

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Системы автоматизированного проектирования»

А. В. Бородуля
А. В. Василевский
В. А. Кочуров

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ САПР

Методическое пособие

В 3 частях

Часть 3

Минск
БНТУ
2012

УДК 658.512.22.011.56:004(075.8)

ББК 30.2-5-05

Б83

Рецензенты:

Ю. Е. Лившиц, В. В. Напрасников

Бородуля, А. В.

Б83 Техническое обеспечение интегрированных САПР : методическое пособие : в 3 ч. / А. В. Бородуля, А. В. Василевский, В. А. Кочуров. – Минск : БНТУ, 2010–2012. – Ч. 3. – 2012. – 46 с.
ISBN 978-985-550-142-9 (Ч. 3).

Рассматриваются вопросы автоматического управления движениями механизмов (промышленных роботов, станков и т. д.) и элементы соответствующих систем автоматического управления: пневмоцилиндры, гидроцилиндры, электродвигатели, датчики приближения, угла поворота и т. д., а также некоторые вопросы по управляющим ЭВМ. Как реальный пример приводятся основные данные частотно-регулируемого электропривода переменного тока типа SB-19, кратко рассмотрены также система SCADA и компьютерные сети PROFIBUS и CAN.

Издается с 2010 г. Часть 2 вышла в 2012 г.

УДК 658.512.22.011.56:004(075.8)

ББК 30.2-5-05

ISBN 978-985-550-142-9 (Ч. 3)

ISBN 978-985-525-354-0

© Бородуля А. В.,
Василевский А. В.,
Кочуров В. А., 2012

© Белорусский национальный
технический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

1. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯМИ.....	4
1.1. Системы координат управляемых механизмов.....	4
1.2. Элементарное движение между двумя точками.....	7
2. ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.....	10
3. ЧИСЛОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ.....	12
Краткая классификация систем автоматического управления с точки зрения изменения управляемого параметра во времени.....	13
4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИВОДА.....	13
4.1. Пневматика и гидравлика.....	14
4.2. Электродвигатели.....	16
4.2.1. Двигатель постоянного тока.....	16
4.2.2. Асинхронный двигатель.....	21
4.2.3. Синхронный двигатель.....	25
5. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ (FEEDBACK).....	26
Датчики.....	26
6. ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	30
Повышение мощности привода.....	34
7. УПРАВЛЯЮЩИЕ ЭВМ.....	35
8. СИСТЕМА SCADA.....	38
9. КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ В САУ (PROFIBUS И CAN).....	41
Список источников.....	45

1. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯМИ (MOTION CONTROL)

1.1. Системы координат управляемых механизмов

Существует очень большое число технических устройств, где используются движения различных элементов, например транспортные устройства, станки и т. д. Область физики, рассматривающая эти вопросы, называется механикой. В самой ЭВМ, несмотря на преобладание электроники, используются вращающиеся вентиляторы и диски, перемещаются головки дисков, в принтерах перемещаются бумага и печатающая головка, в сканере – сканирующая головка. Многими из этих движений необходимо управлять по различным параметрам: положению, скорости, ускорению. В настоящее время для управления используют ЭВМ. Поскольку она хорошо выполняет вычисления, а движения происходят в пространстве, то используется аналитическая геометрия, которая изначально предполагает использование системы координат. Для работы в плоскости широко используется прямоугольная и несколько меньше – полярная система координат. С точки зрения теоретической механики прямоугольная система координат предполагает прямолинейные поступательные движения вдоль координатных осей. Полярная система предполагает прямолинейное поступательное движение вдоль радиуса-вектора и поворот радиуса-вектора вокруг начала координат (например, в дисковых накопителях информации).

Согласно теории механизмов и машин прямолинейное поступательное движение выполняется с помощью поступательной кинематической пары, а поворот – с помощью вращательной кинематической пары. Последняя имеет определенные преимущества по технической реализации:

- 1) она имеет малые размеры и в силу этого хорошо защищается от воздействий окружающей среды и хорошо смазывается;
- 2) для нее имеется широчайший ассортимент подшипников, двигателей, датчиков и других элементов;
- 3) трение качения значительно меньше трения скольжения.

В живых организмах, просуществовавших миллионы лет, природа использует исключительно шарниры, то есть вращательную пару.

В техническом черчении используется прямоугольная система координат, и соответственно в станочном оборудовании используется поступательная пара для перемещений инструмента относительно заготовки, как на рис. 1 [1]. На нем изображена почти полная схема токарного станка, нужно только добавить перемещение резца по оси Y . Однако непосредственно резание материала чаще выполняется с помощью вращения либо заготовки, как на рис. 1 [1], либо инструмента, например в сверлильных и фрезерных станках.

Промышленный робот определяется как манипулятор (механическая рука) с программным управлением. В их конструкциях значительно шире используют вращательную пару, есть роботы, построенные исключительно на таких парах, например промышленный робот РМ1. В нем используется так называемая ангулярная система координат, упрощенно показанная на рис. 1.

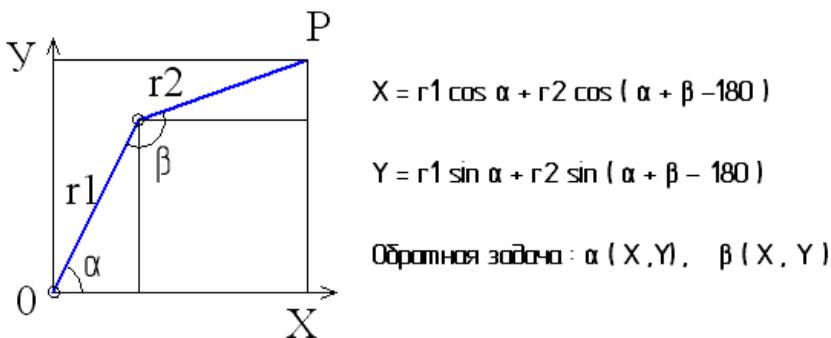


Рис. 1. Ангулярная система координат на плоскости

Стержень длиной $r1$ связан шарниром с неподвижным основанием в начале координат O . С другой стороны он связан шарниром со вторым стержнем длиной $r2$, на конце которого закреплен инструмент в точке P .

Для управления движением точки P нужно определять значения углов α и β в зависимости от прямоугольных координат X и Y . Эта обратная задача, как показано на рис. 1, требует значительных вычислений с обратными тригонометрическими функциями и с большой скоростью может быть выполнена только на ЭВМ. Если вспомнить историю, то первая ЭВМ как раз была предназначена для

подобной задачи – вычисления углов при артиллерийской стрельбе. Именно наличие ЭВМ позволило использовать в современных машинах ангулярную систему координат и вращательные пары при автоматическом управлении. В промышленных роботах шарниры поворота с управляемыми углами называют осями. В роботе РМ1 имеется шесть осей, что создает представление об объеме необходимых вычислений при управлении им. При этом время, отводимое на эти вычисления, очень мало, так как нужно успеть определить углы для каждой следующей точки P при быстром перемещении инструмента по прямой или более сложной линии.

Хотя и станки, и промышленные роботы нуждаются в автоматическом управлении движениями, имеется значительная разница в режиме их работы. В станках траекторию движения нужно выполнять с очень большой точностью, отклонения не должны превышать сотых долей миллиметра или даже меньше, так как это определяет точность обработки. В то же самое время усилия, прикладываемые к инструменту, могут составлять тысячи ньютонов (сотни килограммов), что может привести к значительным упругим деформациям конструкции станка, поэтому она должна быть очень жесткой (минимальные деформации под нагрузкой). По этой причине станки делаются массивными, в них стараются избегать консолей, тогда как в промышленных роботах обычно используется консольная конструкция. Отсюда можно сделать вывод, что роботы пока не годятся для выполнения очень точных движений при больших нагрузках на инструмент. Задача выполнения точных движений под большой нагрузкой в станках отчасти облегчается тем, что эти движения выполняются со сравнительно небольшой скоростью (минутная подача).

Формулы механики, описывающие прямолинейное поступательное и поворотное (вращательное) движения, очень похожи, как показано в таблице.

Сравнение формул прямолинейного поступательного и вращательного движений

Прямолинейное движение		Вращение	
Путь	S	Угол поворота	$\varphi = S/R,$ где R – радиус

Скорость	$V = S/t$, где t – время	Угловая частота вращения	$\omega = \varphi/t$
----------	--------------------------------	-----------------------------	----------------------

Окончание таблицы

Прямолинейное движение		Вращение	
Ускорение	$a = V/t$	Угловое ускорение	$\psi = \omega /t$
Сила	F	Момент вращения	$M = F \cdot R$
Масса	m	Момент инерции	$J = m \cdot R^2$
Второй закон Ньютона	$F = m \cdot a$	Второй закон Ньютона	$M = J \cdot \psi$
Кинетическая энергия	$W = m \cdot V^2/2$	Кинетическая энергия	$W = J \cdot \omega^2/2$

1.2. Элементарное движение между двумя точками

Рассмотрим простую задачу перемещения тела массой m из точки 0 в точку y , как показано на графике рис. 2.

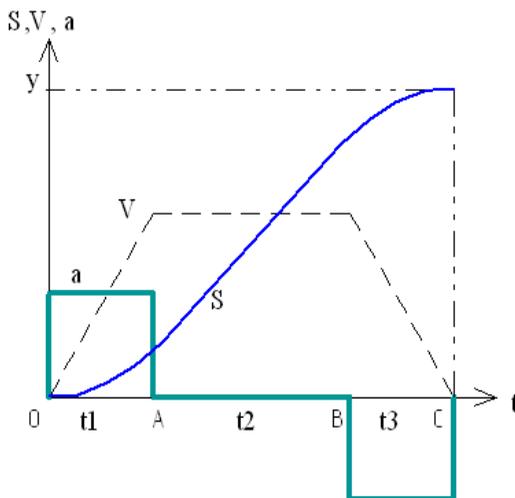


Рис. 2. Движение массы между двумя точками

Трение для простоты не учитывается. По горизонтали задано время t , по вертикали – пройденный путь S , скорость V , ускорение a . Можно выделить три интервала времени:

1. Разгон, $0-A$, $t1$, на массу m действует сила F , создавая ускорение

$$a = F/m,$$

скорость растет до значения

$$V = a \cdot t_1,$$

пройден путь

$$S_1 = a \cdot t_1^2 / 2,$$

затрачена энергия

$$W = m \cdot V^2 / 2.$$

2. Равномерное движение, $A-B$, t_2 , сила $F = 0$, поэтому ускорение $a = 0$, скорость постоянна, пройден путь $S_2 = V \cdot t_2$.

3. Торможение, $B-C$, t_3 , действует сила торможения в обратном направлении $-F$, замедление $-a$ до остановки $V = 0$, пройден путь

$$S_3 = a \cdot t_3^2 / 2,$$

выделена энергия

$$W = m \cdot V^2 / 2.$$

Такой график движения широко распространен, например в станках, роботах, на железной дороге, в метро, лифте и т. д., при желании это можно наблюдать. Такой же график движения можно выполнить при повороте (вращении на много оборотов), реально это происходит с колесами транспорта. Здесь можно отметить, что выделяемая при торможении энергия, с целью ее экономии, может быть возвращена в электросеть (называется «рекуперативное торможение»), в двигателях внутреннего сгорания пока это невозможно, энергия греет тормоза.

Выполнение указанного на рис. 2 движения характеризуется следующими параметрами:

- 1) общим затраченным временем;
- 2) общей затраченной энергией;
- 3) средней скоростью движения;
- 4) скоростью равномерного движения в среднем участке;

5) отклонением точки останова от заданного значения, называемой точностью останова (правильнее было бы «неточностью останова»).

Иногда ставится задача минимизации одного из параметров при ограничениях на другие параметры: например, минимизировать затраченное время (п. 1) при отклонении (п. 5) не более заданного значения. Практическое решение подобных задач часто осложняется такими факторами, как случайные помехи, называемыми иногда возмущениями, например, перемещения в условиях вибрации, толчков, изменений температуры и т. д. Один из ярких примеров возмущений – качка судна во время волнения при стрельбе из орудий. Следует отметить, что уменьшение влияния возмущений является основной задачей систем управления с отрицательной обратной связью. В принципе, отрицательная обратная связь ослабляет всякие отклонения от цели, так как усиленное рассогласование действует на объект управления, возвращая его в заданное состояние. Рассмотренная ранее схема управления ПИД для нагревателя решает указанную задачу минимизации времени при заданной точности. То же самое применимо к управлению движениями объектов. Минимизация времени движения предполагает увеличение скорости движения и соответственно ускорений и усилий при заданной массе объекта, что в свою очередь требует увеличения мощности исполнительных элементов, а она, как правило, ограничена. Это касается не только разгона, но и торможения, когда нужно убрать кинетическую энергию, сообщенную объекту при разгоне. При недостаточной мощности торможения объект в силу инерции перебегает дальше заданной точки останова. Чтобы исключить или уменьшить перебег, нужно правильно выбрать начало торможения.

На рис. 3 слева показано два случая завершения движения:

1 – плавный подход к заданному значению U_0 (асимптотический);

2 – колебательный. Второй происходит быстрее, но за счет инерции возникает перебег, который нужно исправлять и возвращаться назад, и т. д. Справа показана типичная форма импульсов цифрового электронного устройства, где происходят аналогичные процессы.

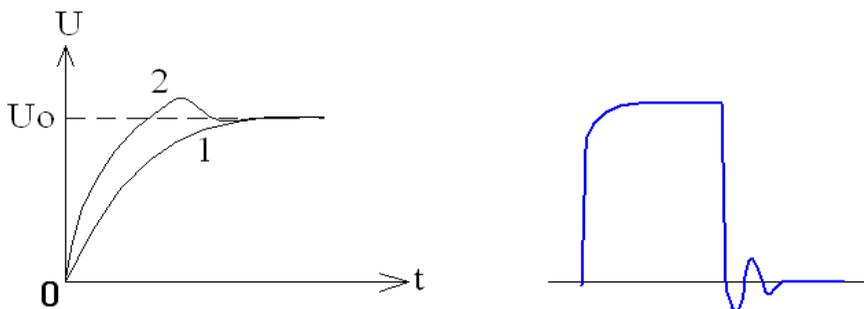


Рис. 3. Завершение движения

Эти правила знакомы и изучены нами с раннего возраста, однако у человека может не хватить скорости реакции, тогда как автоматические устройства, в том числе с управляющими ЭВМ, успевают решать такие задачи. Кроме того, они работают точнее благодаря применению математических методов расчета, управляющих устройств, построенных на их основе, и управляющих ЭВМ, в программах которых учтены различные факторы.

2. ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

До появления ЭВМ управление выполнялось более простой автоматикой, в том числе релейной. Она и в настоящее время не сдала свои позиции благодаря высокой надежности, во многих случаях вследствие простоты, например, различные электрические защиты от коротких замыканий, перегрева и т. д. Простой пример станочного оборудования с таким управлением приведен на рис. 1[1]. Траектория движения резца создается здесь из отдельных прямолинейных движений суппорта по направляющим в пределах, заданных конечными выключателями (limit switch). Их местоположение фиксируется винтами. Для каждого движения может использоваться асинхронный двигатель с редуктором и винтовой передачей, определяющими постоянную скорость перемещения, либо гидроцилиндр. Аналогично могут выполняться поворотные движения. Указанные средства,

благодаря своей простоте, широко использовались и используются в автоматических линиях и агрегатных станках, которые предназначаются для массового производства большого числа одинаковых изделий. Однако простота, высокая надежность и низкая стоимость приводят к ограничению возможностей перенастройки на другие изделия. Поэтому указанное станочное оборудование рассчитывается на изготовление большого числа одинаковых изделий до своего износа. На рис. 4 приведен простой пример вытачивания конуса на токарном станке двумя вариантами движений:

1) слева показана работа одновременно продольной Z и поперечной Y подачи; в этом случае нужно точно согласовывать оба движения по началу, концу и соотношению скоростей; если это соотношение нарушится, как показано увеличенно в середине конуса, то появится брак;

2) справа показан значительно более простой и надежный вариант одного движения, однако здесь нужно выставлять фиксированное направление движения Z конструкцией станка.

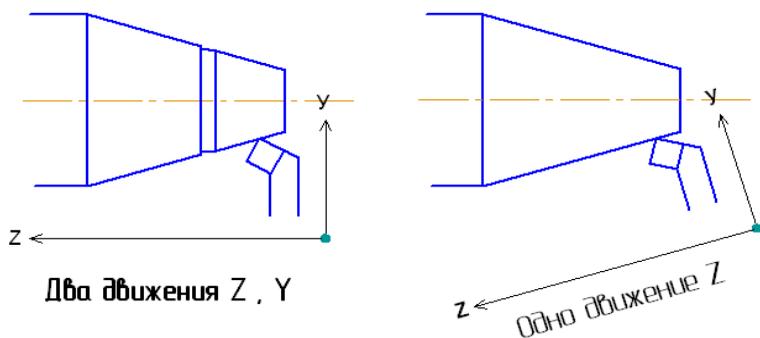


Рис. 4. Варианты вытачивания конуса

Левый вариант требует более сложного управления одновременно двумя движениями и подходит для ЧПУ. Более простой правый вариант подходит для реализации на агрегатном станке.

Различают два типа управления движением – **позиционное и контурное**. В позиционной системе управления задаются отдельные точки пространства, куда нужно выставлять инструмент, например, при точечной сварке, при сверлении отверстий, заданных координатами (координатно-сверлильные станки), и т. д. Здесь

можно допустить перебеги (с возвратом, см. рис. 3). В контурной системе управления обеспечивается движение инструмента по заданной траектории с заданной скоростью, например, при шовной сварке нужно провести инструмент по линии шва. Для токарного станка с ЧПУ также нужна контурная система управления. Хотя траекторию можно представить как последовательность точек, в контурной системе нужно еще обеспечить скорость движения и не допускать перебегов, поэтому она сложнее позиционной системы.

3. ЧИСЛОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Необходимость смены изделий потребовала перенастройки технологического оборудования и дальнейшего совершенствования систем управления и привода. Около 1950 г. появились системы числового программного управления (ЧПУ, NC – numeric control). В них первоначально использовались более простые, чем ЭВМ того времени, электронные устройства. Эти устройства основывались на подсчете числа импульсов, которые генерировались датчиками и обрабатывались шаговыми электродвигателями. Однако позже, благодаря успехам микроэлектроники, были разработаны дешевые, надежные и быстродействующие микроЭВМ, называемые программируемыми логическими контроллерами (Programmable Logic Controller – PLC). Есть еще один вариант специальной управляющей ЭВМ – Digital Signal Processor (DSL). Они были применены для управления производственным оборудованием, в том числе и в NC, в настоящее время в новом оборудовании используется CNC – computer numerical control. Используются также и старые станки NC, с бумажной перфолентой в качестве носителя исходной информации, так как они имеют высокую цену и часто вполне пригодны. Здесь моральное старение не так существенно, как в ПК. В новом оборудовании CNC применяются все существующие компьютерные технологии, в том числе промышленные компьютерные сети по стандарту Ethernet, CAN, Profibus и т. д. Современные системы автоматического управления используют модульный принцип построения. Элементы систем, как и элементы ПК, выполняются в виде стандартных модулей, которые можно быстро соединить разъемами и кабелями. Датчики, исполнительные и другие элементы рассматриваются как периферийное оборудование управляющих

ЭВМ. Модульный принцип распространяется и на программное обеспечение (в том числе plugins).

Оборудование с ЧПУ (CNC) позволило быстро перестраиваться на новые изделия, во многом благодаря универсальности ЭВМ, и тем самым снизить стоимость изделий, выпускаемых малыми партиями. При выпуске единичных или нескольких изделий автоматизация, как правило, нерентабельна, это касается, например, экспериментальных образцов при выполнении НИОКР (научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы – Research and Development – R&D). В этом случае применяется ручная работа и универсальные станки.

Краткая классификация систем автоматического управления с точки зрения изменения управляемого параметра во времени

Мы уже имеем некоторое представление о системах автоматического управления, поэтому классификация не будет чем-то абстрактным. Выделяют следующие случаи:

1. Значение управляемого параметра неизменно во времени, например: значение электрического напряжения на выходе источника питания, температуры в нагревателе, уровня воды в баке и т. д. Процесс управления здесь называется регулированием или стабилизацией.

2. Значение управляемого параметра изменяется во времени по известному закону, например, изменение координат инструмента в станках с ЧПУ. Процесс управления здесь называется программным управлением.

3. Значение управляемого параметра изменяется во времени случайно (не известно заранее). Процесс управления здесь называется слежением, например следящая система за самолетами противника, которая управляет зенитным орудием.

4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИВОДА

Привод (drive) можно понимать как устройства, приводящие что-либо в движение. ЧПУ потребовало существенного совершенствования привода, в том числе регулирования скорости движения и частоты вращения, повышения точности, быстродействия, надежности.

Любое движение массы требует затрат энергии как для разгона, так и на возникающее при движении трение. Эту энергию дают различные двигатели, в САУ их относят к исполнительным элементам

(actuator). САУ движениями называют также сервосистемами (servosystem).

Когда-то очень большим достижением техники было создание паровой машины, превращающей давление водяного пара в силу перемещения с помощью поршня в цилиндре. Этот принцип работы сохранился и поныне в таких исполнительных элементах, как пневмоцилиндр и гидроцилиндр, используемых в пневматике и гидравлике.

4.1. Пневматика и гидравлика

Для выполнения прямолинейных движений широко используются пневмо- и гидроцилиндры благодаря их простоте и надежности. На рис. 5 изображена схема пневмо- или гидроцилиндра, он состоит из поршня 1, перемещающегося в цилиндре 2 и передающего усилие F через шток 3 внешним устройствам. Между штоком и цилиндром требуется специальное герметичное уплотнение 4. Сжатый воздух для пневматики либо сжатую жидкость для гидравлики (обычно масло) до давления P получают в специальном устройстве (компрессор, маслонасос), передают на расстояние по трубкам и посредством вентилей 5 подают с одной или с другой стороны поршня, перемещая шток либо вправо, либо влево.

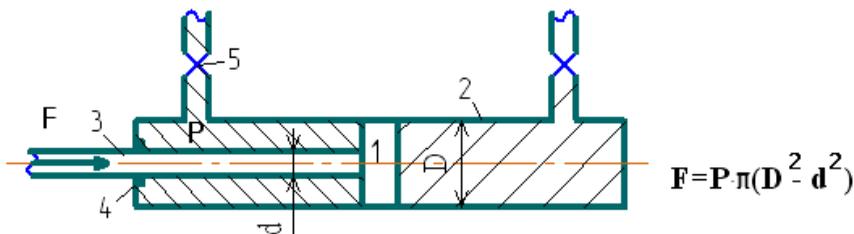


Рис. 5. Схема пневмо- или гидроцилиндра

Для эффективной работы нужно обеспечить герметичность обеих полостей цилиндра с каждой стороны поршня, что является непростой задачей, учитывая движение поршня и штока относительно цилиндра и высокое давление воздуха или жидкости в цилиндре. Скользящие поверхности требуют высокой точности и чистоты. Большие различия в свойствах газа и жидкости отражаются на раз-

личиях в свойствах пневматики и гидравлики. Несмотря на близость принципов работы, пневматика и гидравлика традиционно отличались, что сказывается на разнице в терминологии, например, вентиль – это клапан в пневматике и золотник в гидравлике. Они переключают потоки воздуха или масла и могут работать от электросигналов с помощью электромагнитов (соленоидов).

Пневматика использует воздух, который легко доступен, однако требуется его осушение и очистка от пыли. Воздух в случае утечек не создает загрязнения. Он, как и любой газ, заметно сжимается под давлением и проявляет свойства упругости, на нем делают амортизаторы и демпферы. На транспортных средствах (железнодорожной дороге, метро, трамваях, троллейбусах) тормозные системы работают от пневмоустройств. Причина здесь в том, что тормоза должны работать очень надежно, даже в случае отказа электросети или мотора. Это достигается благодаря наличию сжатого воздуха в специальном баллоне (ресивере), куда он закачивается компрессором. Здесь используется автоматическая система управления давлением воздуха в ресивере, поддерживающая его в заданных пределах (стабилизатор давления). Наличие сжатого воздуха привело к тому, что привод дверей также выполнен на пневмоцилиндрах, а двери должны работать надежно.

Благодаря упругости воздуха, пневмоцилиндры используются также в различных зажимных устройствах: зажимы заготовок в станках, схваты роботов.

В **гидравлике** используется практически несжимаемая жидкость, поэтому здесь можно передавать большие усилия при большой жесткости (изменение силы/давления не вызывает деформаций). Благодаря успехам в уплотнениях в настоящее время используют большие давления масла (10 МПа, около 100 атм). Небольшие диаметры поршня позволяют развить большие усилия (тонны). Гидравлика очень широко применяется в подвижных машинах, где требуются значительные усилия: в экскаваторах, самосвалах, погрузчиках, бульдозерах и т. д., она также применяется в станках для перемещения инструмента: протяжных станках, прессах и т. д. Одним из недостатков гидравлики можно считать загрязнение при утечках масла.

Наибольшее распространение в промышленном оборудовании в настоящее время имеет электропривод благодаря таким показателям, как высокий коэффициент полезного действия, широкие воз-

возможности управления и др. Электропривод предполагает использование электродвигателей.

4.2. Электродвигатели

4.2.1. Двигатель постоянного тока

Первым был создан электродвигатель постоянного тока, в то время основным источником электроэнергии были гальванические батареи. Российский ученый немецкого происхождения Якоби первым разработал практическую конструкцию такого двигателя в 1840 г. и установил его на лодку для привода гребного винта. Эта конструкция совершенствовалась и получила вид, приведенный на рис. 6.

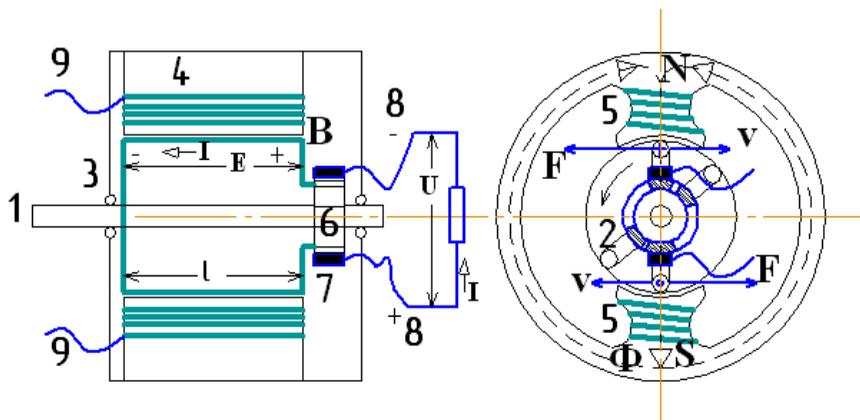


Рис. 6. Электрическая машина постоянного тока

На валу 1, который вращается в подшипниках 3, закреплен цилиндрический якорь 2 (ротор) из магнитного материала, на его поверхности в продольных пазах помещены проводники обмотки. На рис. 6 они представлены упрощенно в виде рамки провода, по которой идет ток I , на виде слева (расположенном справа на рисунке) этот ток изображен как «+», уходящий от нас, и как «•», приходящий к нам. Если вращать ротор внешней силой по часовой стрелке со скоростью ω проводника рамки, то проводник пересекает магнитный поток Φ . Магнитный поток создается электромагнитом ста-

тора 4 посредством обмоток 5, называемых обмотками возбуждения. По закону электромагнитной индукции, открытой Фарадеем в 1831 г., и известному правилу «правой руки» в проводе создается электродвижущая сила (ЭДС) E , создающая ток, имеющий направление, показанное на рис. 6. При этом по правилу «левой руки» ток одновременно создает силу F , направленную противоположно скорости v .

Если использовать данную машину как двигатель, то с помощью внешнего источника напряжения U нужно создать ток I в рамке провода, при этом создается сила F , которая поворачивает ротор и одновременно вал против часовой стрелки. Однако здесь возникает серьезная задача подвода электрического тока от неподвижного источника и проводов к вращающейся рамке. С этой целью для рамки пришлось использовать два скользящих контакта, установленных на цилиндрическом коллекторе 6, а внешние проводники тока подключить к двум щеткам 7, прижатым к этим скользящим контактам (см. рис. 6). Токопроводящая рамка уходит из-под щеток по мере поворота, но на ее место становится новая рамка и т. д. Можно сказать, что якорь сам себя гонит, подключая с помощью коллектора и щеток все новые рамки обмотки. Он ускоряет вращение, стремясь уравновесить приложенное извне напряжение U посредством создаваемой противоЭДС E . Барабан коллектора полностью занят на все 360° контактами (ламелями) рамок обмотки якоря.

В идеальном случае для простоты не будем учитывать потери энергии на электрическом сопротивлении обмоток, коллектора со щетками и т. д. Тогда работа рассмотренного электродвигателя характеризуется зависимостями

$$U = E = k \cdot B \cdot l \cdot R \cdot \omega, \quad (1)$$

где U – напряжение на щетках двигателя, подводимое извне;

E – противоЭДС, создаваемая в обмотке якоря по закону электромагнитной индукции от движения проводника в магнитном поле;

k – постоянный коэффициент, характеризующий данный электродвигатель, учитывающий, например, количество витков обмоток;

B – значение индукции магнитного поля в зазоре между статором и якорем;

l – длина обмотки, якоря;

R – радиус обмотки якоря;

ω – угловая частота вращения якоря;

$$M = k \cdot I \cdot B \cdot l \cdot R, \quad (2)$$

где M – момент на валу,

I – ток якоря.

По закону сохранения энергии в рассматриваемом идеальном случае подводимая электрическая мощность в установившемся режиме работы равна выходной механической мощности:

$$P = U \cdot I = M \cdot \omega. \quad (3)$$

Способность данной электромашины создавать электродвижущую силу используют для ее работы в качестве электрического генератора, а не только электродвигателя. Это соответствует общему принципу обратимости электрических машин [3].

В реальности при работе электромашин, как и других устройств, существуют потери энергии, что заставляет учитывать их КПД, который всегда меньше 1. В данном случае энергия теряется на сопротивлении электрических цепей r :

$$P_{\text{потерь}} = I^2 \cdot r. \quad (4)$$

Из соотношения (3) с учетом потерь (4)

$$P = U \cdot I = E \cdot I + I^2 \cdot r.$$

Из соотношения (1) для двигателя

$$U = E + I \cdot r.$$

Для генератора

$$U = E - I \cdot r. \quad (5)$$

К сожалению, скользящие контакты щеток и коллектора порождают много проблем и являются слабым местом конструкции данной электрической машины:

1) трение изнашивает сравнительно мягкие токопроводящие щетки и коллектор;

2) искрение под щетками создает электромагнитные помехи и также ускоряет износ;

3) в процессе эксплуатации приходится чистить коллектор от частиц материала щеток (например, промывать ваткой, смоченной в бензине), а также заменять изношенные щетки.

Тем не менее эта старейшая электромашина пока еще широко применяется и работает также на переменном токе, например, в электроинструменте (дрели, дисковые пилы и т. д.). К ее достоинствам относится возможность достаточно просто изменять частоту вращения вала ω в зависимости от подаваемого напряжения U или индукции в зазоре B , которую можно изменять, изменяя ток возбуждения электромагнитов статора. Это вытекает из уравнения (1), из выражения (2) следует, что можно изменять момент M на валу с помощью изменения тока I или индукции B . Это позволяет успешно применять такие электромашины там, где нужен плавный запуск и регулирование частоты вращения (например, транспорт: трамвай, метро, лифт), где нужна большая частота вращения (электроинструмент: дрели, дисковые пилы и т. д.).

При сравнении свойств двигателей очень важной является механическая характеристика $f = \omega(M)$ – зависимость частоты вращения от момента на валу, создаваемого нагрузкой при постоянном напряжении на входе U , рис. 7. В идеальном случае, выражение (1), ω не зависит от M и определяется только напряжением на входе $U = E$ (противоЭДС). Однако в реальном случае по мере роста момента M будет расти ток I по выражению (2), что приведет к росту потерь напряжения на сопротивлении r , формула (5), и соответственно падению E и падению ω из выражения (1).

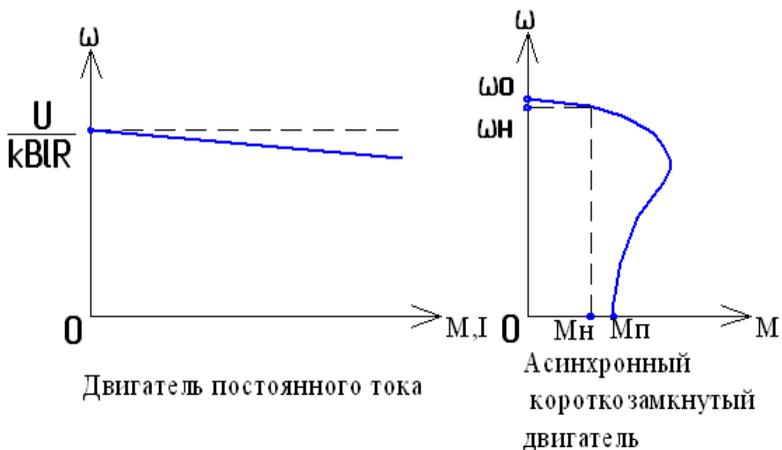


Рис. 7. Механическая характеристика электродвигателей

С появлением новых электронных элементов и новых магнитных материалов удалось создать бесколлекторный двигатель постоянного тока. Одну из его конструкций, широко применяемую в ЭВМ для привода вентиляторов и дисков, можно представить следующим образом по рис. 8.



Рис. 8. Статор бесколлекторного двигателя вентилятора

Для создания магнитного поля статора используются постоянные магниты, а статор превращают в ротор, тогда к нему не нужно подводить ток. Соответственно якорь становится статором, к нему подводится ток без всяких скользящих контактов. Возможно, поэтому удобно использовать для таких двигателей термин «якорь», а не «ротор», как далее в электромашинках переменного тока. Переключение рамок обмотки якоря выполняют посредством полупроводниковых ключей, которые связаны с ротором через магнитное поле. Постоянные магниты ротора приводят в действие эти специальные полупроводниковые ключи посредством эффекта Холла, то есть они переключают цепь, используя магнитные сигналы. В другом варианте двигателя используют ЭДС, наводимую ротором в обмотках статора. Для упрощения конструкции применяют минимальное число рамок обмотки якоря – две. Внешний вид статора такого двигателя приведен на рис. 8 [2]. Можно представить, что снаружи на статор надет стакан ротора с постоянными магнитами, все это находится внутри крыльчатки вентилятора и вращается на валике, вставленном в центр статора. Такие двигатели создают очень малые электромагнитные помехи.

4.2.2. Асинхронный двигатель

Наибольшее распространение в промышленности получил асинхронный двигатель переменного тока с короткозамкнутым ротором (squirrel-cage induction motor). Честь его изобретения принадлежит М. Доливо-Добровольскому в 1890 г. Такой двигатель имеет ряд достоинств: высокий КПД, высокую надежность, простоту конструкции, низкую стоимость. Его недостатки (сложность регулирования частоты вращения и большие пусковые токи) в настоящее время преодолены благодаря современным электронным средствам коммутации и управления с помощью ЭВМ, удешевившим частотное управление приводом. Внешний вид двигателя приведен на рис. 9 [2], 10.



Рис. 9. Асинхронный короткозамкнутый двигатель.
Внешний вид

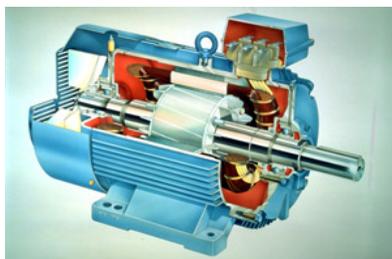


Рис. 10. Асинхронный короткозамкнутый двигатель.
Внутреннее устройство

В современной системе электроснабжения применяют три фазы напряжения и тока, подаваемые по трем проводам. Изначально на электростанции турбогенераторы создают переменное напряжение, вращая электромагнит ротора внутри трехфазной обмотки статора. На рис. 11 внизу показаны различные положения вращающегося ротора (полюса магнита Ю и С в соответствии со стрелкой компаса) и соответственно значения каждой из трех фаз тока: I_1 , I_2 , I_3 . Для удобства представления каждая синусоида изображается вращаю-

щимся вектором, при этом она получается как проекция на вертикальную координатную ось. Эти три синусоиды принято изображать, как на рис. 12, а фазы обозначать латинскими буквами A , B , C .

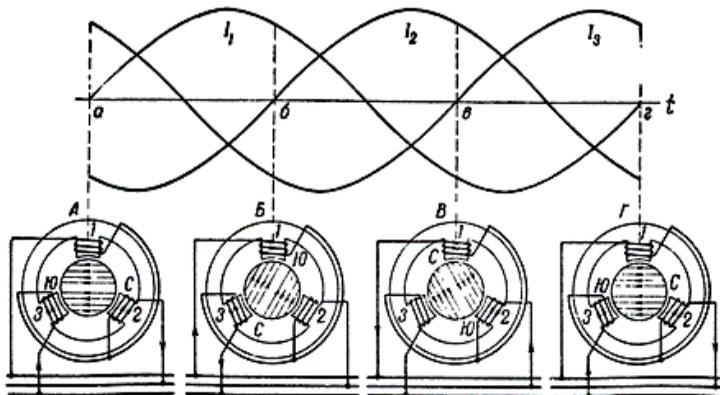


Рис. 11. Получение трехфазного тока в генераторе

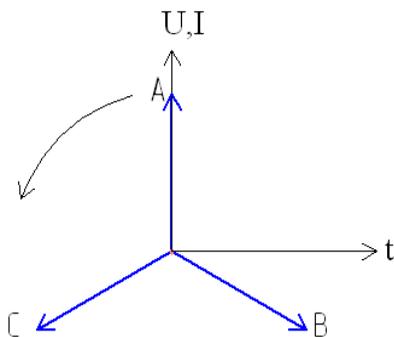


Рис. 12. Трехфазная система напряжений и токов

Когда трехфазный ток попадает в аналогичную генератору трехфазную обмотку статора электродвигателя, он также создает вращающееся магнитное поле. Но ротор двигателя построен совершенно иначе. У него изначально нет никаких магнитов, в роторе помещены короткозамкнутые толстые проводники, как изображено на рис. 13.

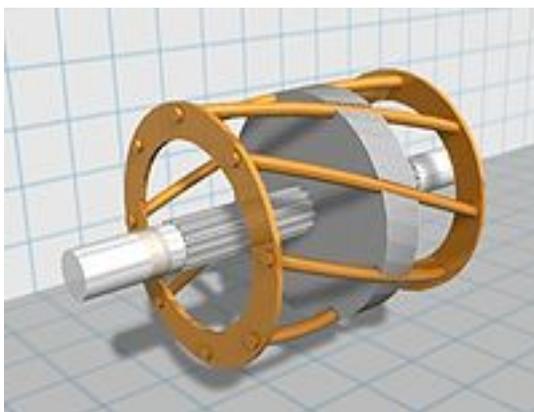


Рис. 13. Обмотка ротора типа «белчья клетка»

При включении электродвигателя в сеть вращающееся магнитное поле пересекает проводники ротора, наводя (индуцируя) в них ЭДС (отсюда английское название *induction motor*). Эта ЭДС создает токи, которые формируют магнитный поток, сцепляющийся с полем статора. Это поле увлекает за собой ротор, который начинает вращаться. В первый момент пуска поле статора вращается относительно ротора с максимальной частотой

$$\omega_0 = 2 \pi f,$$

где f – частота электросети, равная 50 Гц (в Европе).

Постепенно ротор раскручивается, разница частот вращения ротора ω_1 и поля статора: $\omega_0 - \omega_1$ уменьшается, но она не может сравняться с нулем. Причина здесь в том, что при нулевой разнице поле статора не будет пересекать проводники ротора, не будет токов ротора и не будет сцепления ротора с полем статора. Относительную разницу частот вращения ротора и поля статора принято называть скольжением:

$$s = (\omega_0 - \omega_1) / \omega_0; \quad 1 \geq s \geq 0.$$

В момент пуска асинхронный короткозамкнутый двигатель потребляет большой пусковой ток, при этом $s = 1$. Он похож на

трансформатор, у которого накоротко замкнута вторичная обмотка, в которой течет большой ток короткого замыкания. По мере раскручивания ротора ток в нем уменьшается, уменьшается и ток статора, потребляемый от электросети.

Из-за больших бросков тока пуск асинхронного короткозамкнутого двигателя, особенно большой мощности, создает проблемы для другого оборудования, подключенного к сети, так как в сети падает напряжение. Применение частотного регулирования скорости двигателя снимает проблемы пуска.

На рис. 7 справа показана механическая характеристика асинхронного двигателя. В момент пуска при неподвижном роторе двигатель развивает пусковой момент $M_{п}$, показанный точкой на горизонтальной оси при $\omega = 0$. Двигатель может раскручиваться, если момент сопротивления от нагрузки меньше $M_{п}$. На рис. 7 $M_{н}$ обозначает номинальный момент нагрузки, на который рассчитан двигатель. Частота вращения растет и устанавливается в верхней точке на вертикали $M_{н}$, на графике предполагается, что момент нагрузки равен $M_{н}$, при этом существует некоторое скольжение. Если снять момент нагрузки $M_{н} = 0$, то установится так называемый режим холостого хода, когда скольжение уменьшится почти до нуля и ротор будет вращаться почти с максимальной частотой ω_0 .

4.2.3. Синхронный двигатель

По принципу обратимости электрических машин данный двигатель имеет то же устройство, что и синхронный генератор переменного тока на рис. 11. У него такая же обмотка статора, как и у асинхронного двигателя, но ротор обычно представляет собой постоянный магнит, который жестко притягивается к вращающемуся полю статора без всякого скольжения. Частота его вращения

$$\omega_0 = 2 \pi f$$

независимо от момента нагрузки, поэтому он называется синхронным. Это ценно для системы управления, однако у него очень малый пусковой момент, значительно меньший, чем у асинхронного, поэтому в его роторе часто помещают еще и короткозамкнутую обмотку. Таким образом, он становится и асинхронным при пуске.

5. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ (FEEDBACK)

Изучая усилители [1], мы убедились, что коэффициент передачи всего усилителя определяется коэффициентом передачи цепи обратной связи. Аналогичная картина существует и в САУ – характеристики системы во многом определяются характеристиками обратной связи, основной элемент которой – датчик (sensor – от слова sense – ощущение, чувство). Аналогия между человеком и САУ уже обсуждалась ранее. Датчиком можно считать специальное устройство, которое позволяет определить текущее значение параметра состояния объекта управления. Например, датчик температуры определяет текущее значение температуры объекта. Иначе можно сказать, что датчик дает сигнал о текущем значении физической величины на его входе. Имеется большое сходство датчика с измерительным устройством (прибором). Отличие же состоит в том, что измерительный прибор показывает значение физической величины человеку, а датчик передает это значение устройству управления, например, управляющей ЭВМ. Есть приборы, которые одновременно исполняют и то и другое.

С точки зрения целенаправленной деятельности обратная связь – это определение реального состояния ситуации, которой мы управляем, приводя ее к желаемому состоянию (стремясь к достижению цели и преодолевая различные трудности – помехи, препятствия). В программной реализации задач управления иногда используют просто понятие «определения текущего состояния объекта управления», не указывая, что это обратная связь. С другой стороны, в усилителях, где есть явные цепи обратной связи, редко используется термин «датчик», например, в усилителе звуковой частоты на рис.12 [1] просто применяют делитель напряжения на двух резисторах. Специальным устройством его называть нецелесообразно.

Датчики

Датчики имеют следующие характеристики:

1) зависимость выхода от входа; например, в нагревателе [1] использован датчик температуры с коэффициентом передачи $K = 0,05$ вольт на градус Цельсия ($K = 0,05 \text{ В}/^\circ\text{C}$); постоянство коэффициента передачи

выражают термином «линейность», что соответствует графику зависимости в виде прямой линии;

- 2) точность преобразования входной величины в выходную;
- 3) время преобразования;
- 4) способ установки датчика на объекте управления;
- 5) обычные характеристики любого устройства – надежность, размеры, масса, стоимость.

В отличие от исполнительных элементов, разновидностей которых сравнительно мало, датчиков существует великое множество. Поэтому их желательно классифицировать по различным признакам:

1) воспринимаемой на входе физической величине, которая совпадает с управляемым параметром объекта управления; например, при управлении температурой эта величина воспринимается на входе; выходная величина, как правило, – электрический сигнал в виде напряжения или тока;

2) типу сигнала на выходе – аналоговый или дискретный, последний может быть цифровым, как у любого цифрового (двоичного) устройства, например ЭВМ;

3) физическому принципу работы, обычно физическому явлению, используемому для преобразования входной величины в электрическую.

У всех датчиков существуют общие требования к их работе:

1) способность работы в условиях объекта управления, а эти условия часто бывают неблагоприятными, например, конечный выключатель обливается смазывающе-охлаждающей жидкостью в зоне резания металла на станке, на него падает металлическая стружка и т. д.;

2) удобное и надежное крепление на объекте управления и электрическое соединение с системой управления;

3) высокая надежность работы, достоверность;

4) обеспечение требуемой точности в течение длительного времени, как у измерительных приборов;

5) датчик не должен сам искажать состояние объекта управления, например не должен его нагревать.

Очень большой класс датчиков называют: «датчик приближения», или «бесконтактный выключатель», или «сенсор». Эти датчики дают на выходе одну логическую величину (один разряд «0» или «1») в зависимости от наличия или отсутствия материального тела около дат-

чика, наличия или отсутствия света, магнитного поля и т. д. Например, на рис. 1 [1] такой датчик используется в качестве конечного выключателя.

Упрощенную схему такого датчика можно представить [5] в виде.

Чувствительный элемент – Схема преобразования – Узел коммутации.

Движущийся объект или элемент, входя в зону чувствительности бесконтактного выключателя, вызывает его срабатывание. Узел коммутации может подавать сигнал на вход контроллера, обмотку реле, пускателя или другую нагрузку. Отсутствие механического контакта между взаимодействующим объектом и чувствительным элементом, а также электронная коммутация нагрузки обеспечивают надежность работы бесконтактного выключателя. В зависимости от вида чувствительного элемента эти выключатели подразделяются на индуктивные, емкостные, оптические и ультразвуковые. На рис. 14 показан пример различных бесконтактных выключателей.



Рис. 14. Бесконтактные выключатели

В автоматизированном электроприводе традиционно используются датчики частоты вращения, называемые тахогенераторами. Они представляют собой небольшую электрическую машину по-

стоянного тока, которая механически соединена с выходным валом привода и дает на своем выходе напряжение, пропорциональное частоте вращения, как видно из выражения (1). С внедрением цифровых систем стали использоваться импульсные (инкрементные) и кодовые датчики угла поворота, показанные ниже на рис. 15 [6].



Принадлежности к угловым датчикам: переходные муфты различных конструкций, фланцевые адаптеры и тросовые преобразователи линейных перемещений).

Датчики угловых перемещений

Широкий выбор инкрементальных и кодовых кр датчиков (энкодеров):

Инкрементальные датчики:

- до 5.000 импульсов за оборот, а исполнения п шенной точности (с интерполяцией сигнала) – 36.000 импульсов за оборот
- скорость вращения – до 12.000 мин⁻¹
- диаметр корпуса от 24 до 103 мм
- тип выхода: последовательности импульсов, I или синусоида (зависит от исполнения)

Кодовые датчики (датчики абсолютного положе

- до 14 бит, код Грея, бинарный код и др.
- одно- и многооборотные исполнения (с сохранением координаты)
- скорость вращения – до 10.000 мин⁻¹
- диаметр корпуса от 58 до 90 мм
- тип выхода: SSI, параллельный, RS485, AWG-кол, PROFIBUS-DP или CANopen (зависит от и нения)

Рис. 15. Датчики угловых перемещений

Импульсный датчик представляет собой диск с радиальными прорезями, пересекающими тонкий луч света. Каждая прорезь дает импульс света на фотозлемент, который преобразует его в электрический импульс. Счетчик этих импульсов накапливает текущее значение угла поворота. Если вал вращается в обе стороны, то учитывается направление вращения и используется реверсивный счетчик импульсов: импульсы в положительном направлении вращения подаются на вход +1 счетчика (инкремент), импульсы в отрицательном направлении вращения подаются на вход –1 (декремент). Частота импульсов дает частоту вращения вала.

Диск кодового датчика представляет собой фотомаску с концентрическими кругами прозрачных и темных участков. Каждый круг соответствует одному двоичному разряду кода, например кода Грея. В этом коде соседние значения отличаются только по одному разряду, чтобы избежать известного явления гонок. Этот код затем может преобразовываться в двоичное число угла поворота или частоты вращения.

Датчики могут быть и очень простыми, и очень сложными. Например, простейшую цепь обратной связи усилителя на двух резисторах датчиком называть не принято. С другой стороны, есть датчики, которые содержат в своем составе микроЭВМ и сетевой адаптер для подключения к компьютерной сети, например, некоторые оптические датчики фирмы Turck [6].

6. ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В качестве примера САУ можно рассмотреть указанный привод типа SB-19 [7], его схема приведена на рис. 16. Отдельные САУ могут входить в состав других САУ, в данном случае привод SB-19 входит в состав САУ управления движениями производственного механизма, например крана (лифта). Данный привод, как элемент многих САУ управления движениями, изготавливается и продается в больших количествах.

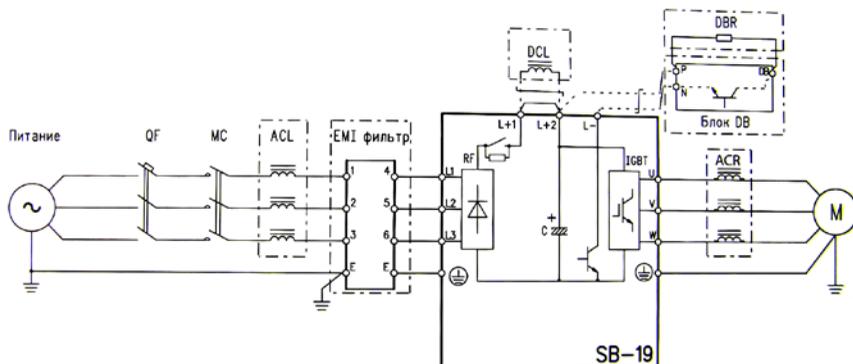


Рис. 16. Частотно-регулируемый электропривод переменного тока SB-19

Он позволяет управлять частотой вращения

$$\omega_0 = 2 \pi f$$

магнитного поля статора и соответственно вала двигателя переменного тока M , показанного на рис. 16 справа. Как правило, это асин-

хронный двигатель с короткозамкнутым ротором, но может применяться и синхронный двигатель с постоянными магнитами в роторе. Слева кружком показана трехфазная электрическая сеть питания. Основная часть привода показана в центре, остальные элементы к нему добавляются:

QF – защита от КЗ;

МС – пускатель (контактор) для режима динамического торможения;

ACL и ACR – реакторы (индуктивность) для уменьшения тока при КЗ и для сглаживания кривой тока;

EMI – фильтр помехоподавления (EMI – Electro-Magnetic Interference);

DB – динамическое торможение (DB-Dynamic Bracking) включением обмоток на резисторы DBR;

DCL – реактор звена постоянного тока;

M – электродвигатель (асинхронный или синхронный).

Сам привод SB-19 напоминает блок питания ЭВМ, но без понижающего трансформатора. Сначала переменное напряжение сети выпрямляется в RF, сглаживается емкостью С и затем переключается мощными высоковольтными транзисторами IGBT, включенными по схеме трехфазного моста, аналогичного однофазному мосту, рассмотренному ранее. Здесь применяется широтно-импульсная модуляция на частоте десятков килогерц для изменения значения напряжения. Это нужно делать с целью поддержания постоянных значений тока в обмотке двигателя при изменении частоты напряжения (сопротивление индуктивности падает с уменьшением частоты). Кроме того, привод создает в обмотке двигателя кривую тока, близкую к синусоиде, по требованию норм качества электроэнергии. График напряжения и тока фазы показан на рис. 17.

Схема подключения привода к внешним цепям управления показана на рис. 18. Следует обратить внимание на оптические развязки в цепях логических входов. Оптические развязки получают в специальных микросхемах, называемых оптопарами. В них входы и выходы электрически изолированы друг от друга, а двоичный сигнал передается через свет. Это необходимо для двоичной связи цепей с большой разницей потенциалов.

Форма кривых выходного напряжения и выходного тока ЧРЭ SB-19

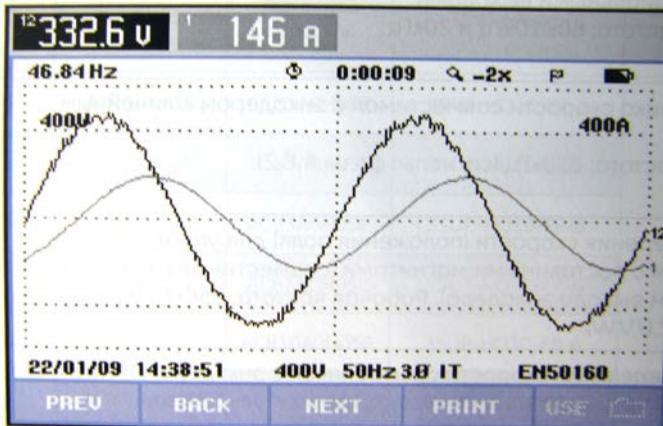


Рис. 17. График напряжения и тока фазы электродвигателя

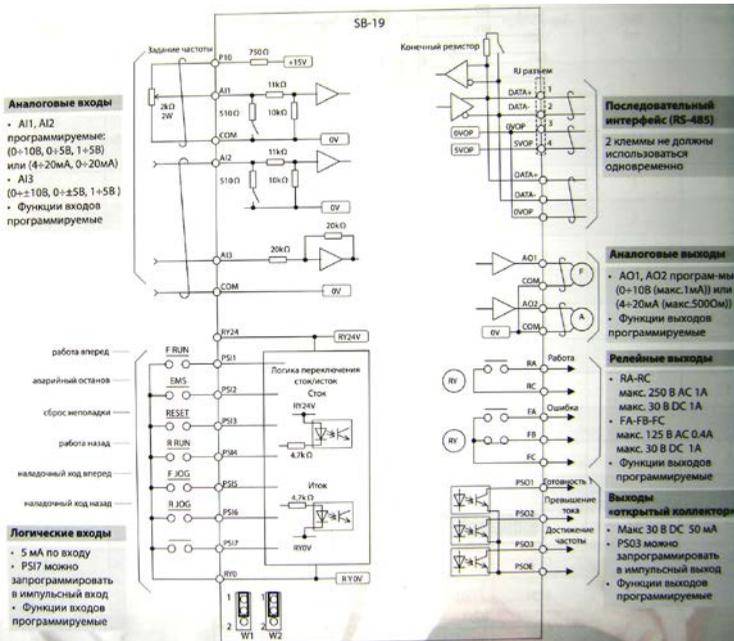
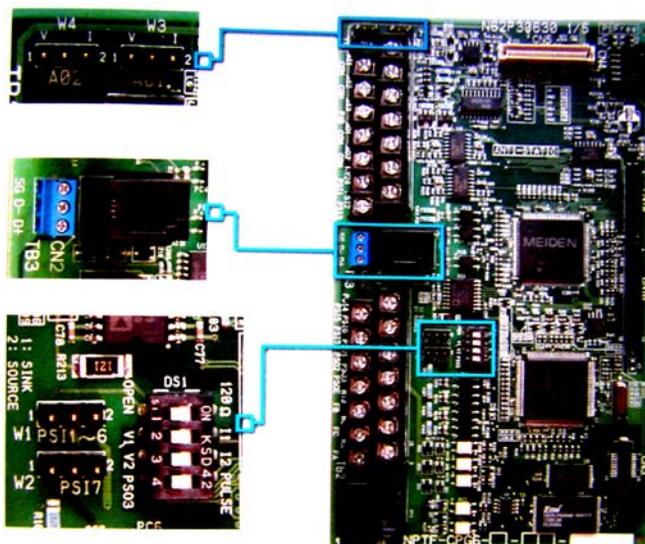


Рис. 18. Схема подключения цепей управления

В данном приводе имеется встроенный ПЛК (программируемый логический контроллер), он может программироваться на языке так называемых лестничных диаграмм (схем на контактах).

Программу можно ввести или изменить с панели оператора, можно также загрузить программу с ПК через последовательный интерфейс. Объем программной памяти – 20 блоков по 16 команд (логические и арифметические операции, сравнение, таймеры и т. д.), разрядность чисел – 32. Один блок команд обрабатывается интерпретатором циклически за 2 мс, что соответствует времени цикла самого привода. На рис. 19 показана печатная плата привода; по-видимому, верхняя квадратная интегральная схема (ИС) управляет электродвигателем, нижняя квадратная ИС – ПЛК.



Переключатели аналоговых выходов	W3 : 0-10В или 4-20мА (АО1) W4 : 0-10В или 4-20мА (АО2)
Стандартные последовательные порты связи	CN2 : Модульный разъем TB3 : Клеммник (Они соединены параллельно. С можно использовать только одну)
Переключатели релейных входов	W1 : PS11 по PS16 (Релейные входы) W2 : PS17 (Релейный или импульсный)

Рис. 19. Печатная плата привода

Повышение мощности привода

При разработке привода одним из важных требований является минимизация размеров и массы при сохранении мощности или, иначе, максимизация мощности при сохранении размеров и массы. Особенно это требование важно, например, в авиации, для ручного инструмента и т. д. При поступательном движении мощность

$$P = F \cdot V,$$

где F – сила;

V – скорость.

Для вращения

$$P = M \cdot \omega,$$

где M – момент;

ω – угловая частота вращения.

На примере двигателя постоянного тока из выражения (2) можно заключить, что размеры двигателя определяют его массу и момент. Поэтому для повышения мощности остается увеличивать угловую частоту вращения ω , что широко практикуют. В связи с этим, например в электродрелях, применяют коллекторные электродвигатели, а не асинхронные, которые значительно надежнее. В электродрелях двигатель вращается значительно быстрее, чем 3000 мин^{-1} (предел для асинхронного двигателя при частоте 50 Гц). Существуют специальные локальные электросети с частотой 400 Гц для питания ручного электроинструмента. За высокую частоту вращения приходится обычно платить тем, что на валу двигателя необходимо ставить редуктор. При повышении частоты вращения передаточное число редуктора увеличивают. В частотно-регулируемом электроприводе переменного тока можно достаточно легко повышать частоту переменного тока, поскольку электронные ключи имеют большой запас по частоте переключения постоянного тока после выпрямителя. Соответственно повышается мощность привода.

7. УПРАВЛЯЮЩИЕ ЭВМ (УЭВМ)

По аналогии с человеком управляющая ЭВМ выполняет функции его нервной системы, органы чувств человека – это датчики САУ, а руки и ноги – исполнительные элементы САУ. Быстрое развитие ЭВМ существенно изменило САУ в сторону цифровой техники, как и остальные области, например телекоммуникации (связь).

