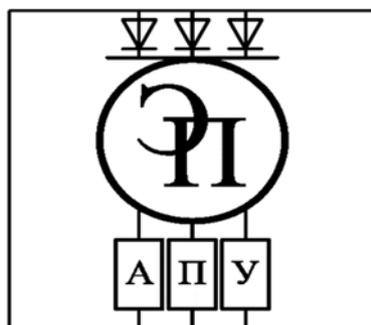


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация
промышленных установок»

СЕНСОРНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ РОБОТОВ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
15.04.06 «Мехатроника и робототехника»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2023

УДК 621.3.049.77
ББК 32.81
С75

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «2» сентября 2022 г., протокол № 2

Составитель О. А. Капитонов

Рецензент Е. В. Ильюшина

Методические рекомендации предназначены для студентов направления подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» очной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

СЕНСОРНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ РОБОТОВ

Ответственный за выпуск

С. М. Фурманов

Корректор

Т. А. Рыжикова

Компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

Введение.....	4
1 Практическая работа № 1. Расчет и выбор контактных тензометрических датчиков	5
2 Практическая работа № 2. Расчет и выбор фотоэлектрических датчиков.....	10
3 Практическая работа № 3. Расчет и выбор бесконтактных тактильных датчиков.....	13
4 Практическая работа № 4. Расчет и настройка системы технического зрения.....	17
5 Практическая работа № 5. Проектирование распределенной системы управления	24
6 Практическая работа № 6. Обеспечение связи информационной системы с распределенной системой управления	29
Список литературы	42

Введение

Целью дисциплины является изучение информационных датчиков и систем, тактильных систем осязания, систем технического зрения, организации взаимосвязи информационной системы с распределенной системой управления.

Достижение этой цели обеспечивается всем комплексом учебных занятий по дисциплине: лекционным курсом, лабораторным практикумом, циклом практических занятий, а также самостоятельной работой.

В результате освоения учебной дисциплины студент узнает особенности создания и использования информационных датчиков и систем, тактильных систем осязания, систем технического зрения; научится применять полученные знания при создании робототехнических систем с техническим зрением, тактильных систем осязания; овладеет навыками анализа и синтеза современных робототехнических систем в соответствии с заданными техническими требованиями.

1 Практическая работа № 1. Расчет и выбор контактных тензометрических датчиков

Цель работы: освоить методику расчета и выбора контактных тензометрических датчиков для применения в робототехнических системах.

1.1 Индивидуальное задание к практической работе

1.1.1 Выполнить расчет измерительного моста с тензометрическим датчиком. Исходные данные для расчета выдаются преподавателем.

1.1.2 Произвести выбор тензодатчика для полученных при выполнении п. 1.1.1 исходных данных по методике, описанной в подразделе 1.2.

1.2 Расчет мостовой схемы с контактными тензометрическими датчиками

Расчет мостовой схемы с тензодатчиками выполняется на основе следующих исходных данных: максимальное усилие F ; чувствительность S_δ ; сопротивление датчика S_δ ; сопротивление измерительного прибора, или входное сопротивление усилителя, R_{np} ; допустимый ток элементов схемы I ; размеры испытуемой детали и модуль упругости E ее материала.

Эскиз крепления тензодатчика на консольной балке шириной b и толщиной h показан на рисунке 1.1.

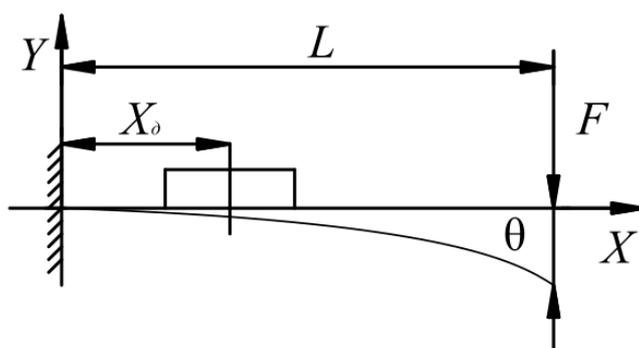


Рисунок 1.1 – Крепление тензодатчика на консольной балке

Расчет выполняется в такой последовательности.

Прогиб балки под действием силы F , приложенной на расстоянии L от места закрепления,

$$\theta = \frac{-F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot J}, \quad (1.1)$$

где J – осевой момент инерции, $J = \frac{b \cdot h^3}{12}$.

Относительное удлинение балки

$$\lambda = \frac{6 \cdot L \cdot F}{E \cdot b \cdot h^2}. \quad (1.2)$$

Относительное изменение сопротивления датчика

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} = S_{\delta} \cdot \lambda. \quad (1.3)$$

Общая чувствительность измерения

$$S_{uz} = \frac{\Delta \alpha}{R \cdot \varepsilon}. \quad (1.4)$$

где $\Delta \alpha$ – используемая шкала прибора. Желательно использовать всю шкалу прибора, что позволит полностью реализовать точность измерительного прибора.

Необходимая чувствительность мостовой схемы:

– для схемы с двумя датчиками

$$S_{cx} = \frac{S_{uz}}{2 \cdot S_{np}}; \quad (1.5)$$

– для схемы с четырьмя датчиками

$$S_{cx} = \frac{S_{uz}}{4 \cdot S_{np}}, \quad (1.6)$$

где S_{np} – чувствительность измерительного прибора.

Затем по методике находим функцию коэффициентов m , n , q , которые выражают соотношение сопротивлений плеч моста и измерительного прибора:

$$f(m, n, q) = \frac{S_{cx} \cdot R_{\delta}^2}{U}. \quad (1.7)$$

Определяем коэффициенты q и m : $q = R_{np} / R_{\delta}$; $m = 1$ (для двух датчиков).

Необходимое значение коэффициента n находим по номограмме, построенной для полученных значений q и m . Полученное значение чувствительности сопоставляется с формулой (1.7), и решается вопрос об использовании всей шкалы прибора.

Значение коэффициента n не должно превышать определенного предела, при котором ток не превышает допустимого значения при напряжении питания мостовой схемы U .

При измерении динамических деформаций частота питания должна быть в 5–10 раз выше частоты измеряемой деформации. При измерении деформаций частотой более 1 кГц мост обычно питают постоянным током.

Если невозможно обеспечить требуемую точность измерения, то применяют методы тарировки (градуировки) измерительного прибора по образцовому прибору.

1.3 Порядок выбора тензометрических датчиков

Ниже приведено практическое руководство по выбору тензодатчика. Необходимо принять во внимание, что могут иметь место дополнительные технические обстоятельства или требования, которые не учитываются в приведенной методике, но которые могут кардинально повлиять на принятие решения по выбору тензодатчика.

Это руководство подходит только для систем, полностью поддерживаемых на датчиках нагрузки и систем с равномерно распределенными нагрузками, без большой асимметрии.

Это руководство не подходит для систем, в которых усилие передается с помощью рычагов, систем с большой асимметрией в распределении нагрузок или систем с накаткой грузов.

Чтобы выбрать или рекомендовать тензодатчик, необходимо ответить на следующие вопросы:

- какая нагрузка будет применена к тензодатчику (тип нагрузки и её размер);
- в какой среде он будет работать;
- специальные требования от заказчика.

Нагрузка, которая должна быть приложена к датчику, даст ориентир относительно номинальной нагрузки, на которую должен быть рассчитан тензодатчик. После этого мы сможем ограничить количество возможных моделей, из которых можно выбирать.

Выбор номинальной мощности.

Цель состоит в том, чтобы оценить реальную нагрузку на каждую опорную точку во всех условиях эксплуатации и на протяжении всего срока службы системы, включая экстремальные ситуации, и выбрать тензодатчик с подходящей номинальной нагрузкой и достаточным запасом прочности.

Емкость тензодатчика определяется следующим образом:

- собственная нагрузка конструкции весовой платформы: оцените «мертвую нагрузку» на конструкцию, например вес самого резервуара или бункера, включая все его элементы: трубы, насосы, двигатели, мешалки, изоляторы, нагревательные жидкости и аксессуары;
- вес продукта: максимальный диапазон весов или вес продукта;
- вес брутто: это собственный вес плюс вес продукта;
- количество опор N : это количество опор, на которых поддерживается весовая конструкция, резервуар или весы. Обычно имеет от 3 до 6 опор;
- теоретическая нагрузка на опору является результатом деления веса брутто на количество опор.

Выберите тензодатчик с номинальной нагрузкой, превышающей теоретическую нагрузку на опору, в соответствии с формулой

$$\text{Номинальная нагрузка тензодатчика} = k \cdot x \text{ Вес брутто} / N, \quad (1.8)$$

где k имеет значение от 1,25 до 2,2. Это коэффициент безопасности, который увеличивает значение номинальной нагрузки от 25 % до 120 % от теоретического значения в зависимости от наличия факторов дополнительной нагрузки, таких как статические или динамические нагрузки, вибрация, асимметрия, ветровая нагрузка, наличие ударов или качения. Хорошим выбором для статических нагрузок в закрытых резервуарах является использование $k = 1,5$ и округление номинальной нагрузки в большую сторону.

Примеры наиболее распространенных значений k :

- емкость на трёх опорах внутри помещения $k = 1,3$;
- емкость на четырех опорах внутри помещения $k = 1,5$;
- перемещаемая емкость с ограниченной скоростью $k = 1,7$;
- платформенные весы на четырех тензодатчиках $k = 1,8$;
- мостовые весы для взвешивания грузовых автомобилей на 6 или 8 тензодатчиках $k = 2$.

Примечание – Если «мертвая нагрузка» составляет более 50 % от полной массы, рекомендуется увеличить запас прочности до $k = 2$, т. к. обычно это связано с установленными большими двигателями, дополнительными принадлежностями или системами отопления, и весьма вероятно, что существуют нецентрированные и неравномерные нагрузки на опорные точки.

Примечание – После установки важно проверить распределение нагрузки для каждой точки. Как правило, увеличение более чем в 2 раза коэффициентом запаса не приводит к потере точности измерения веса. Этот случай часто встречается в весах, и единственное, что нужно иметь в виду, это то, что необходимо проверить чтобы чувствительность используемого электронного индикатора достаточна.

Защита от воздействия окружающей среды.

Очень часто существуют различные модели тензодатчиков с одинаковой номинальной емкостью, и поэтому следует выбирать наиболее подходящие для конкретных условий окружающей среды:

- для агрессивных сред или при наличии постоянной влажности рекомендуется использовать тензодатчики из нержавеющей стали вместо алюминия или никелированной стали;
- степень защиты от воздействия окружающей среды возрастает при выборе герметично закрытых тензодатчиков со сварным корпусом;
- для потенциально взрывоопасных сред также существуют специальные датчики нагрузки.

Следует также учитывать необходимость дополнительных требований безопасности, например в сейсмоактивных зонах или в климатических зонах с сильными ветрами.

Дополнительные факторы, влияющие на выбор тензодатчика.

Попробуйте ответить на следующие вопросы и при необходимости скорректировать номинальную нагрузку тензодатчика:

- совпадает ли расчетное значение «мертвой нагрузки» с её реальным значением;
- может ли нагрузка распределяться неравномерно;
- есть ли колебания или накаты;
- возможно ли, что емкость имеет большую вместимость и может переполниться, превысив, таким образом, расчетный вес;
- есть ли вероятность сильных ветров или землетрясений в этом районе;
- может ли автомобиль воздействовать на систему или перегружать ее;
- можете ли вы произвести выравнивание плоскости установки датчиков, чтобы получить одинаково распределенную нагрузку на каждую опорную точку?

