

**Владимирский государственный университет**

**О. В. ВЕСЕЛОВ**

**ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ  
КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Учебное пособие**

**Владимир 2022**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

О. В. ВЕСЕЛОВ

# ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие

*Электронное издание*



Владимир 2022

ISBN 978-5-9984-1351-3

© ВлГУ, 2022

© Веселов О. В., 2022

УДК 681.518.5  
ББК 31.291+ 30.82

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры промышленной электроники и интеллектуальных  
цифровых систем Московского государственного технологического  
университета «СТАНКИН»  
*В. В. Филатов*

Доктор технических наук, профессор  
зав. кафедрой информатики и защиты информации  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*М. Ю. Монахов*

**Веселов, О. В.** Прикладные методы компьютерной диагностики электромеханических систем [Электронный ресурс] : учеб. пособие / О. В. Веселов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2022. – 200 с. – ISBN 978-5-9984-1351-3. – Электрон. дан. (3,82 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Изложены вопросы создания систем и алгоритмов диагностики электромеханических систем.

Предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлениям подготовки 15.03.06, 15.04.06 – Мехатроника и робототехника. Может быть использовано студентами других специальностей при изучении соответствующих курсов, выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 52. Табл. 9. Библиогр.: 109 назв.

ISBN 978-5-9984-1351-3

© ВлГУ, 2022  
© Веселов О. В., 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 5   |
| ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ<br>ДИАГНОСТИКИ .....  | 10  |
| Глава 1. ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ<br>МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ<br>ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ..... | 26  |
| 1.1. Направления создания микропроцессорных систем<br>диагностики приводов.....                                      | 26  |
| 1.2. Структура электромеханического привода с контуром<br>стабилизации характеристик.....                            | 37  |
| 1.3. Обобщенная структурная схема контура стабилизации<br>характеристик .....  | 46  |
| Глава 2. АЛГОРИТМЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА<br>ДИАГНОСТИКИ ХАРАКТЕРИСТИК<br>ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА.....          | 55  |
| 2.1. Алгоритм диагностики электромеханических систем<br>на основе измерения количества информации.....               | 55  |
| 2.2. Диагностика электромеханических приводов<br>по энергии выходного сигнала.....                                   | 63  |
| 2.3. Диагностика электромеханических систем<br>в пространстве состояний.....   | 75  |
| 2.4. Диагностика электромеханических систем<br>с использованием логических моделей на основе<br>сетей Петри .....    | 90  |
| 2.5. Алгоритмы диагностики электромеханических систем<br>на основе методов обучения и самообучения .....             | 104 |
| Глава 3. ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ .....  | 126 |
| 3.1. Анализ тестовых, управляющих и возмущающих<br>сигналов.....   | 126 |
| 3.2. Формирование сигнала со случайными<br>характеристиками.....   | 131 |

|   |            |
|---|------------|
| 3.3. Формирование сигналов произвольной формы.....                        | 136        |
| 3.4. Определение параметров сигналов.....                                 | 139        |
| 3.5. Структурные схемы микропроцессорных генераторов<br>сигналов.....     | 150        |
| <b>Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ ВВОДА АНАЛОГОВОЙ<br/>ИНФОРМАЦИИ.....</b>    | <b>157</b> |
| 4.1. Выбор частоты квантования.....                                       | 157        |
| 4.2. Преобразование информации в подсистемах<br>аналогового ввода.....    | 163        |
| 4.3. Структурные схемы микропроцессорных систем<br>аналогового ввода..... | 168        |
| 4.4. Реализация схемы микропроцессорного ввода<br>информации.....         | 184        |
| <b>КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....</b>   | <b>186</b> |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>  | <b>188</b> |
| <b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>                                      | <b>189</b> |

## **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из наиболее важных задач современного этапа является создание высокопроизводительного, высокоточного оборудования. Особенности производственных отношений требуют от проектировщиков создания продукции, способной конкурировать на мировом рынке товаров и услуг. Это относится и к электромеханическим приводам, входящим в комплект оборудования технологических машин. Последние по своей сути являются сложнейшими техническими устройствами способными выполнять уникальные преобразования над информацией, обеспечивающие управление механической энергией на основе функции цели и заданного критерия качества.