Если сравнить типичные требования к ЭВМ в САПР и в управлении, то можно заметить большую разницу:

1) УЭВМ работают в реальном масштабе времени, например, при управлении движением объекта нужно вычислить координаты следующей точки его траектории в момент пребывания его в предыдущей точке;

2) надежность УЭВМ должна быть очень высокой, так как ошибку исправлять, как правило, бывает некогда или невозможно; в САПР исправление ошибок – обычная процедура; с другой стороны, в управлении потери от ошибки бывают очень большими, например на транспорте или в энергосистеме;

3) условия окружающей среды для УЭВМ часто бывают неблагоприятными, например, на подвижных транспортных средствах, особенно водных или на химическом производстве; вообще, автоматизацию нужно проводить в первую очередь там, где находится человеку опасно для жизни или здоровья (в шахтах, под водой и т. д.);

4) УЭВМ, как правило, связана с одним определенным производственным механизмом и выполняет одну определенную программу, тогда как в САПР ЭВМ работает в мультипрограммном режиме под управлением сложной операционной системы, имеет накопителя информации большого объема.

Если подытожить кратко, то управляющая ЭВМ должна иметь максимальное быстродействие и надежность при минимальной стоимости. Отсюда понятно, что в качестве УЭВМ используются небольшие ЭВМ, часто в одной микросхеме. Программа работы УЭВМ хранится в ПЗУ, что снимает проблему вирусов и не требуется дисков. Нередко УЭВМ имеет максимально простой интерфейс с человеком (несколько светодиодов и кнопок), а может и вовсе его не иметь, так как связана только с управляемым объектом, например с электродвигателем.

В качестве УЭВМ широко используются ПЛК, а также цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) (digital signal processors – DSP), например TMS320, фирмы Texas Instruments [8, 9], одной из старейших в области микроэлектроники, начало выпуска TMS320 – 1982 г. Также ЦСП широко используются в звуковых системах, в том числе в ПК. В центре сквозного акустического тракта (рис. 18 [1]) находится ЭВМ, на входе которой включен АЦП (аналого-цифровой преобразователь), а на выходе – ЦАП (цифроаналоговый преобразователь), это и есть основная схема ЦСП. Он существенно доработан с целью получения максимального быстродействия.

TMS320 представляет собой целую серию различных микросхем, позволяющих строить самые разнообразные системы для многочисленных приложений. В этих системах используется как архитектура фон Неймана, так и Гарвардская, дающая большее быстродействие. Аналогично в ПК также используются обе архитектуры – ОЗУ соответствует первой, а кэш первого уровня – второй. Основной вид операции в TMS320

$$A = BC + D,$$

выполняемой за один такт; существенное достижение здесь в том, что за один такт выполняется умножение. Для многих практических задач управления используется 16-разрядное представление величин с фиксированной точкой (16-bit fixed-point). С целью повышения точности может применяться и 32-разрядное представление с плавающей точкой (32-bit floating-point), такое представление используется при работе со звуком. Для ускорения работы ЦСП также применяется конвейер команд (pipeline).

TMS320 модификации C240 нашел применение в частотно-регулируемом приводе с асинхронным электродвигателем (Induction Motor). Управляющая программа разработана на языке Ассемблер для TMS320. Переменные величины представлены 16 разрядами с фиксированной точкой. Работа программы синхронизирована прерываниями от внутреннего таймера. Программа занимает 3К слов в ПЗУ, объем ОЗУ данных – 544 слова. Используется 50 % производительности TMS320, один цикл управляющей программы выполняется за 35 мс. Показатели привода: диапазон частоты вращения 0–12 000 мин⁻¹, КПД инвертора (power electronic stage)

—
95 %, КПД всего привода свыше 85 %.

В качестве УЭВМ также широко используются ПЛК (программируемые логические контроллеры, PLC). Хотя их название предполагает в основном выполнение логических операций, они также могут выполнять арифметические операторы и во многом сходны с ЦСП. Один из употребительных языков их программирования – язык контактных схем (лестничных диаграмм) – предполагает логические операторы. Как было указано для привода ЧРЭ SB-19, в системе одновременно могут работать и ЦСП и ПЛК.

УЭВМ могут работать с большим количеством входной информации, что часто предполагает большое количество датчиков. По этой причине УЭВМ имеет развитый ввод/вывод стандартных типов: программный и по прерываниям, особенно от таймера. В каналах ввода/вывода могут присутствовать ЦАП и АЦП.

Предшественниками таких ЭВМ можно считать широко распространенные в 70-х, 80-х годах прошлого века мини-ЭВМ, например 16 разрядную PDP-11. Такие мини-ЭВМ имели размер одного шкафа, что было большим прогрессом по сравнению с десятками шкафов других ЭВМ, называемых теперь main frame.

Мини-ЭВМ широко применялись в автоматизации научных экспериментов, имели хорошо развитый ввод/вывод для подключения многочисленных датчиков (измерительных приборов). Регистры внешних устройств и ячейки ОЗУ входили в единое адресное пространство, что позволяло программе работать с ними по единой системе адресации. ЭВМ PDP-11 и более мощные VAX производились фирмой DEC, одной из ведущих в мире. Однако позже она потеряла финансовую самостоятельность и вошла в состав фирмы HP.

Существует также тенденция использования в управлении на всех его уровнях электроники персональных компьютеров (ПК) (процессоров, чипсета и т. д.) в виде одноплатных «промышленных ЭВМ (Industrial Computer)» и многоплатных ЭВМ, аналогично ПК. Однако конструкция таких ЭВМ существенно отличается от обычного ПК в сторону высокой надежности, например промышленный компьютер PEAK 870VL2 на базе Pentium 4 фирмы Nexcom [10]. Они имеют прочную, закрытую оболочку, стойкую против влаги, газов, вибрации и т. д. Вопросы использования таких ЭВМ при размере программ в несколько килобайт, как сказано выше для

TMS320, требуют серьезного экономического обоснования. Здесь многое зависит от перспектив расширения работ. Если намечается построение большой системы, то использование промышленных ЭВМ может быть выгодным, поскольку нужно будет сразу закладывать построение цифровой инфраструктуры (Digital Infrastructure) в виде надежной и производительной компьютерной сети, сети энергоснабжения, помещений, обучения специалистов и т. д. Здесь немаловажный фактор – экономия времени на расширение системы. Это можно представить как взгляд на систему сверху, что соответствует планомерному построению интегрированной САПР. Часто доминирует взгляд на построение системы снизу, когда начинают создавать простейшие САУ нижнего уровня. Экономически целесообразно учитывать сразу оба взгляда, чтобы в будущем избежать переделок системы.

8. СИСТЕМА SCADA

Это международный стандарт на построение АСУ, включая САУ. Можно сказать, что в нем учтены ранее указанные взгляды на построение системы снизу и сверху. В этом стандарте накоплен опыт построения АСУ с учетом перспективы развития компьютерных сетей и использования самого разнообразного оборудования и модульного принципа построения систем. Следует иметь в виду, что в настоящее время многочисленными предприятиями (фирмами) производится очень большой ассортимент различного оборудования, в том числе и электронного, но оно недостаточно стандартизовано. Такое нестандартное оборудование одних фирм не стыкуется с аналогичным оборудованием других фирм, что создает у пользователей зависимость от производителей и не всегда выгодно пользователям. Применение стандартного оборудования устраняет эти трудности для пользователей.

Рассмотрим простой пример системы [2], показанной на рис. 20.

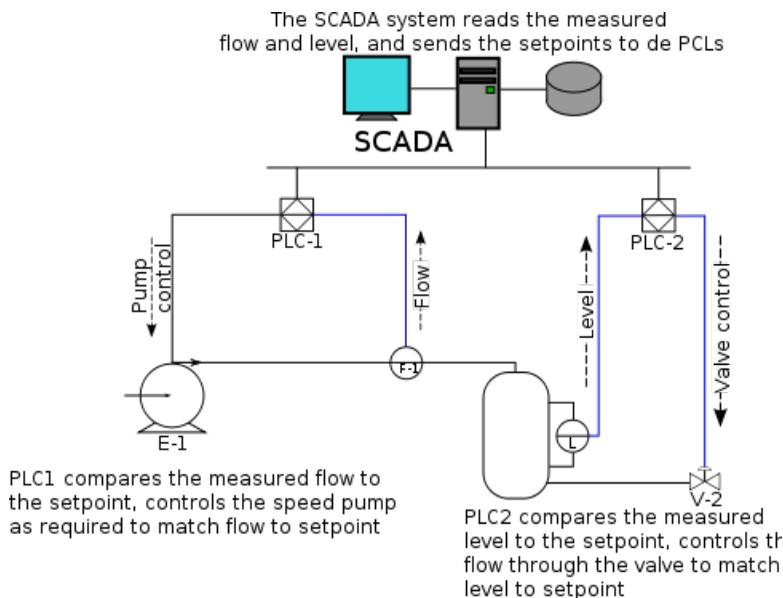


Рис. 20. Пример системы SCADA

На артезианской скважине, расположенной за чертой города, установлен насос (pump), который должен обеспечить определенный объем воды в единицу времени – расход (л/мин – flow). Датчик F-1 измеряет текущее значение расхода, а УЭВМ (PLC-1), изменяя частоту вращения электродвигателя насоса, поддерживает заданное значение (setpoint) расхода. Вода от насоса поступает в бак, где другая САУ с PLC-2 поддерживает определенный уровень воды, измеряемый датчиком L (level), открывая или закрывая вентиль (valve) V-2. В системе SCADA данные САУ образуют нижний уровень управления. УЭВМ в виде ПЛК (PLC), цифровых сигнальных процессоров (DSP) или других ЭВМ в общем виде называются RTU (Remote Terminal Unit – удаленное терминальное устройство). Эти устройства связаны с центром управления по компьютерной сети, ЭВМ центра получает и накапливает данные о расходе воды в колоде и об уровне воды в баке. Эта ЭВМ показывает данные управляющему персоналу, который на основании этих и других данных

(например, об ожидаемом расходе воды, ожидаемой погоде и т. д.) принимает решение о заданных значениях (setpoint) расхода и уровня в текущее время и передает их по сети в RTU. Сокращение SCADA расшифровывается как supervisory control and data acquisition – управление и сбор данных. Это название предполагает управление с участием человека (АСУ), поэтому важной частью является НМИ (Human-Machine Interface) – интерфейс человек-ЭВМ. Сюда входят различные графические средства отображения информации (видеоподсистема ПК с экранами и программным обеспечением), средства ввода информации. На экранах обычно наглядно показывается схема управляемых объектов и текущие значения управляемых параметров. Для облегчения принятия решений персоналом имеется еще база данных, например о предыстории событий, а также различные системы принятия решений.