Общий порядок подбора тензодатчика:

– выберите правильную номинальную нагрузку датчика, которая должна быть выше максимальной нагрузки, действующей в установке. Не загружайте их сверх номинальной нагрузки;

– выберите модель тензодатчика, подходящую для применения в используемых условиях окружающей среды;

– имейте в виду, что датчик силы – это чувствительный элемент как электрически, так и механически. Его выбор и установка должны выполняться только профессионалами;

– примите меры предосторожности для безопасности системы. Не допускайте, чтобы безопасность людей или вещей зависела от механических свойств или сигналов тензодатчика. Правильно увеличивайте необходимые зазоры и используйте внешние элементы безопасности, которые вы считаете необходимыми;

– используйте узлы встройки тензодатчиков, разработанные производителем;

– собирайте весоизмерительную систему из элементов и/или аксессуаров на чистой, ровной, твердой и прочной поверхности;

– разработайте подходящие элементы защиты от механических перегрузок, защиты электропроводки, например от грызунов и любых других рисков;

– избегайте перепадов температур в датчике веса. Температура должна быть стабильной по всему корпусу датчика. Если поблизости есть источник тепла, изолируйте его с помощью теплоизолирующих пластин, чтобы уменьшить передачу или излучение тепла в любую часть датчика;

– не держите тензодатчик за провод и не тяните за него. Правильно защитите провода в установке;

– защищайте весы и датчик от ударов.

Возвращение тензодатчика в исходное положение после снятия груза с платформы должно быть надлежащим образом защищено от ударов;

– не открывайте тензодатчики и не пытайтесь их отремонтировать;

– не выполняйте сварочные работы рядом с тензодатчиками;

– следите за чистотой места установки датчика;

– нужно иметь в установке подходящую дренажную систему, чтобы избежать затопления датчиков в течение длительного времени. Ни тензодатчики, ни провода нельзя погружать в воду на длительное время;

– не допускайте растяжения ячеек и не подвергайте их силе скручивающих моментов, отличных от тех, которые существуют в основном направлении измерения;

– используйте стабильный и бесшумный блок питания. Не подавайте на датчики более высокое напряжение, чем рекомендовано, и не допускайте их электрической импульсной перегрузки;

– не устанавливайте для электронного оборудования более высокую разрешающую способность измерений, чем доступно для тензодатчика, или более высокое, чем необходимо для пользователя;

– не превышайте пределы спецификации весоизмерительного датчика или его принадлежностей, а также обычных практик отрасли.

Контрольные вопросы

1 Изложите принцип работы контактного тензометрического датчика.

2 Поясните назначение измерительного моста.

3 Изложите порядок расчета измерительного моста для тензометрического датчика.

4 Изложите общий порядок выбора тензометрического датчика.

2 Практическая работа № 2. Расчет и выбор фотоэлектрических датчиков

Цель работы: изучить методики расчета и выбора фотоэлектрических датчиков.

2.1 Индивидуальное задание к практической работе

2.1.1 По методике, описанной в подразделе 2.2, произвести выбор фотоэлектрических датчиков (ФД) для решения задачи, поставленной преподавателем.

2.1.2 Составить описание системы, использующей выбранные фотоэлектрические датчики. Описание должно включать в себя:

– функциональную схему системы с подключенными датчиками;

– эскизный чертеж системы, показывающий расположение и места установки фотоэлектрических датчиков;

– описание выбранной модели фотоэлектрических датчиков, их технических характеристик;

– описание интерфейса подключения выбранных датчиков к системе управления.

2.2 Порядок выбора фотозлектрического датчика

Начинаем с выбора питающих напряжений с учетом их изменений в установке. Возможно питание от источника постоянного тока 12...24 В (с нестабильностью до 10 %), источника постоянного тока 24 В (где возможен разброс от 18 до 30 В) – от выбора напряжения питания зависит выходное напряжение аналогового выхода.

Также питание может быть обеспечено от преобразователя переменного тока в постоянный, например, универсальные фотодатчики с питанием от 24...240 В АС/DC (разброс 20...264 В АС/DC).

С напряжением определились, далее подбираем необходимый нам тип датчика.

Рассмотрим первыми однолучевые световые барьеры. Они представляют собой парные датчики (один приемник, второй передатчик), разнесенные и направленные друг на друга. Главный плюс таких ФД – расстояние срабатывания можно найти исполнения до 60 м.

При выборе таких датчиков нужно учитывать наличие искусственной или естественной засветки фотодатчиков, т. к. они очень к ней критичны при попадании на приемник солнечного или другого света, и возможны ложные срабатывания.

Также высоки требования к месту установки: не должно быть сильных вибраций и колебаний конструкций, малейшие пульсации (особенно на большие расстояния) ведут к ошибкам.

По такому же принципу работают и щелевые датчики.

Второй тип – это датчики диффузного отражения. Улавливают отраженный от объекта луч света. Плюсы таких датчиков – это легкость настройки из-за видимого красного пятна (исключение ИК-датчики), которое мы настраиваем на объект обнаружения.

Минус таких датчиков – это малое расстояние срабатывания (очень мало фирм, выпускающих датчики на расстояние более 3 м). Если ФД будет использоваться в ограниченном пространстве или далее на пути луча за объектом обнаружения есть препятствие, то нужно использовать фотодатчики с подавлением заднего фона и обязательно учитывать это при выборе.

Нужно брать в расчёт и минимальное расстояние срабатывания таких датчиков, если объект будет слишком близко к ФД, он может его не увидеть или выдать ошибку, т. к. у таких датчиков имеется слепая зона (для датчиков с диагностикой, например IFM с IO-Link). Диффузионные датчики менее подвержены ложным срабатываниям из-за вибраций.

Третий тип фотозлектрических датчиков – рефлекторные датчики. Они улавливают отраженный луч от специального отражателя (рефлектора).

Принцип схож с диффузными, только отражение происходит не от объекта, а от специального отражателя. Приемник и излучатель, как и в диффузных датчиках, находятся в одном корпусе.

Плюс таких устройств – большие расстояния обнаружения, но меньше, чем у однолучевых (до 35 м).

Следует отметить, что рефлектору не требуется дополнительное питание, но он больше подвержен загрязнению из-за большой площади по сравнению с самим датчиком.

При установке надо обратить внимание на вибрации и колебания места крепления как самого фотоэлектрического датчика, так и рефлектора.

Итак, выбрали необходимый нам тип ФД, определяем тип срабатывания.

Типы срабатывания фотодатчиков и виды сигнала на выходе.

Фотоэлектрические датчики по виду срабатывания бывают двух типов, которые срабатывают:

- 1) на затемнение (появление объекта – сигнал);
- 2) на свет (отсутствие объекта – сигнал).

По этому принципу датчик выбирается по задаче. Многие современные датчики имеют на корпусе переключатель режима работы.

Рассмотрим выходы ФД.

Они бывают:

- по проводимости PNP или NPN;
- по исходному состоянию выходов NO, NC или NO/NC;
- PNP – сигнал: датчик выдает положительную единицу относительно питающего минусового провода;
- NPN – сигнал: датчик выдает отрицательный потенциал относительно питающего плюсового провода;
- NO (Normal Open или нормально открытый) сигнал означает, что сигнал на выходе ФД появится при его срабатывании. В нормальном состоянии на выходе ноль;
- NC (Normal Closed или нормально закрытый) сигнал означает, что сигнал на выходе есть всегда, когда он не сработал, т. е. в нормальном состоянии на выходе 1.

Выбираем нужный типоразмер фотоэлектрического датчика.

Сейчас на сайте представлены различные варианты исполнения фотоэлектрических датчиков: цилиндрические, прямоугольники и т. д. Здесь нужно учитывать необходимые нам особенности установки ФД.

По способу подключения фотодатчики бывают:

- разъемные;
- с кабелем;
- с разъемом на кабеле.

При использовании ФД с разъемом нужно учитывать, что габаритный размер немного увеличивается, но появляется и ряд плюсов, например, при работе датчика в непосредственной близости с линиями высокого напряжения не будет никаких сбоев в работе, а также у него меньше цена и такой датчик проще менять.

Фотодатчик с кабелем имеет меньшие габариты, при выходе из строя кабеля можно заменить только кабель, а в случае разъема придется менять весь датчик.

Контрольные вопросы

- 1 Расскажите об основных вариантах конструкции фотоэлектрических датчиков.
- 2 Изложите принцип работы основных типов фотоэлектрических датчиков.
- 3 Какова область применения фотоэлектрических датчиков?
- 4 Какие типы выходного сигнала используются распространенными вариантами фотоэлектрических датчиков?

3 Практическая работа № 3. Расчет и выбор бесконтактных тактильных датчиков

Цель работы: изучить методики расчета и выбора бесконтактных тактильных датчиков.

3.1 Индивидуальное задание к практической работе

3.1.1 По методике, описанной в подразделе 3.2, произвести выбор бесконтактных тактильных датчиков для решения задачи, поставленной преподавателем.

3.1.2 Составить описание системы, использующей выбранные фотоэлектрические датчики. Описание должно включать в себя:

- функциональную схему системы с подключенными датчиками;
- эскизный чертеж системы, показывающий расположение и места установки фотоэлектрических датчиков;
- описание выбранной модели фотоэлектрических датчиков, их технических характеристик;
- описание интерфейса подключения выбранных датчиков к системе управления.

3.2 Выбор типа бесконтактного датчика

Бесконтактный датчик, также называемый детектором, позволяет обнаруживать присутствие объекта в непосредственной близости без необходимости прикасаться к нему. Для обнаружения наличия или отсутствия объекта используются главным образом следующие типы датчиков:

- индуктивные;
- емкостные;
- магнитные;
- ультразвуковые;
- оптические.

Чтобы правильно выбрать бесконтактный датчик, необходимо ответить на следующие вопросы:

- каким является обнаруживаемый объект: твердым, жидким, гранулированным, металлическим и т. д.;
- каково расстояние между датчиком и объектом;
- какую форму имеет обнаруживаемый объект?

В таблице 3.1 приведены основные характеристики различных типов бесконтактных датчиков.

Таблица 3.1 – Типы бесконтактных датчиков.

Технология	Индуктивный	Емкостный	Магнитный	Ультразвуковой	Оптический
Расстояние	< 80 мм	< 60 мм	< 100 мм	< 15 м	< 200 м
Цена	30...200 евро	100...200 евро	20...120 евро	200...1000 евро	60...300 евро
Материал	Металлические детали	Любые материалы	Магнитные детали	Любые материалы, в любой форме (твердые, жидкие и т. д.)	Детали с отображением от объекта

3.2.1 Преимущества выбора индуктивного бесконтактного датчика.

Индуктивные бесконтактные датчики наиболее широко представлены на рынке. Они содержат схему колебаний, которая генерирует электромагнитное поле. Они обнаруживают любую приближенную к ним металлическую деталь, т. к. на ней возникают индуцированные токи, что уменьшает колебания, эту информацию считывает датчик.

Основными характеристиками индуктивного датчика являются:

- его использование ограничено металлическими деталями;
- относительно низкое расстояние – до 80 мм, расстояние изменяется в зависимости от типа сплава;
- низкая цена – он стоит вдвое дешевле оптического датчика;
- прочный и устойчивый к жестким условиям окружающей среды, нечувствителен к ударам и вибрациям, к пыли и т. д.;
- частота переключения достаточно высокая (несколько килогерц), что позволяет контролировать прохождение деталей на высокой скорости даже при вращении;
- подвижные части не изнашиваются.

3.2.2 Применение индуктивных бесконтактных датчиков.

Индуктивные датчики находят применение в станках, машинах для текстильной промышленности, автомобильной промышленности, на сборочных линиях и т. д. Они используются для обнаружения металлических деталей в трудных условиях и при необходимости контроля быстро движущихся деталей.

3.2.3 Преимущества выбора емкостного бесконтактного датчика.

Принцип работы емкостных бесконтактных датчиков схож с принципом работы индуктивных датчиков. Электромагнитное поле генерируется конденсатором, расположенным на лицевой стороне датчика. Приближающийся объект изменяет интенсивность и частоту колебаний. В отличие от индуктивных датчиков, емкостные датчики обнаруживают не только металлические предметы, они предназначены для всех типов предметов и материалов любой формы (твердые, жидкие, вязкие, порошкообразные и т. д.).

Основными характеристиками емкостного датчика являются:

- низкое расстояние – меньше 60 мм;
- стоимость немного выше, чем у индуктивного датчика;
- используется для деталей любого типа и из любых материалов;
- способен обнаруживать предметы через неметаллические перегородки;
- чувствителен к влажности и плотным испарениям;
- широко используется для определения уровня (например, через пластиковые флаконы) и для обнаружения прозрачных материалов на небольшом расстоянии;
- не подвержен механическому износу, срок эксплуатации не зависит от интенсивности использования;
- подходит для промышленной среды (загрязнённая атмосфера);
- высокая производительность.

3.2.4 Применение емкостных бесконтактных датчиков.

Емкостные датчики применяются на упаковочных линиях, упаковочных установках и там, где уровень заполнения измеряется через пластиковые или стеклянные стенки.

3.2.5 Преимущества выбора магнитного бесконтактного датчика.

Известный также как датчик на эффекте Холла, этот датчик работает по принципу, аналогичному индуктивным датчикам. Магнитный бесконтактный датчик включает в себя металлическое стеклянное лезвие, которое намагничивается очень быстро в близком присутствии магнита и размагничивается быстро при отсутствии магнита. Магнитный детектор работает на большом расстоянии, учитывая его относительно небольшие размеры. Обнаруживаемая деталь должна иметь магнит или быть намагниченной.

Основные характеристики магнитного датчика:

- используется для намагниченных деталей или деталей с магнитом;
- низкая цена;
- позволяет обнаружить предметы через неферромагнитный барьер;
- устойчивый к вибрациям и загрязнениям;
- не изнашивается;
- гальваническая развязка может быть рассмотрена между измеряемым объектом и цепью.

3.2.6 Преимущества выбора ультразвукового бесконтактного датчика.

Принцип работы ультразвуковых бесконтактных датчиков основан на излучении и приеме высокочастотных ультразвуковых волн (порядка 200 кГц). Возврат волны позволяет обнаружить присутствие объекта и измерить расстояние, на котором он находится (путем измерения времени, затрачиваемого волной для совершения круговой развязки). Эти ультразвуковые датчики могут использоваться для прямого обнаружения или в световой завесе.

Основные характеристики ультразвукового датчика:

- обнаруживает любые объекты (порошок, металл, твердые вещества, жидкие вещества, прозрачное стекло, пластик, картон, дерево и т. д.);
- работает на расстоянии нескольких метров (15 м);
- малочувствителен к окружающим условиям;
- время отклика ограничено скоростью распространения звука в воздухе;
- относительно высокая цена (от 200 до 1 000 евро),
- чувствителен к сквознякам и к температуре (от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- не обнаруживает звукопоглотители (вату, пену и т. д.).

3.2.7 Применение ультразвукового бесконтактного датчика.

Этот датчик, скорее, предназначен для решения очень специфических задач: обнаружение на большом расстоянии в трудных условиях, обнаружение прозрачных или сильно отражающих объектов и т. д.

Ультразвуковые датчики могут быть установлены, например, на конвейерах для обнаружения бутылок или упаковок. Они также используются при необходимости определить уровень жидкости (флаконы) или гранул (бункеры).

3.2.8 Преимущества выбора оптического бесконтактного датчика.

Этот датчик достаточно широко представлен на рынке. Его работа основана на оптическом принципе. Он обнаруживает предмет, когда световой пучок либо ослабляется, либо прерывается проходящим через него предметом. В зависимости от предмета, проходящего через световой пучок, и расстояния обнаружения возможны различные конфигурации:

- пресечение луча: передатчик и приемник отделены друг от друга;
- отражение: световой луч отражается от объекта и попадает на приемник;
- прямое отражение: когда свет просто отражается от объекта.

Чувствительные к загрязнениям, оптические бесконтактные датчики обладают важными преимуществами :

- обнаруживают любые предметы (включая прозрачные материалы);
- являются самыми мощными с точки зрения расстояния обнаружения: они обнаруживают объекты на расстоянии до 200 м.

3.2.9 Применение оптического бесконтактного датчика.

Оптические датчики используются для обнаружения деталей в текстильной промышленности, робототехнике, лифтах и общем строительстве. Они находят применение в погрузочно-разгрузочных работах и транспортировке. Они также

используются для задач, требующих обнаружения людей, транспортных средств или животных.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные типы бесконтактных датчиков.
- 2 Какова сфера применения бесконтактных датчиков?
- 3 Поясните принцип работы индуктивного бесконтактного датчика.
- 4 Поясните принцип работы емкостного бесконтактного датчика.
- 5 Поясните принцип работы магнитного бесконтактного датчика.
- 6 Поясните принцип работы ультразвукового бесконтактного датчика.
- 7 Поясните принцип работы оптического бесконтактного датчика.

4 Практическая работа № 4. Расчет и настройка системы технического зрения

Цель работы: изучить методики расчета и настройки системы технического зрения при решении задачи нахождения и отслеживания заданного объекта в поле зрения.

4.1 Индивидуальное задание к практической работе

4.1.1 Разработать проект системы технического зрения, осуществляющей поиск и отслеживание заданного объекта в поле зрения. Тип и характеристики объекта задаются преподавателем.

4.1.2 Составить описание разработанной системы, включающее в себя следующие вопросы:

- обзор распространенных вариантов реализации систем технического зрения;
- функциональная схема системы управления манипулятором на основе системы технического зрения;
- описание работы модуля выполнения контурного анализа;
- описание работы модуля расчета координат сервоприводов;
- описание алгоритма подстройки манипулятора;
- описание структуры исходных данных и получаемых результатов.

4.2 Распространенные варианты реализации систем технического зрения

Система технического зрения F250 фирмы «Энергоснаб», наряду с возможностями контроля, предоставленными в предыдущей системе фирмы F210, благодаря наличию в ней специальной быстродействующей схемы обладает возможностью сверхбыстрой локализации объектов. Наличие четырех портов

для подключения камер позволяет организовать одновременный контроль по нескольким параметрам в пределах одной системы. Через интерфейс Ethernet система F250 может обмениваться данными практически с любой компьютерной системой предприятия.

Достоинства данной системы:

- специальная быстросрабатывающая схема для ускорения инструментов контроля при решении задач, требующих повышенной скорости обработки;
- возможность подключения четырех камер;
- возможность локализации объекта в реальном времени;
- повышенная гибкость благодаря наличию операций ветвления и условных переходов;
- два гнезда для компактных карт флеш-памяти (CF) для хранения данных и ведения протокола;
- интерфейс Ethernet, 67 дискретных входов/выходов, RS232.

Характеристики системы:

- количество инструментов (режимов) контроля: 70 инструментов обработки;
- количество камер: четыре высокоскоростные с построчной разверткой;
- количество сценариев/банков: 32, расширяется с помощью флеш-карты (CF);
- количество инструментов (режимов) на сценарий: Ограничено только памятью / зависит от инструмента;
- интерфейс: RS232, 67 дискретных входов/выходов;
- сеть: Ethernet 10Base/T.

Учеными и инженерами ИМИТ СПбГПУ и ООО «Малленом» разработан универсальный математический аппарат и программные средства, обеспечивающие возможность калибровки и использования произвольного количество камер (два и более), работающих синхронно и наблюдающих одну и ту же сцену с различных позиций. Разработанные методы и алгоритмы анализа стереоизображений позволяют решать широкий круг задач в области автоматизированного контроля формы, геометрии и параметров движения наблюдаемых объектов.

Расположение видеокамер относительно объекта и схема их взаимодействия схематично приведены на рисунках 4.1 и 4.2.

Система технического зрения фирмы Omron – это система технического зрения серии F150-3, позволяющая быстро и четко сравнить изображение предмета с заданным изображением для задач контроля качества, идентификации, определения размеров и положения объектов.

Подключение двух камер к контроллеру осуществляется через адаптер, это позволяет не только одновременно получать изображения с обеих камер, но и соединять их в одно (режим вертикально-горизонтального редактирования). Диапазон применений F150-3 расширился за счет использования встраиваемых источников света с изменяемыми параметрами. Уровень освещенности и направление излучения этих моделей могут быть изменены через контроллер. Достоинства данной модели:

- до 11 входов и 21 выходов;
- память на 23 дефектных изображения;

- модели со сменным или постоянным объективом;
- настраиваемая скорость затвора;
- 256 градаций серого цвета для точных измерений менее 1 пикселя.

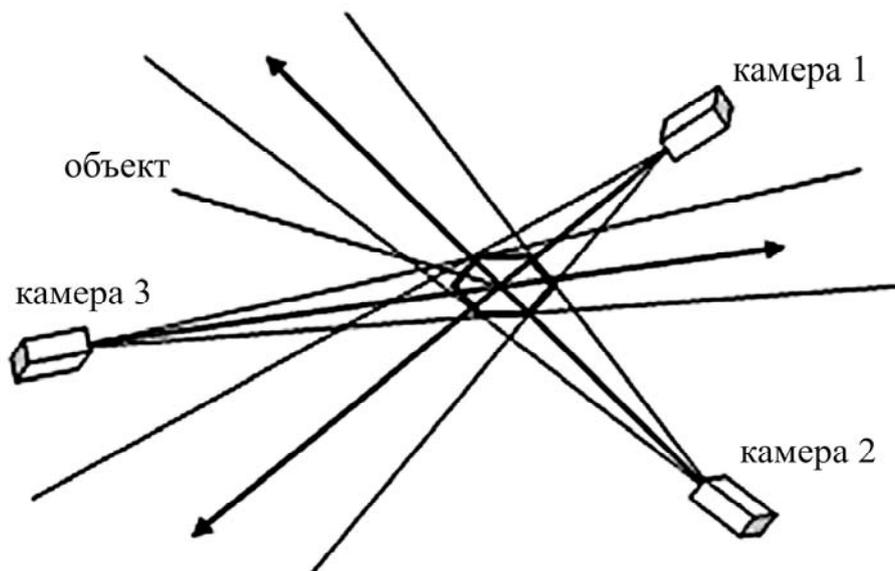


Рисунок 4.1 – Определение формы и положения объекта в пространстве

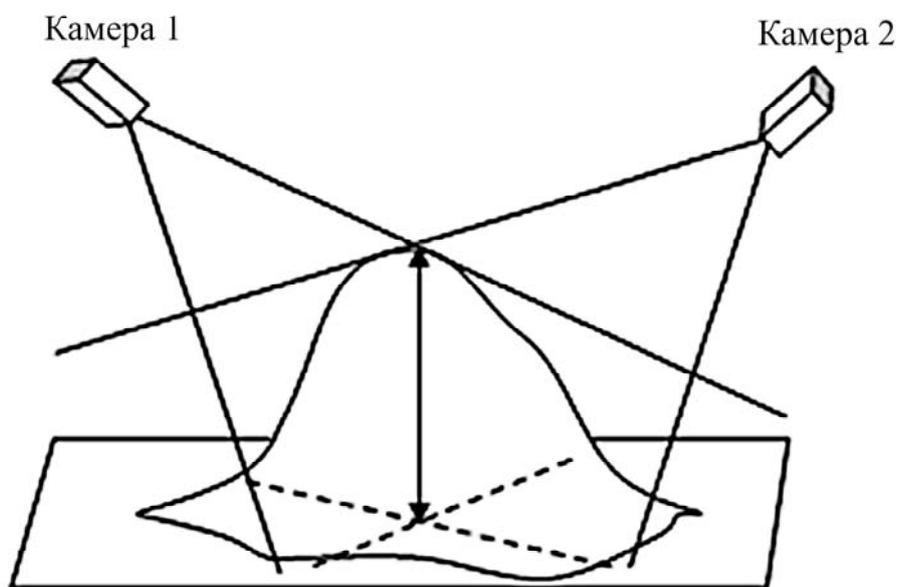


Рисунок 4.2 – Вычисление характеристик объекта

Характеристики F150–3:

- дистанция срабатывания 61...71 мм, 66...76 мм – определяется объективом;
- разрешение в пикселях 659×494 ;
- площадь охвата изображения 20×20 мм или 50×50 мм – определяется объективом;
- напряжение питания – 24 VDC.

Высокоскоростная система технического зрения F160.

Новая высокоскоростная система технического зрения также разработана фирмой Omron для решения наиболее сложных задач, касающихся контроля за производством продукции.

Система обладает быстродействием, достаточным для инспектирования высокоскоростных производственных линий, а использование карт памяти, способных хранить до 1024 изображений и возможность подключения нескольких камер позволяет применить F160 для линий, производящих много наименований одновременно. Система способна выполнять до 17 операций, что позволяет легко построить систему контроля качества нового поколения.

Достоинства данной модели:

- обработка до 32 участков одновременно;
- 13 дискретных входов и 22 дискретных выхода;
- автоматическое распознавание символов;
- работа с двумя камерами;
- упрощенная настройка;
- связь через RS232C;

Характеристики F160:

- модификации: F160-S1F160-SLC20; F160-SLC50;
- расстояние срабатывания – определяется объективом: 51...71 мм, 55...76 мм;
- площадь захвата рисунка – определяется объективом: 20 × 20 мм, 50 × 50 мм;
- разрешение в пикселях 512 × 484,;
- напряжение питания 24 VDC.

4.3 Общая структура системы управления манипулятором

На рисунке 4.3 представлена общая схема связей программного продукта.

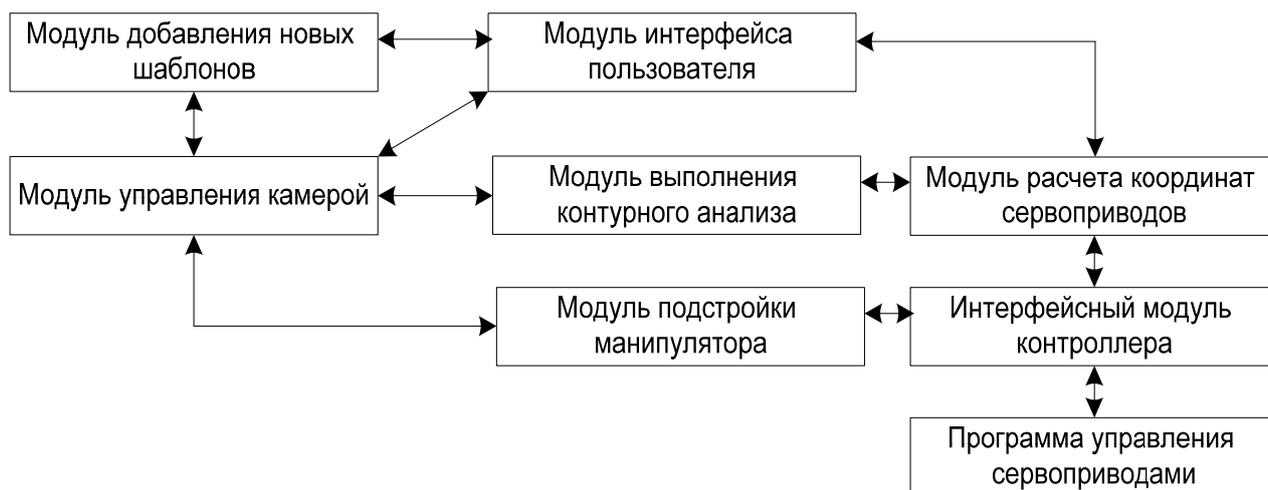


Рисунок 4.3 – Общая схема связей программного продукта

Модуль интерфейса пользователя позволяет задавать команды управления манипулятором, управлять шаблонами, а также настройками камеры.

Модуль управления камерой содержит функции начальной настройки камеры, получения изображения и его предварительной обработки.

Модуль выполнения контурного анализа отвечает за выполнение классификации объектов и определения их пространственного положения.

Модуль расчета координат принимает координаты, полученные в результате КА, и переводит их в координаты сервоприводов. Также координаты могут быть получены непосредственно от пользователя.

Модуль подстройки манипулятора в реальном режиме выполняет минимизацию погрешностей координат, полученных в результате расчетов.

Интерфейсный модуль контроллера выполняет настройку интерфейса между ЭВМ и управляющим контроллером, а также передачу данных.

Модуль добавления шаблонов позволяет сформировать новые классы шаблонов и сохранить их для дальнейшей работы.

Программа управления сервоприводами, выполняемая непосредственно контроллером, отвечает за принятие координат и формирование управляющих сигналов сервоприводов.

4.4 Описание работы модуля выполнения контурного анализа

Выполняются поиск замкнутых контуров объектов и добавление их в список. Затем список фильтруется по определенным параметрам (длина, площадь, ...). Для оставшихся объектов выполняется преобразование цепного кода Фримена в векторную форму для возможности дальнейшей обработки. Так как длина контуров разная и отличается от шаблонов, для дальнейшего сравнения необходимо выполнить эквализацию контуров. Предварительный отбор производится при сравнении АКФ-объектов с АКФ-контуров. Если совпадение найдено, то выполняется скалярное произведение векторов, по которым можно определить степень сходства и ориентацию объекта. Также вычисляются координаты центра объекта на изображении. Распознанные объекты помещаются в список для дальнейшей манипуляции ими, а нераспознанные сохраняются для дальнейшего просмотра с целью добавления их как новых объектов для распознавания.

4.5 Описание работы модуля расчета координат сервоприводов

Зная координаты верхнего левого угла изображения относительно центра основы манипулятора, а также размер видимого участка рабочей зоны, можно вычислить координаты объекта относительно робота. Полученные координаты X' , Y' и H используются для получения углов $\{f_0, f_1, f_2, f_3\}$.

Координаты X' , Y' находятся следующим образом:

$$X' = X + \frac{M'_n}{M_n} M_m; \quad (4.1)$$

$$Y' = Y - \frac{N'_n}{L_n} L_m, \quad (4.2)$$

где M_m, L_m – размер видимого участка рабочей зоны;
 M_n, L_n – формат кадра;
 X, Y – координаты верхнего левого угла изображения.

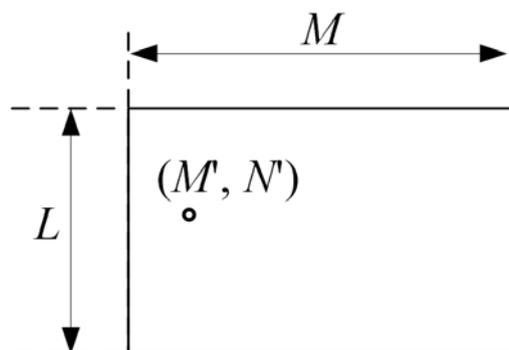


Рисунок 4.4 – Вычисление координат X, Y

4.6 Описание алгоритма подстройки манипулятора

На рисунке 4.5 представлен способ определения координат центра щупа (клешни) робота относительно центра координат.

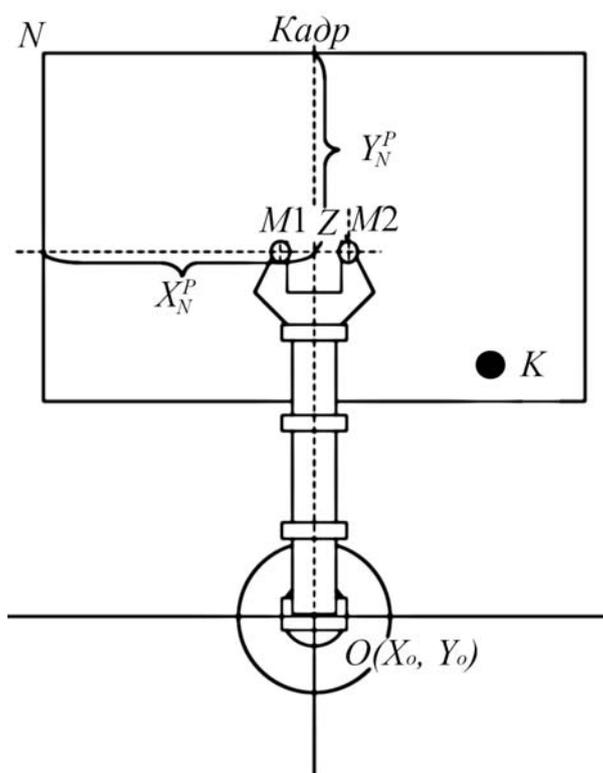


Рисунок 4.5 – Вычисление координат центра щупа относительно начала координат

$M1$ и $M2$ – центры ярко-зеленых маркеров на обоих пальцах щупа, их координаты вычисляются для нахождения координат точки Z между ними.

Координаты точки Z относительно нулевого сервопривода (начала координат) являются постоянными:

$$X_z^{mm,O} = 0, Y_z^{mm,O} = \text{const}. \quad (4.3)$$

Сначала вычисляются координаты точки Z относительно N – левого верхнего угла кадра (в пикселях):

$$Z(X_z^{p,N}, Y_z^{p,N}). \quad (4.4)$$

Далее кадр калибруется с помощью чёрного контура с известным периметром в миллиметрах. При нахождении этого же периметра в пикселях получаем коэффициент калибровки, т. е. определяем, сколько миллиметров приходится на 1 пиксель кадра:

$$k = p^{mm} / p^p. \quad (4.5)$$

После этого высчитываются координаты Z относительно N в миллиметрах

$$\begin{aligned} X_z^{mm,N} &= X_z^{p,N} k; \\ Y_z^{mm,N} &= Y_z^{p,N} k. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Координаты N относительно O – начала координат (нулевого сервопривода) в миллиметрах находятся по формулам

$$\begin{aligned} X_N^{mm,O} &= X_z^{mm,O} - X_z^{p,N} = -X_z^{p,N}; \\ Y_N^{mm,O} &= Y_z^{mm,O} + Y_z^{p,N}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Координаты центров всех остальных контуров также вычисляются сначала относительно N в пикселях, а потом относительно O в миллиметрах, на основании чего вычисляются углы поворотов сервоприводов по алгоритмам, приведённым выше.

4.7 Описание структуры исходных данных и получаемых результатов

Разрабатываемая система должна обеспечить работу с данными, представленными в числовом виде. В качестве входных данных система должна обеспечить возможность использования следующих:

- АКФ-шаблонов;
- описание контуров шаблонов в векторной форме;

- порог бинаризации изображения;
- координаты конечной траектории движения манипулятора;
- нижняя граница коэффициента сходства образа с шаблоном.