В современных интегрированных системах машин осуществляется движение по нескольким координатам одновременно, а в состав технической системы (ТС) входят разнообразные электромеханические устройства: от простейших электромагнитных устройств до сложнейших систем приводов. При этом электромеханические приводы таких машин характеризуются большим числом и разнообразием процессов, происходящих в них. От их проявления в значительной мере зависит качество производимого продукта, а оценка параметров, влияющих на качество, затруднительна.

Естественно, что одним из аспектов следует считать использование специализированных контуров в системе управления электроприводом, ориентированных на поддержание заданных технических характеристик на всем жизненном цикле работы оборудования.

С одной стороны, это связано с недостатком информации о проведении объекта в условиях промышленной эксплуатации, т.к. для оценки используются простые аппаратные устройства, с другой - отсутствием системного подхода к проектированию приводов с позиции использования специальных технических средств и алгоритмов оценивания параметров, характеризующих текущее состояние.

Определение состояния привода и его параметров связано с большим объемом перерабатываемой информации, разнообразием источников информации, с различной физической природой сигнала, алгоритмов преобразования, расчетов и т.п. Существенные требования предъявляются и со стороны ТС в силу специфики функционирования, сложности реализации, повышенными требованиями к качеству движений. Системы оценки фактического состояния приводов в силу сложности ТС и алгоритмов функционирования оказываются во много раз сложнее, чем сами системы управления ТС.

Усиление интереса к оценке фактического состояния приводов в последние годы объясняется еще и тем, что создаются и применяются все более сложные устройства и системы при непрерывном увеличении темпов их производства, росте интенсивности их использования и повышении требований к надежности. В этих условиях интуитивные методы и ручные способы определения состояния сложных систем приводов оказываются малоэффективными или даже непригодными.

Для любого объекта на каждом этапе его жизни задаются определенные технические требования. Естественно, что эти требования должны быть удовлетворены на всех этапах жизни. Однако в процессе работы неизбежно возникают неисправности, приводящие к несоответствию техническим характеристикам или к выходу оборудования из строя. При этом возникает задача восстановления нормального состояния привода. Решение этой задачи невозможно без диагноза состояния. Диагноз технического состояния ЭМС осуществляется при помощи средств диагноза, а взаимодействие их с приводом и оператором образуют систему диагностики. В процессе оценки состояния выполняется триединая задача, связанная с проверкой исправности, работоспособности и правильности функционирования. При этом одной из важнейших задач диагностики состояния привода является поиск неисправностей, т.е. указание места и, возможно, причины возникновения неисправности.

Учитывая все сказанное можно сделать вывод, что для реализации дополнительных контуров в структуре привода единственным средством является использование микропроцессорных систем. И, пожалуй, самое важное, решение задач обеспечения стабильности ха-

рактик тесно связано с использованием систем с искусственным интеллектом.

В большинстве случаев проектирование сложных объектов ведется без должного учета того, как они будут проверяться и налаживаться в условиях производства или ремонта, как будут организованы проверка работоспособности, правильности функционирования и поиск неисправностей. Усугубляется это обстоятельство тем, что обязательная проработка этих вопросов не всегда регламентируется официальными требованиями к проектам новых изделий. Все это приводит к тому, что часто сложные объекты оказываются без хорошей организации системы проверок правильности их функционирования, не говоря уже о системах поиска неисправностей в условиях промышленного применения. Чаще всего подобные вопросы решаются после того, как изделие спроектировано и запущено в производство. В результате заботы по оснащению оборудования системами диагноза ложатся на плечи изготовителей, эксплуатационников и ремонтников. