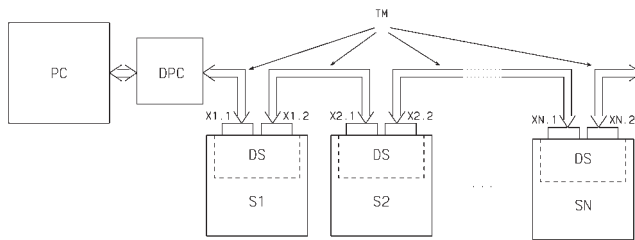


Рис. 1.2. Типовая структура современных систем малой автоматизации

Единственный в *SAS* персональный компьютер (*PC*) выполняет роль единственного в системе генератора заданий и получателя информации. Только он имеет право инициировать обмены информацией по сети. Кроме того, он получает всю предварительно обработанную информацию от N периферийных станций S_1, S_2, \dots, S_N (*Station 1...N*), которые не имеют право самостоятельного доступа к сети. Они только имеют право отвечать на поступившую команду. Исключением может быть случай аварийной ситуации в станции (станциях) или в обслуживаемой подсистеме объекта регулирования. Станции между собой соединяются с помощью кабелей с разъемами (обычно типа DB9) через параллельно соединенные пары разъемов X_1, X_2, \dots, X_N на каждой из станций $S_1,$

S_2, \dots, S_N . Каждая из станций в сети имеет индивидуальный номер, устанавливаемый на модификаторах (переключателях или перемычках) или записанный во Flash-памяти микроконтроллера. Соединение персонального компьютера может производиться к одной из станций непосредственно или через специальный узел диспетчера персонального компьютера *DPC (PC Dispatcher)* в зависимости от используемого количества станций N , необходимости преобразования интерфейсов (выходного интерфейса персонального компьютера в интерфейс сети) и оптической развязки. Кабельная часть сети называется сетевой средой — *TM (Transmission Medium)*. В каждой станции имеется узел, согласующий интерфейс микроконтроллера станции (обычно *UART*) с сетевой средой. Он обычно называется диспетчером станции *DS (Station Dispatcher)* или *MGT (Station Management)*.

Современные системы малой автоматизации *SAS* по количеству используемых станций подразделяются на три группы: малые (до 16—32 станций), средние (до 128—256 станций) и большие (свыше 256 станций) *SAS*. Большие *SAS* в виде сети одного уровня выполняются редко, ввиду ограниченной нагрузочной способности существующих последовательных интерфейсов. Чаще всего большие *SAS* либо являются сетью одного уровня с комбинацией интерфейсов, либо выполняются в виде многоуровневых сетей.

Условно структуру *SAS* можно разбить на два уровня. Первый верхний уровень — уровень организации командно-информационных сетей *CI-LAN*. Второй нижний уровень — уровень организации станций, в качестве которых используются так называемые универсальные технологические контроллеры. Каждому из этих уровней будет посвящена отдельная глава настоящей книги. Но прежде чем рассмотреть более подробно эти вопросы, давайте познакомимся с основными тенденциями развития и требованиями, которые предъявляются к современным *SAS*.

Практически во всех работах, посвященных архитектуре современных малых систем автоматизации производства и научных исследований, в качестве основных отмечаются тенденции *децентрализации, минимальной стоимости, простоты установки и эксплуатации, максимальной эффективности*. Рассмотрим эти понятия.

Современное понятие *децентрализации* системы предполагает и территориальное рассредоточение вычислительной системы, и разделение функции системы (измерений, первичной обработки и управления) на ряд слабосвязанных функций, и распределение этих функций между несколькими децентрализованными вычислителями. Таким образом, современные *децентрализованные* системы являются системами с множеством потоков команд и данных *MIMD (Multiply Instruction Multiply Data)*. С другой стороны, каждая из станций (сосредоточенный вычислитель) также может выполнять несколько слабосвязанных функций одновременно и состоять из нескольких слабосвязанных вычислителей, т. е. быть *мультимикрпроцессорной (MMPS)*.

Создание *децентрализованных* систем автоматизации производства и научных исследований в условиях малых производственных фирм и научно-исследовательских центров определяет в качестве одного из основных требований — требование *минимальной стоимости*.

Содержание

Введение.....	3
1. Системы малой автоматизации	5
1.1. Предпосылки создания систем малой автоматизации	5
1.2. Основные понятия о распределенных системах управления.....	9
1.3. Основные понятия о локальных вычислительных сетях	13
1.4. Основные понятия о системах малой автоматизации.....	18
2. Командно-информационные сети	26
2.1. Основные понятия	26
2.2. Диспетчеры персонального компьютера.....	29
2.3. Способы управления доступом к каналу сети RS485	39
2.4. Диспетчеры периферийных станций	47
2.5. Формат фреймов и общий алгоритм работы <i>CI-LAN</i>	51
2.6. Тестовая программа контроллера станции <i>CI-LAN</i>	57
3. Схемотехника универсальных технологических контроллеров.....	62
3.1. Предпосылки создания универсальных технологических контроллеров	62
3.2. Основные понятия и тенденции развития <i>TMCS</i>	63
3.3. Технические требования к главному микроконтроллерному модулю <i>TMCS</i>	69
3.4. Обобщенная функциональная схема центрального микроконтроллерного модуля	70
3.5. Супервизоры питания и охранные таймеры.....	73
3.6. Таймеры реального времени	83
3.7. Устройства ввода / вывода и расширения	95
3.8. Аналого-цифровые преобразователи <i>ADC</i>	105
3.9. Цифроаналоговые преобразователи.....	119
4. Проектирование систем малой автоматизации	149
4.1. Выбор микроконтроллеров для систем малой автоматизации	149
4.2. Эволюционный контроллер.....	172
4.3. Вариант универсального контроллера.....	178
4.4. Мощный универсальный технологический контроллер на микроконтроллере <i>Cygnal</i>	183
4.5. Универсальная «слотовая» система сбора данных на микроконтроллерах фирмы <i>Cygnal</i>	187
4.6. Специализированные технологические контроллеры-фотодатчики	198
4.7. Базовая программа системы малой автоматизации	207
Список обозначений и сокращений	237
Литература.....	240