В качестве выходных данных система должна предоставлять следующие:

- уведомления системы;
- класс распознанного объекта;
- коэффициент сходства объекта;
- геометрические характеристики объекта;
- положение объекта в пространстве;
- бинаризованное изображение и общая картина расположения распознанных объектов.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите распространенные варианты реализации систем технического зрения.
- 2 Опишите алгоритм работы модуля выполнения контурного анализа.
- 3 Опишите алгоритм работы модуля расчета координат сервоприводов.
- 4 Опишите алгоритм подстройки манипулятора.
- 5 Опишите структуру исходных данных и получаемых результатов.

5 Практическая работа № 5. Проектирование распределенной системы управления

Цель работы: изучить методики проектирования распределенных систем управления робототехническими системами.

5.1 Индивидуальное задание к практической работе

5.1.1 Разработать проект распределенной системы управления, решающей поставленную преподавателем задачу.

5.1.2 Составить описание распределенной системы управления, в которой рассмотрены следующие вопросы:

- типовая структурная схема распределенной системы управления;
- требования к распределенной системе управления;
- сравнительный анализ моделей ПЛК для реализации распределенных систем управления;
- выбор контроллеров для реализации разрабатываемой системы управления.

5.2 Разработка типовой структуры распределенной системы управления

С ростом количества датчиков, увеличением площади территории, на которой расположена автоматизированная система, и усложнением алгоритмов управления становится более эффективным решением применение распределенных систем управления (PCY).

Распределенные системы состоят из множества территориально разнесенных контроллеров и модулей ввода-вывода. При таком подходе структура распределенной системы и структура алгоритма ее работы становятся подобны структуре самого объекта автоматизации, а функции сбора, обработки данных, управления и вычисления оказываются распределенными среди множества контроллеров.

Каждый контроллер работает со своей группой устройств ввода-вывода и обслуживает определенную часть объекта управления. Тенденция децентрализации управления и приближения контроллеров к объектам управления является общей для всех систем автоматизации. Кроме того, сосредоточенную систему можно представить как часть или частный случай распределенной, поэтому появление распределенных систем происходит вследствие естественного развития от частного к общему.

Распределённая система управления (PCY) (Distributed Control System, DCS) – система управления технологическим процессом, отличающаяся построением распределённой системы ввода-вывода и децентрализацией обработки данных.

PCY можно определить как систему, состоящую из множества устройств, разнесенных в пространстве, каждое из которых не зависит от остальных, но взаимодействует с ними для выполнения общей задачи.

В предельном случае элементы системы могут находиться на разных континентах земного шара, а связь между ними может выполняться через интернет.

В качестве «множества устройств» могут выступать любые микропроцессорные устройства, например, ПЛК или разнесенные в пространстве модули ввода-вывода одного контроллера. Однако в последнем случае только сбор данных можно рассматривать как распределенный, в то время как функция управления является сосредоточенной в одном контроллере.

5.3 Разработка требований к PCY, формулирование набора решаемых задач

Требования к современной PCY:

- отказоустойчивость и безопасность;
- простота разработки и конфигурирования;
- поддержка территориально распределённой архитектуры;
- единая конфигурационная база данных;
- развитый человеко-машинный интерфейс.

Задачи РСУ:

- соединение пользователей с ресурсами;
- прозрачность – свойство систем, которые представлены в виде единой компьютерной системы;
- открытость – система, предлагающая службы, вызов которых требует стандартные синтаксис и семантику;
- масштабируемость.

В итоге РСУ имеет следующие характеристики, отличающие ее от сосредоточенной:

- большее быстродействие благодаря распределению задач между параллельно работающими процессорами;
- повышенную надежность (отказ одного из контролеров не влияет на работоспособность других);
- большую устойчивость к сбоям;
- более простое наращивание или реконфигурирование системы;
- упрощенную процедуру модернизации;
- большую простоту проектирования, настройки, диагностики и обслуживания благодаря соответствию архитектуры системы архитектуре объекта управления, а также относительной простоте каждого из модулей системы;
- улучшенную помехоустойчивость и точность благодаря уменьшению длины линий передачи аналоговых сигналов от датчиков к устройствам ввода;
- меньший объем кабельной продукции, пониженные требования к кабелю и более низкая его стоимость;
- меньшие расходы на монтаж и обслуживание кабельного хозяйства.

Функциональное отличие РСУ от систем ПЛК+СКАДА заключается в следующем:

- база данных распределена между контроллерами, но выглядит единой с точки зрения инженера. Именно это свойство и заложено в название «РСУ»;
- операторский интерфейс тесно интегрирован в систему;
- интенсивная и обширная обработка тревог (алармов) и событий реализуется также без каких-либо усилий со стороны разработчика;
- возможность вести разработку конфигурации и вносить изменения онлайн, (то есть, не останавливая процесса управления);
- возможность менять отказавшее оборудование и расширять систему (добавлять новые узлы и платы) без отключения питания;
- глубокая диагностика от уровня операторского интерфейса до отдельного канала ввода/вывода без какой-либо настройки;
- возможность резервирования любого компонента системы (контроллер, модуль ввода/вывода, операторские станции) на аппаратном уровне и без какой-либо настройки программного обеспечения.

Все это, разумеется, делает начальную цену РСУ более высокой по сравнению с ПЛК плюс СКАДА, но на порядок снижает время разработки и внедрения.

5.4 Особенности контроллеров для распределенных систем управления

В связи с резким удешевлением микропроцессорной техники с одновременным повышением их надежности и характеристик, уменьшением их размеров и увеличением их функциональных возможностей появилось большое количество малогабаритных контроллеров и компьютеров, обладающих невысокой стоимостью.

Наличие развитых сетевых средств позволяет связывать эти контроллеры в единую сеть, причем различные узлы (контроллеры, интеллектуальные модули ввода-вывода, компьютеры) этой сети могут быть разнесены друг от друга на достаточно большие расстояния.

Такая распределенная архитектура системы управления обладает следующими достоинствами:

- высокая надежность работы системы. Четкое распределение обязанностей в распределенной системе делает ее работоспособной даже при выходе из строя или зависания любого узла;
- малое количество проводных соединений. Контроллеры имеют возможность работать в тяжелых промышленных условиях, поэтому они как правило, устанавливаются в непосредственной близости от объекта управления;
- легкая расширяемость системы. При появлении дополнительных точек контроля и управления достаточно добавить в системы новый узел (контроллер, интеллектуальный модуль ввода-вывода);
- малые сроки проведения модернизации;
- использование компьютеров и контроллеров меньшей мощности;
- легкость тестирования и отладки. Поскольку все элементы системы активны, легко обеспечить самодиагностику и поиск неисправности.

5.5 Сравнительный анализ моделей ПЛК для реализации распределенных систем управления

Учитывая специфику устройств, критерии оценки можно разделить на три группы:

- технические характеристики;
- эксплуатационные характеристики;
- потребительские свойства.

При этом критериями выбора считать потребительские свойства, т. е. соотношение показателей, затраты, производительность, надежность, а технические и эксплуатационные характеристики ограничениями для процедуры выбора. Кроме того, необходимо разделить характеристики на прямые (для которых положительным результатом является её увеличение) и обратные (для которых положительным результатом является её уменьшение). Так как характеристики между собой конфликтны, т. е. улучшение одной характеристики почти всегда приводит к ухудшению другой, необходимо для каждой характеристики K_i определить весовой коэффициент a_i , учитывающий степень влияния данной характеристики на полезность устройства.

Advantech. Контроллеры и модули ввода-вывода.

Тайваньская компания Advantech предлагает производит широкую линейку контроллеров и модулей ввода-вывода. Многофункциональные PC-совместимые устройства этой компании имеют широкие возможности и могут быть использованы как для простых задач автоматизации, так и для высокоответственных приложений с высоким быстродействием.

Существует две основные серии контроллеров Advantech – это APAX-5000 и ADAM-5000. APAX-5000 с открытой архитектурой, позволяющей использовать различные приложения, имеет высокоскоростной вычислительный процессор (APAX5570XPE/5571XPE), обеспечивая при этом гибкие функции ввода-вывода, повышающие масштабируемость системы. ADAM-5000 оснащены широким набором интерфейсов для связи, обеспечивающих гибкость коммуникационных соединений. Компания ICP DAS выпускает ПЛК и модули ввода-вывода широко известных в России серий I-7000, I-8000, uPAC, WinCon, WinPAC, XPAC, iPAC и т. д. Возможность применения более дешевых, отработанных и быстро развивающихся открытых архитектур на базе PC-совместимой платформы позволяет широко использовать изделия компании ICP DAS для задач, где раньше применялись только обычные PLC. Достоинствами контроллеров ICP DAS являются:

- невысокая цена PLC;
 - использование открытых протоколов;
 - простота программирования и доступность широкого спектра программного обеспечения;
 - простота интеграции с системами управления более высокого уровня.
- ПТК КОНТАР производства МЗТА ПТК КОНТАР предназначен для автоматического управления, сбора и передачи информации, а также дистанционного управления и диспетчеризации технологических процессов в ЖКХ и промышленности. КОНТАР обеспечивает сбор информации от разнообразных источников, используемых на объекте (датчики температуры, давления, расхода, тепло-, водо- и электросчетчики и т. п.), и передачу ее на верхний уровень. Возможно также и полностью автономное применение аппаратуры комплекса в виде отдельных модулей.

Комплекс построен на новейшей элементной базе и обеспечивает простой доступ к современным коммуникационным технологиям (подключение к сети Ethernet, передача информации по сотовой сети стандарта GSM/CDMA). КОНТАР может использоваться для решения многих задач также с помощью дополнения его оборудованием других производителей.

Контроллеры ОВЕН (ПЛК ОВЕН).

Компания ОВЕН уже более 15 лет производит широкий ряд приборов первичной автоматики. Компания ОВЕН в 2005 г. начала разработку управляющих контроллеров для широкого применения. В них использовалась современная элементная база и с самого начала закладывались мощные аппаратные ресурсы и широкие программные возможности. Для их программирования используется среда CoDeSys, разработанная немецкой компа-

нией 3S-Software. Кроме того, контроллеры ОВЕН могут программироваться с помощью интегрированной SCADA и SoftLOGIC системы MasterSCADA.

Контроллеры Сегнетикс.

Российская компания «Сегнетикс» (Segnetics) производит три линейки контроллеров. Первая линейка – SMH2010 – универсальные панельные контроллеры для автоматизации широкого спектра объектов в области ЖКХ, автоматизации зданий и промышленности. Вторая линейка предназначена для автоматизации систем вентиляции – Pixel. И, наконец, третья линейка – SMH 2G – второе поколение панельных ПЛК, предназначенных для автоматизации инженерных систем зданий и технологических процессов в промышленности.

ПЛК (PLC) производства Mitsubishi Electric.

Разработка и производство программируемых логических контроллеров является одним из приоритетных направлений деятельности компании Mitsubishi Electric в области промышленной автоматизации. Mitsubishi Electric предлагает широкий выбор ПЛК семейства MELSEC для задач управления любого уровня сложности. Оборудование Mitsubishi Electric может использоваться как на уровне управления отдельными технологическими единицами, так и на уровне управления технологическим процессом в целом. PLC Mitsubishi Electric отличаются исключительно высоким качеством, вариативностью и гибкостью решений, широкими возможностями применения, высоким быстродействием.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите типовую структурную схему распределенной системы управления.
- 2 Перечислите требования к распределенной системе управления.
- 3 Приведите сравнительный анализ моделей ПЛК для реализации распределенных систем управления.

6 Практическая работа № 6. Обеспечение связи информационной системы с распределенной системой управления

Цель работы: изучить методики проектирования распределенных систем управления, изучить основные виды промышленных сетей, изучить основные протоколы, применяющиеся в современных промышленных сетях.

6.1 Индивидуальное задание к практической работе

6.1.1 Разработать проект системы связи информационной системы, запущенной на персональном компьютере, с распределенной системой управления, включающей в себя от четырех до семи узлов на базе ПЛК (по заданию преподавателя), на основе протокола HART. В составе проекта необходимо представить:

- функциональную схему распределенной системы с соединением ее узлов в компьютерную сеть;
- описание сетевого протокола;
- перечень функций, выполняемых каждым узлом распределенной системы;
- перечень регистров, реализуемых каждым узлом распределенной системы управления;
- структуру базы данных информационной системы.

6.2.2 Разработать вариант системы по предыдущему пункту на основе протокола Modbus и промышленной сети RS-485.

6.2.3 Разработать вариант системы по предыдущему пункту на основе протокола CAN.

6.2.4 Разработать вариант системы по предыдущему пункту на основе протокола Modbus TCP и промышленной сети Ethernet.

6.2 Формирование требований к промышленной сети, обеспечивающей связь с распределенной системой управления

Обмен информацией между устройствами, входящими в состав автоматизированной системы (компьютерами, контроллерами, датчиками, исполнительными устройствами), происходит в общем случае через промышленную сеть (fieldbus, «полевую шину»).

Промышленные сети отличаются от офисных следующими свойствами:

- специальным конструктивным исполнением, обеспечивающим защиту от пыли, влаги, вибрации, ударов;
- широким температурным диапазоном (обычно от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- повышенной прочностью кабеля, изоляции, разъемов, элементов крепления;
- повышенной устойчивостью к воздействию электромагнитных помех;
- возможностью резервирования для повышения надежности;
- повышенной надежностью передачи данных;
- возможностью самовосстановления после сбоя;
- детерминированностью (определенностью) времени доставки сообщений;
- возможностью работы в реальном времени (с малой, постоянной и известной величиной задержки);
- работой с длинными линиями связи (от сотен метров до нескольких километров).

Промышленные сети обычно не выходят за пределы одного предприятия. Однако с появлением Ethernet и Internet для промышленных сетей стали применять ту же классификацию, что и для офисных:

- LAN (Local Area Network) – сети, расположенные на ограниченной территории (в цехе, офисе, в пределах завода);
- MAN (Metropolitan Area Networks) – сети городов;
- WAN (Wide Area Network) – глобальная сеть, охватывающая несколько городов или континентов. Обычно для этого используют Internet-технологии.

В настоящее время насчитывается более 50 типов промышленных сетей (Modbus, Profibus, DeviceNet, CANopen, LonWorks, ControlNet, SDS, Seriplex,

ArcNet, ВАСnet, FDDI, FIP, FF, ASI, Ethernet, WorldFIP, Foundation Fieldbus, Interbus, BitBus и др.). Однако широко распространенными является только часть из них. В России подавляющее большинство АСУ ТП используют сети Modbus и Profibus. В последние годы возрос интерес к сетям на основе CANopen и DeviceNet. Распространенность в России той или иной промышленной сети связана в первую очередь с предпочтениями и активностью российских фирм, продающих импортное оборудование.

В зависимости от области применения весь спектр промышленных сетей можно разделить на два уровня:

– контроллерные сети, которые решают задачи по управлению процессом производства, сбором и обработкой данных на уровне промышленных контроллеров;

– полевые или сенсорные сети, которые решают задачи опроса датчиков и управления работой разнообразных исполнительных механизмов).

Иногда полевые сети называют сетями низовой автоматике.

Для полевых сетей характерна передача небольшого объема данных на небольшие расстояния за короткое время.

Для контроллерных сетей наоборот характерна передача больших объемов данных за большие расстояния.

Поскольку в промышленной автоматизации сетевые интерфейсы могут быть неотъемлемой частью соединяемых устройств, а сетевое программное обеспечение прикладного уровня модели OSI выполняется на основном процессоре промышленного контроллера, то отделить сетевую часть от устройств, объединяемых в сеть, иногда физически невозможно. С другой стороны, смену одной сети на другую часто можно выполнить с помощью замены сетевого ПО и сетевого адаптера или введением преобразователя интерфейса, поэтому часто один и тот же тип ПЛК может использоваться в сетях различных типов.

Соединение промышленной сети с ее компонентами (устройствами, узлами сети) выполняется с помощью интерфейсов. Сетевым интерфейсом называют логическую и (или) физическую границу между устройством и средой передачи информации. Обычно этой границей является набор электронных компонентов и связанного с ними программного обеспечения. При существенных модификациях внутренней структуры устройства или программного обеспечения интерфейс остается без изменений, что является одним из признаков, позволяющих выделить интерфейс в составе оборудования.

Наиболее важными параметрами интерфейса являются пропускная способность и максимальная длина подключаемого кабеля. Промышленные интерфейсы обычно обеспечивают гальваническую развязку между соединяемыми устройствами. Наиболее распространены в промышленной автоматизации последовательные интерфейсы RS-485, RS-232, RS-422, Ethernet, CAN, HART, AS-интерфейс.

6.3 Выбор протокола для реализации связи информационной системы и распределенной системы управления

Протокол HART.

Протокол является открытым стандартом на метод сетевого обмена, который включает в себя не только протокол взаимодействия устройств, но и требования к аппаратуре канала связи, поэтому устоявшийся термин «протокол», означающий алгоритм взаимодействия устройств, применен здесь не совсем корректно. Стандарт HART был разработан в 1980 году фирмой Rosemount Inc., которая позже сделала его открытым. В настоящее время стандарт поддерживается международной организацией HART Communication Foundation (HCF), насчитывающей 190 членов (на декабрь 2006 г.). HART находит применение для связи контроллера с датчиками и измерительными преобразователями, электромагнитными клапанами, локальными контроллерами, для связи с искробезопасным оборудованием.

Несмотря на свое низкое быстродействие (1200 бит/с) и ненадежный аналоговый способ передачи данных, а также появление более совершенных сетевых технологий, устройства с HART-протоколом разрабатываются до сих пор и объем этого сегмента рынка продолжает расти. Однако применение HART в России довольно ограничено, поскольку внедрение датчиков с HART-протоколом требует одновременного применения HART-совместимых контроллеров и специализированного программного обеспечения. Типовой областью применения HART являются достаточно дорогие интеллектуальные устройства (электромагнитные клапаны, датчики потока жидкости, радарные уровнемеры и т. п.), а также взрывобезопасное оборудование, где низкая мощность HART-сигнала позволяет легко удовлетворить требованиям стандартов на искробезопасные электрические цепи.

Стандарт HART включает в себя 1, 2 и 7-й уровни модели OSI. Полное описание стандарта можно купить в организации HCF.

При создании HART-протокола в 1980 г. преследовалась цель сделать его совместимым с широко распространенным в то время стандартом «токовая петля», но добавить возможности, необходимые для управления интеллектуальными устройствами. Поэтому аналоговая «токовая петля» 4...20 мА была модернизирована таким образом, что получила возможность полудуплексного цифрового обмена данными. Для этого аналоговый сигнал $A(t)$ суммируется с цифровым сигналом $D(t)$, и полученная таким образом сумма передается с помощью источника тока 4...20 мА по линии связи. Благодаря сильному различию диапазонов частот аналогового (0...10 Гц) и цифрового (1200 и 2200 Гц) сигналов они легко могут быть разделены фильтрами низких и высоких частот в приемном устройстве. При передаче цифрового двоичного сигнала логическая единица кодируется синусоидальным сигналом с частотой 1200 Гц, ноль – 2200 Гц. При смене частоты фаза колебаний остается непрерывной. Такой способ формирования сигнала называется частотной манипуляцией с непрерывной фазой. Выбор частот соответствует американскому стандарту BELL 202 на телефонные каналы связи.

Сопротивление R_H выбирается так же, как и в токовой петле (стандартом предусмотрена величина 230...1100 Ом) и служит для преобразования тока 4...20 мА в напряжение. Акт взаимодействия устройств инициирует контроллер. Цифровой сигнал от источника напряжения E через конденсатор $C_{вч}$ подается в линию передачи и принимается на стороне датчика в форме напряжения в диапазоне от 400 до 800 мВ. Приемник датчика воспринимает HART-сигналы в диапазоне от 120 мВ до 2 В, сигналы от 0 до 80 мВ приемником игнорируются. Получив запрос, датчик формирует ответ, который в общем случае может содержать как аналоговый сигнал $A(t)_2$, так и цифровой ($D(t)_2$). Аналоговый сигнал обычно содержит информацию об измеренной величине, а цифровой – информацию о единицах и диапазоне измерения, о выходе величины за границы динамического диапазона, о типе датчика, имени изготовителя и т. п.). Аналоговый и цифровой сигнал суммируются и подаются в линию связи в форме тока. На стороне контроллера ток преобразуется в напряжение резистором R_H . Полученный сигнал подается на фильтр нижних частот с частотой среза 10 Гц и на фильтр верхних частот с частотой среза 400...800 Гц. На выходе фильтров выделяются цифровой сигнал $D(t)_2$ и аналоговый $A(t)_2$. При использовании фильтров второго порядка погрешность, вносимая цифровым сигналом в аналоговый, составляет всего 0,01 % от 20 мА.

Как и в обычной «токовой петле», источник тока в HART-устройстве может иметь внешний или встроенный источник питания. В частном случае HART-протокол может использовать только цифровой сигнал, без аналогового, или только аналоговый сигнал 4...20 мА, без цифрового.

В случае, когда ведомым устройством является не датчик, а исполнительное устройство (например, электромагнитный клапан), аналоговый сигнал в форме тока должен передаваться от ведущего устройства к ведомому и источник тока должен находиться в ведущем устройстве. Поскольку HART-устройства содержат микроконтроллер и МОП-ключи, необходимое для этого переконфигурирование передатчика и приемника выполняется путем подачи соответствующей команды.

Протокол Modbus.

Протокол Modbus и сеть Modbus являются самыми распространенными в мире. Несмотря на свой возраст (стандартом де-факто Modbus стал еще в 1979 г.), Modbus не только не устарел, но и, наоборот, существенно возросло количество новых разработок и объем организационной поддержки этого протокола. Миллионы Modbus-устройств по всему миру продолжают успешно работать, а последняя версия описания протокола появилась в декабре 2006 г.

Преимуществами Modbus являются отсутствие необходимости в специальных интерфейсных контроллерах (Profibus и CAN требуют для своей реализации заказные микросхемы), простота программной реализации и элегантность принципов функционирования. Все это снижает затраты на освоение стандарта как системными интеграторами, так и разработчиками контроллерного оборудования. Высокая степень открытости протокола обеспечивается также полностью бесплатными текстами стандартов, которые можно скачать с сайта www.modbus.org.

В России Modbus по распространенности конкурирует только с Profibus. Популярность протокола в настоящее время объясняется прежде всего совместимостью с большим количеством оборудования, которое имеет протокол Modbus. Кроме того, Modbus имеет высокую достоверность передачи данных, связанную с применением надежного метода контроля ошибок. Modbus позволяет унифицировать команды обмена благодаря стандартизации номеров (адресов) регистров и функций их чтения-записи.

Основным недостатком Modbus является сетевой обмен по типу «ведущий/ведомый», что не позволяет ведомым устройствам передавать данные по мере их появления и поэтому требует интенсивного опроса ведомых устройств ведущим.

Разновидностями Modbus являются протоколы Modbus Plus – многомастерный протокол с кольцевой передачей маркера и Modbus TCP, рассчитанный на использование в сетях Ethernet и интернет.

Протокол Modbus имеет два режима передачи: RTU (Remote Terminal Unit – «удаленное терминальное устройство») и ASCII. Стандарт предусматривает, что режим RTU в протоколе Modbus должен присутствовать обязательно, а режим ASCII является опционным. Пользователь может выбрать любой из них, но все модули, включенные в сеть Modbus, должны иметь один и тот же режим передачи.

Мы рассмотрим только протокол Modbus RTU, поскольку Modbus ASCII в России практически не используется. Отметим, что Modbus ASCII нельзя путать с частно-фирменным протоколом DCON, который используется в модулях фирм Advantech и ICP DAS и не соответствует стандарту Modbus.

Стандарт Modbus предусматривает применение физического интерфейса RS-485, RS-422 или RS-232. Наиболее распространенным для организации промышленной сети является 2-проводной интерфейс RS-485. Для соединений точка – точка может быть использован интерфейс RS-232 или RS-422.

В стандарте Modbus имеются обязательные требования, рекомендуемые и опционные (необязательные). Существует три степени соответствия стандарту: «полностью соответствует» – когда протокол соответствует всем обязательным и всем рекомендуемым требованиям; «условно соответствует» – когда протокол соответствует только обязательным требованиям и не соответствует рекомендуемым; «не соответствует».

Модель OSI протокола Modbus содержит три уровня: физический, канальный и прикладной.

В новых разработках на основе Modbus стандарт рекомендует использовать интерфейс RS-485 с двухпроводной линией передачи, но допускается применение четырехпроводной линии и интерфейса RS-232. Шина должна состоять из одного магистрального кабеля, от которого могут быть сделаны отводы. Магистральный кабель Modbus должен содержать три проводника в общем экране, два из которых представляют собой витую пару, а третий соединяет общие («земляные») выводы всех интерфейсов RS-485 в сети. Общий провод и экран должны быть заземлены в одной точке, желательно около ведущего устройства.

Устройства могут подключаться к кабелю тремя способами:

- непосредственно к магистральному кабелю;
- через пассивный разветвитель (тройник);
- через активный разветвитель (содержащий развязывающий повторитель интерфейса).

В документации на устройство и на тройник должны быть указаны наименования подключаемых цепей.

На каждом конце магистрального кабеля должны быть установлены резисторы для согласования линии передачи, как это требуется для интерфейса RS-485. В отличие от RS-485, наличие терминальных резисторов в соответствии со стандартом Modbus является обязательным независимо от скорости обмена. Их номинал может быть равным 150 Ом и мощность 0,5 Вт. Терминальные резисторы, а также резисторы, устраняющие неопределенность состояния линии при высокоомном состоянии передатчиков, устанавливаются так же, как описано в разделе «Интерфейсы RS-485, RS-422 и RS-232». Стандарт требует, чтобы в руководствах по эксплуатации устройств Modbus было сказано, имеются ли указанные резисторы внутри устройства или их необходимо устанавливать при монтаже сети. Если требуются внешние резисторы, то они должны иметь номинал в интервале от 450 до 650 Ом и быть установленными только в одном месте в пределах каждого сегмента сети (сегментами считаются части сети между повторителями интерфейса). Устройство обязательно должно поддерживать скорости обмена 9600 и 19200 бит/с, из них 19200 бит/с устанавливается «по умолчанию». Допускаются также скорости 1200, 2400, 4800, ..., 38400 бит/с, 65 кбит/с, 115 кбит/с,

Скорость передачи должна выдерживаться в передатчике с погрешностью не хуже 1 %, а приемник должен принимать данные при отклонении скорости передачи до 2 %.

Сегмент сети, не содержащий повторителей интерфейса, должен допускать подключение до 32 устройств, однако их количество может быть увеличено, если это допустимо исходя из нагрузочной способности передатчиков и входного сопротивления приемников, которые должны быть приведены в документации на интерфейсы. Указание этих параметров в документации является обязательным требованием стандарта.

Протокол Modbus предполагает, что только одно ведущее устройство (контроллер) и до 247 ведомых (модулей ввода-вывода) могут быть объединены в промышленную сеть. Обмен данными всегда инициируется ведущим. Ведомые устройства никогда не начинают передачу данных, пока не получают запрос от ведущего. Ведомые устройства также не могут обмениваться данными друг с другом. Поэтому в любой момент времени в сети Modbus может происходить только один акт обмена.

Протокол PROFIBUS.

Слово PROFIBUS получено из сокращений PROcess Field BUS, что приблизительно переводится как «промышленная шина для технологических процессов». Стандарт Profibus был первоначально принят в Германии в 1987 г., затем, в 1996 г., он стал международным (EN 50170 и EN 50254).

Сеть Profibus (как и другие описанные здесь промышленные сети, кроме Industrial Ethernet) использует только первый и второй уровни модели OSI. Один из вариантов сети, Profibus FMS, использует также уровень 7. Имеет три модификации: Profibus DP, Profibus FMS и Profibus PA. DP (Profibus for Decentralized Peripherals – «Profibus для децентрализованной периферии») использует уровни 1 и 2 модели OSI, а также пользовательский интерфейс, который в модель OSI не входит. Непосредственный доступ из пользовательского приложения к канальному уровню осуществляется с помощью DDLM (Direct Data Link Mapper – «прямой преобразователь для канального уровня»). Пользовательский интерфейс обеспечивает функции, необходимые для связи с устройствами ввода-вывода и контроллерами. Profibus DP в отличие от FMS и PA построен таким образом, чтобы обеспечить наиболее быстрый обмен данными с устройствами, подключенными к сети. FMS (Profibus с FMS протоколом) использует уровень 7 модели OSI и применяется для обмена данными с контроллерами и компьютерами на регистровом уровне. Profibus FMS предоставляет большую гибкость при передаче больших объемов данных, но проигрывает протоколу DP в популярности вследствие своей сложности. FMS и DP используют один и тот же физический уровень, основанный на интерфейсе RS-485 и могут работать в общей сети. PA (Profibus for Process Automation – «для автоматизации технологических процессов») использует физический уровень на основе стандарта IEC 1158-2, который обеспечивает питание сетевых устройств через шину и не совместим с RS-485. Особенностью Profibus PA является возможность работы во взрывоопасной зоне.

В последние годы появился стандарт PROFINet, который основан на Industrial Ethernet и технологиях COM, DCOM. Он легко обеспечивает связь промышленной сети Profibus с офисной сетью Ethernet является многомастерной сетью (с несколькими ведущими устройствами). В качестве ведомых устройств выступают обычно устройства ввода-вывода, клапаны, измерительные преобразователи. Они не могут самостоятельно получить доступ к шине и только отвечают на запросы ведущего устройства.

На физическом уровне Profibus DP и FMS используют стандарт RS-485 при скорости передачи до 12 Мбит/с и с размерами сегментов сети до 32 устройств. Количество устройств можно увеличить с помощью повторителей интерфейса.

Особые требования установлены к сетевому кабелю. Он должен иметь волновое сопротивление от 135 до 165 Ом при погонной емкости не более 35 пФ/м, площадь поперечного сечения проводников – более 0,34 мм² и погонное сопротивление – не более 110 Ом/км. Кабель должен иметь одну или две витые пары с медным экраном в виде оплетки или фольги.

С обеих сторон линии передачи подключаются согласующие резисторы, которые конструктивно установлены во все сетевые разъемы и подключаются с помощью микропереключателей. При скоростях передачи более 1,5 Мбит/с для согласования линии дополнительно используются плоские (печатные) катушки индуктивности.

Для увеличения дальности передачи в Profibus предусмотрена возможность работы с оптоволоконным кабелем. При использовании стеклянного опто-

волокна дальность связи может быть увеличена до 15 км. Оптоволоконные интерфейсы выполняются в виде сменных модулей для контроллеров. PA использует физический уровень, соответствующий стандарту IEC 1158-2. Данные передаются с помощью уровней тока +9 и –9 мА («токовая петля»). Используется манчестерский код (логический ноль соответствует смене отрицательного тока на положительный, а логическая единица – положительного на отрицательный). Скорость передачи составляет 31,25 кбит/с, в качестве линии передачи используется витая пара в экране или без него. Один сегмент сети может содержать до 32 устройств. Максимальная длина кабеля достигает 1,9 км. В каждом сегменте с обеих сторон кабеля подключены RC-цепочки, состоящие из последовательно соединенных конденсатора емкостью 1 мкФ и резистора сопротивлением 100 Ом. Благодаря низкой энергии передаваемого сигнала Profibus PA является искробезопасной электрической цепью и может быть использован во взрывоопасных зонах (при наличии разрешения Ростехнадзора на конкретное оборудование).

Несколько лет назад для Profibus была разработана модификация интерфейса RS-485 для взрывоопасных зон, которая получила название RS-485-IS («Intrinsically Safe» – «внутренне безопасный»). Существенным ее отличием является наличие резисторов, ограничивающих ток в линии до значений, установленных стандартом на искробезопасные электрические цепи.

Канальный уровень модели OSI в Profibus называется FDL-уровнем (Fieldbus Data Link – «промышленный канал связи»). Объект MAC (Medium Access Control – «управление доступом к каналу») на канальном уровне определяет процедуру передачи данных устройствами, включая управление правами на передачу данных через сеть. Протокол канального уровня обеспечивает выполнение следующих важных требований:

- в процессе коммуникации между ведущими устройствами необходимо обеспечить выполнение каждым из них своей задачи в течение заранее определенного интервала времени;

- взаимодействие ведущих устройств (контроллеров) с ведомыми должно происходить максимально быстро.

В сети Profibus для доступа ведущих устройств к сети используется метод передачи маркера. В этом методе сеть имеет логическую топологию кольца (т. е. кольца на уровне адресов устройств) и каждое ведущее устройство получает доступ к сети только при получении маркера. Маркер выполняет роль арбитра, который предоставляет устройству право доступа. По истечении определенного времени это устройство должно передать маркер следующему ведущему устройству, которое получает доступ также на время, пока маркер находится у него. Таким образом, каждому ведущему устройству выделяется точно заданный интервал времени. Этот интервал может быть установлен при конфигурировании системы.

Каждому мастеру в сети назначаются свои ведомые устройства. В методе «ведущий/ведомый» процедуру коммуникации с ведомыми устройствами выполняет мастер, который обладает маркером. На время обладания маркером мастер становится ведущим также по отношению к другим мастерам, т. е. может

выполнять с ними коммуникацию типа «мастер-мастер», имеет также широко-вещательный режим работы, когда ведущее устройство посылает сообщение «всем», не ожидая уведомления о получении, и многоабонентский режим, когда ведущее устройство посылает одно и то же сообщение сразу нескольким участникам сети.

В задачи объекта MAC активного устройства (получившего маркер) входит обнаружение наличия или отсутствия маркера сразу после начала работы сети, передача маркера следующему устройству в порядке возрастания адресов, удаление адресов вышедших из строя или выключенных устройств и добавление новых, восстановление потерянного маркера, устранение дубликатов маркеров, устранение дублирования сетевых адресов и обеспечение заданного периода обращения маркера по сети.

Протокол CAN.