Как и в любой реальной системе управления, большое внимание уделяется вопросам безопасности и надежности работы. Всегда существует опасность аварий, поэтому предусматриваются меры по обнаружению и устранению аварийных ситуаций, например, может отказать электродвигатель насоса вследствие исчезновения напряжения в электросети и т. д. В таком случае нужно принимать срочные меры, например, включить насос с другого колодца. Это может предпринять центр управления. В системе SCADA специально предусмотрены средства аварийной сигнализации и возможности устранения последствий аварий, например, дублирование (резервирование).

SCADA предполагает охват объектов на значительном пространстве, например в системе водоснабжения города, как в данном примере. Поэтому одной из важнейших ее функций является передача данных. В настоящее время здесь используются последние достижения в области компьютерных сетей и стандартные решения на базе Internet (TCP/IP-based SCADA networks) и Ethernet. Поскольку Internet – глобальная сеть, то возникает угроза вмешательства извне в работу системы управления. Особенно опасны злонамеренные вмешательства, например со стороны хакеров. Против этого применяются стандартные меры информационной безопасности (Information Security): специальные промышленные брандмауэры (specialized industrial firewall) и VPN, а также усовершенствованное шифрование сообщений (Advanced Encryption) [2].

9. КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ В САУ (PROFIBUS И CAN)

В системах SCADA на нижнем уровне используются компьютерные сети специального типа для связи различных элементов САУ между собой. Существует около трех десятков различных типов таких сетей. Широко распространен, особенно в Европе, тип сети PROFIBUS, рис. 21, созданный первоначально в Германии.

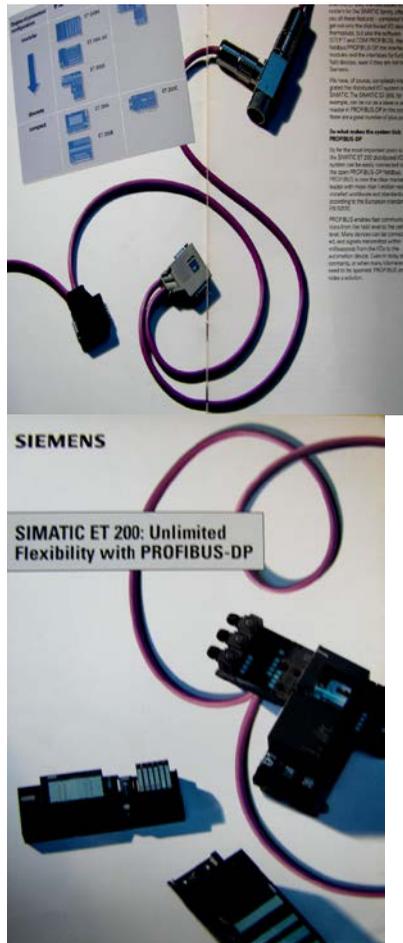


Рис. 21. Кабели и разъемы сети PROFIBUS
в оборудовании фирмы SIEMENS [11]

PROFIBUS для передачи информации позволяет применять видную пару проводников с волновым сопротивлением 150 Ом на максимальное расстояние 100–1200 м между повторителями со скоростью соответственно 12 Мбит/с – 9,6 кбит/с (чем дальше, тем медленнее). При использовании оптоволоконных кабелей расстояние между повторителями достигает 15 км. Используются также специальные наборы функций – профили для различных областей применения сети. Эти наборы стандартизованы, и информация о них открыта (open), например, для управления движениями существует профиль PROFIDrive.

В Беларуси имеет большое развитие производство грузовых автомобилей, автобусов, троллейбусов, большегрузных самосвалов и другой колесной техники. Эти технические средства постепенно насыщаются большим количеством САУ с применением ЭВМ. Для обмена данными здесь применяется специальный тип сети – CAN (Controller Area Network). В этой сети для передачи данных на расстояние используется шина (bus) и не имеется центральной ЭВМ (host computer). Создание сети CAN первоначально было начато немецкой фирмой Robert Bosch GmbH в 1983 г. В настоящее время использование сети CAN обязательно в автомобилях, производимых в Евросоюзе [2].

Развитию данного типа сети способствовало очень быстрое развитие всего автомобилестроения. Немалую роль сыграла в этом сильная конкуренция производителей, и отсюда значительные ассигнования на новые разработки, это продолжается и сейчас в связи с созданием электроавтомобилей, как показано на рис. 22.



Рис. 22. Применение частотно-регулируемого привода в электромобиле

Сами по себе электронные средства, применяемые в автомобилях, ничем существенно не отличаются от других, применяемых в аналогичных условиях вибрации, влажности и т. д. Поэтому стандарт CAN используется и в других областях промышленной автоматизации во многом благодаря низкой стоимости контроллеров и процессоров для CAN. Здесь важно отметить, что некоторые производители электронного оборудования преуспевают благодаря работе на определенный успешный сектор экономики.

Все установленное на машине автоматическое оборудование подключается к отдельным узлам (node), связанным проводной шиной (bus), как показано на рис. 23.

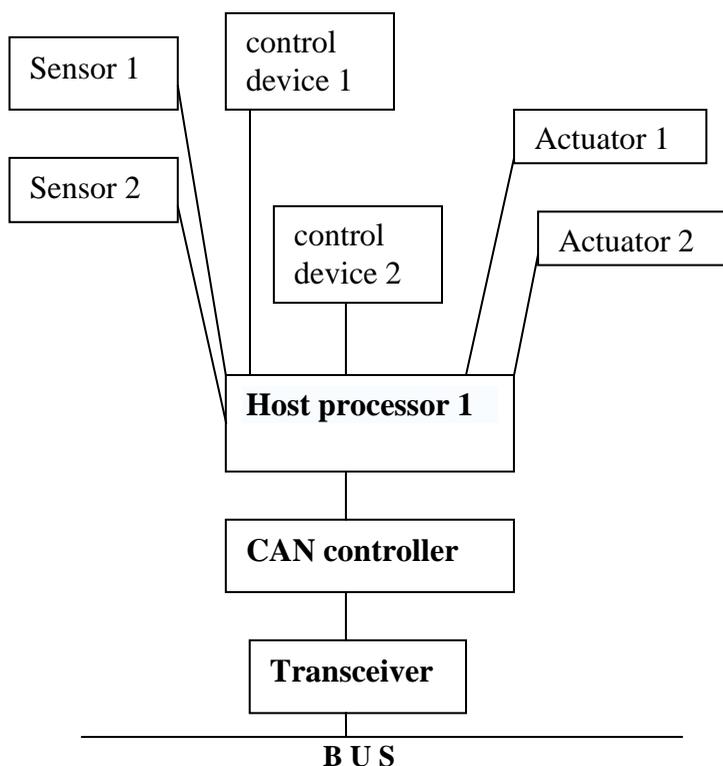


Рис. 23. Схема узла в компьютерной сети CAN

При скорости передачи 1 Мбит/с максимальное расстояние между узлами равно 40 м. Это расстояние можно увеличивать до 500 м, но при этом скорость снижается до 125 кбит/с. В любой момент времени на шину может передавать данные только один узел. Это стандартное правило для канала передачи сообщений, так как два и более передатчика на канале создают помехи друг другу, что исключает правильную работу канала. К узлу могут подключаться через процессор (Host processor) различные элементы САУ: датчики (Sensor 1, 2,...), управляющие устройства (Control device 1, 2,...), исполнительные элементы (Actuator 1, 2,...). Узлы имеют различный приоритет при передаче сообщений, аналогично приоритету прерываний от различных устройств в ПК. Например, в автомобиле высокий приоритет имеют тормоза, в их работе должна быть минимальная задержка.

Процессор на рис. 23 расшифровывает полученные от шины (BUS) сообщения и отправляет их нужному управляющему устройству или исполнительному элементу, а также определяет, какие сообщения нужно передавать от датчиков и управляющих устройств, и передает их CAN-контроллеру. Контроллер накапливает последовательно полученные от трансивера биты в законченные сообщения, выставляет прерывание процессору и передает ему сообщение. При передаче на шину, наоборот, контроллер побитно передает полученное от процессора сообщение в трансивер. При приеме данных трансивер работает как адаптер уровня сигналов между шиной и контроллером, а также как электрическая защита контроллера от перенапряжений, которые возможны в шине. При передаче на шину он также работает как адаптер. Трансиверы в связи имеют функцию приема -передатчиков (transmitter-receiver).

Список источников

1. Бородуля, А.В. Техническое обеспечение интегрированных САПР : методическое пособие : в 3 ч / А. В. Бородуля, А. В. Василевский, В. А. Кочуров. – Минск : БНТУ, 2012. – Ч. 2. – 71 с.
2. <http://www.wikipedia.org>
3. Петров, Г. М. Электрические машины : учебник для втузов : в 3 ч. / Г. М. Петров. – М. : ГЭИ, 1956. – Ч. 1. – 224 с. : ил.
4. <http://electricalschool.info/main/osnovy/413-ustrojstvo-i-princip-dejstvija.html>
5. Проспект изделий завода «Сенсор», 2005. – 6 с. : ил.
6. Проспект изделий фирмы Turck. – 36 с. : ил.
7. Проспект частотно-регулируемого электропривода SB-19 фирмы Meidensha Co. – 33 с. : ил.
8. TMS320 DSP Development Support, Reference Guide, Literature Number: SPRU011E, January 1997, Copyright W 1996, Texas Instruments Incorporated.
9. Digital Signal Processing Solution for AC Induction motor. – Texas Instruments Incorporated, 1996.
10. www.nexcom.com
11. Проспект изделий фирмы Siemens. – 20 с. : ил.

Учебное издание

БОРОДУЛЯ Алексей Валентинович
ВАСИЛЕВСКИЙ Александр Витальевич
КОЧУРОВ Вадим Александрович

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНТЕГРИРОВАННЫХ САПР**

Методическое пособие

В 3 частях

Часть 3

Редактор *Т. Н. Микулик*
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 05.11.2012. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,67. Уч.-изд. л. 2,09. Тираж 100. Заказ 567.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.