Controller Area Network («область, охваченная сетью контроллеров») представляет собой комплекс стандартов для построения распределенных промышленных сетей, который использует последовательную передачу данных в реальном времени с очень высокой степенью надежности и защищенности. Центральное место в CAN занимает протокол канального уровня модели OSI. Первоначально CAN был разработан для автомобильной промышленности, но в настоящее время быстро внедряется в область промышленной автоматизации. Это хорошо продуманный, современный и многообещающий сетевой протокол. Начало развития CAN было положено компанией Bosch в 1983 г., первые микросхемы CAN контроллеров были выпущены фирмами Intel и Philips в 1987 г., в настоящее время контроллеры и трансиверы CAN выпускаются многими фирмами, в том числе Analog Devices, Inc., Atmel Corp. Cast, Dallas Semiconductor, Freescale, Infineon, Inicore Inc., Intel, Linear Technology, Maxim Integrated Products, Melexis, Microchip, National Semiconductor, NXP, OKI, Renesas Technology Corp., STMicroelectronics, Yamar Electronics, Texas Instruments.

В России интерес к CAN за последние годы сильно возрос, однако контроллерного оборудования для CAN в России крайне мало, в десятки или сотни раз меньше, чем для Modbus или Profibus. Среди протоколов прикладного уровня для работы с CAN наибольшее распространение в России получили CANopen и DeviceNet.

В настоящее время CAN поддерживается 11 стандартами ISO, в том числе.

Стандарт не предусматривает никакого протокола прикладного (7-го) уровня модели OSI. Поэтому для его воплощения в жизнь различные фирмы разработали несколько таких протоколов: CANopen (организации CiA), SDS (фирмы Honeywell Micro Switch Division), CAN Kingdom (фирмы Kvaser), DeviceNet (фирмы Allen-Bradley, ставший Европейским стандартом в 2002 г.) и ряд других. Характеризуется следующими основными свойствами:

- каждому сообщению (а не устройству) устанавливается свой приоритет;
- гарантированная величина паузы между двумя актами обмена;
- гибкость конфигурирования и возможность модернизации системы;
- широковещательный прием сообщений с синхронизацией времени;

- непротиворечивость данных на уровне всей системы;
- допустимость нескольких ведущих устройств в сети («многوماстерная сеть»);
- способность к обнаружению ошибок и сигнализации об их наличии;
- автоматический повтор передачи сообщений, доставленных с ошибкой, сразу, как только сеть станет свободной;
- автоматическое различение сбоев и отказов с возможностью автоматического отключения отказавших модулей. К недостаткам можно отнести сравнительно высокую стоимость CAN-устройств, отсутствие единого протокола прикладного уровня, а также чрезмерную сложность и запутанность протоколов канального и прикладного уровня, изложенных в стандартах организации CAN in Automation.

Физический уровень модели OSI обеспечивает надежную передачу битов, игнорируя содержание передаваемой информации. Основными понятиями физического уровня являются линии передачи (в большинстве случаев это витая пара, хотя допускается использовать плоский кабель или один провод и «корпусную землю», оптоволокно, радиоканал), временные диаграммы, система синхронизации, формат данных, обеспечение достоверности передачи (контрольная сумма, методы кодирования, обнаружение и восстановление ошибок). Характеристики передатчика и приемника стандартом не устанавливаются, поскольку они могут быть выбраны для каждого конкретного случая исходя из требований применения.

Кабель витой пары в сети CAN должен иметь общий (третий) провод; на обоих концах витой пары должны быть согласующие резисторы, сопротивление которых равно волновому сопротивлению кабеля. Максимальная длина кабеля составляет 1 км. Для увеличения длины, количества узлов или гальванической развязки могут быть использованы повторители интерфейса, сетевые мосты и шлюзы.

Основные требования к линии передачи и ее характеристикам близки к RS-485, однако в передатчиках CAN есть режим управления длительностью фронтов импульсов. Управление выполняется путем заряда емкостей затворов выходных транзисторов от источников тока, при этом величина тока задается внешним резистором. Увеличение длительности фронта позволяет снизить требования к согласованию линии на низких частотах, увеличить длину отводов и ослабить излучение электромагнитных помех.

Выводы земли всех передатчиков сети должны быть соединены (если интерфейсы гальванически не изолированы). При этом разность потенциалов между выводами заземлений не должна превышать 2 В. Гальваническая изоляция рекомендуется при длине линии более 200 м, но не является обязательным требованием стандарта.

Для электрического соединения устройств с CAN интерфейсом стандарт предусматривает два варианта. Первый вариант состоит в применении T-образных разветвителей, которые состоят из трех 9-штырьковых разъемов D-sub, расположенных в одном корпусе, одноименные контакты которых

соединены между собой. Разветвители имеют один разъем со штырьками и два – с гнездами.

Второй вариант требует наличия в каждом CAN-устройстве двух разъемов. Для включения устройства в сеть кабель разрезают и на его концах устанавливают ответные части разъемов. Устройство включается буквально в разрыв линии передачи. Такой подход позволяет наращивать количество устройств и изменять топологию сети путем добавления в разрыв кабеля новых устройств и кабеля с разъемами на концах. Один из разъемов должен быть со штырьками, второй – с гнездами. Подключение устройств к шине без разъемов не допускается. Согласующий резистор должен располагаться внутри разъема, который подключается к концу кабеля. Для присоединения модулей к CAN-шине должен использоваться 9-штырьковый разъем типа D-Sub. На модуле устанавливается разъем с гнездами, на соединяющем кабеле – со штырьками.

Применение разъемов со штырьками или гнездами определяется следующим правилом: при горячей замене модулей питание должно оставаться только на разъемах с гнездами; это позволяет избежать случайного короткого замыкания.

Отметим, что в основанном на CAN стандарте CANopen предусмотрено гораздо большее разнообразие вариантов разъемов, в том числе для плоского кабеля, RJ-10, RJ45, разъемный винтовой клеммник, и еще около десяти вариантов специальной конструкции. Допускается применение и других разъемов.

Стандарт устанавливает следующие скорости обмена: 1 Мбит/с, 800, 500, 250, 125, 50, 20 кбит/с. CAN-модули могут поддерживать не все скорости, но желательно, чтобы их количество было наибольшим. Передатчик имеет очень важное свойство: если один из передатчиков устанавливает в сети логический ноль, а второй – логическую единицу, то это состояние не является аварийным, как в сети на основе интерфейса RS-485, поскольку сквозного тока не возникает. В случае CAN линия остается в состоянии логической единицы. Иначе говоря, логическая единица всегда доминирует над логическим нулем. Поэтому в стандарте CAN используется понятие «доминантное состояние» (доминирующее) – состояние линии для обозначения состояния линии с током – и понятие «рецессивное состояние» как противоположное доминантному.

Промышленный Ethernet.

Появился более 30 лет назад. В настоящее время под Ethernet понимают семейство продуктов для локальных сетей, которые соответствуют стандарту IEEE 802.3. Промышленному применению стандарта долгое время мешал метод случайного доступа к сети, не гарантировавший доставку сообщения в короткое и заранее известное время. Однако это проблема была решена применением коммутаторов (см. ниже). Доля Ethernet среди установленных промышленных сетей в 2000 г. составляла 11 %, в 2005 г. – уже 23 %. В настоящее время (с 2004 г. по 2009 г.) рынок промышленного Ethernet растет со скоростью 51 % в год, он стал промышленным стандартом и имеется большой выбор оборудования, удовлетворяющего промышленным требованиям. Недос-

татком промышленного Ethernet является относительно высокая цена: Ethernet-модули ввода-вывода в среднем в 2 раза дороже аналогичных Modbus-устройств.

Внедрению Ethernet в промышленность способствовали следующие его качества:

- высокая скорость передачи (до 10 Гбит/с) и соответствие требованиям жесткого реального времени при высоком быстродействии (например, при управлении движением);
- простота интеграции с Internet и Intranet, в том числе по протоколам прикладного уровня SNMP (Simple Network Management Protocol), FTP, MIME (Multipurpose Internet Mail Extensions), HTTP;
- простота интеграции с офисными сетями;
- наличие большого числа специалистов по обслуживанию Ethernet;
- по-настоящему открытые решения;
- возможность организации многомастерных сетей;
- неограниченные возможности по организации сетей самых разнообразных топологий;
- широкое применение в офисных сетях, что обеспечило экономическую эффективность технической поддержки стандарта со стороны международных организаций по стандартизации;
- появление недорогих коммутаторов, решивших проблему недетерминированности Ethernet.

Продвижением и технической поддержкой промышленного Ethernet занимается Industrial Ethernet Association (IEA, www.industrialethernet.com), которая была организована в 1999 г. по инициативе шести компаний (Synergetic Micro Systems, Grayhill, HMS Fieldbus Systems, Hilscher, Contemporary Controls и Richard Hirschmann).

При использовании стандартного Ethernet время реакции сети часто превышает 100 мс. В локальных сегментах сети с малым количеством устройств оно снижается до 20 мс при использовании протокола TCP и до 10 мс – для UDP. Использование прямой MAC-адресации в локальных сегментах сети может уменьшить время реакции до 1 мс. Однако это время в Ethernet является случайной величиной. Поэтому основным отличием промышленного Ethernet от офисного является наличие коммутаторов, которые превращают Ethernet в сеть с детерминированным поведением.

Для промышленных применений не годятся кабели и разъемы, используемые в офисных сетях. Поэтому ряд производителей представляют на рынке разъемы RJ-45 со степенью защиты IP67 от воздействий окружающей среды.

Надежность промышленного Ethernet обеспечивается резервированием кабельных линий и сетевых карт, а также специальным программным обеспечением для резервирования.

Отличительными признаками промышленного Ethernet являются:

- отсутствие коллизий и детерминированность поведения благодаря применению коммутаторов;
- индустриальные климатические условия;
- устойчивость к вибрациям;

- отсутствие вентиляторов в оборудовании;
- повышенные требования к электромагнитной совместимости;
- компактность, крепление на ДИН-рейку;
- удобное подключение кабелей;
- диагностическая индикация на панели прибора;
- электропитание от источника напряжения в диапазоне от 10 до 30 В;
- возможность резервирования;
- разъемы и оборудование со степенью защиты до IP67;
- защита от электростатических зарядов, электромагнитных импульсов, от превышения напряжения питания;
- полнодуплексная передача.

Недостатком Ethernet является значительный уровень накладных расходов в протоколах TCP/IP, которые рассчитаны на пересылку данных больших объемов. Если же устройство пересылает всего 8 байт, что типично для АСУ ТП, то полезная информация в протоколе составляет всего 11 %, поскольку каждый пакет TCP/IP содержит 68 байт служебной информации. Однако это часто можно скомпенсировать большой пропускной способностью сети.

Контрольные вопросы

- 1 Каково назначение и область применения протокола Modbus RTU?
- 2 Каково назначение и область применения протокола Modbus TCP?
- 3 Поясните особенности реализации промышленных сетей CAN.
- 4 Поясните особенности реализации промышленных сетей RS-485.
- 5 Поясните особенности промышленного Ethernet.

Список литературы

- 1 **Гуров, В. В.** Микропроцессорные системы : учебное пособие / В. В. Гуров. – Москва : ИНФРА-М, 2022. – 336 с.
- 2 **Жежера, Н. И.** Микропроцессорные системы автоматизации технологических процессов : учебное пособие / Н. И. Жежера. – 2-е изд. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 240 с.
- 3 **Беккер, В. Ф.** Технические средства автоматизации. Интерфейсные устройства и микропроцессорные средства : учебное пособие / В. Ф. Беккер. – 2-е изд. – Москва : РИОР ; ИНФРА-М, 2020. – 152 с.
- 4 **Гарелина, С. А.** Автоматизация измерений, испытаний и контроля : учебное пособие / С. А. Гарелина, К. П. Латышенко, И. Ю. Сергеев. – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – 486 с.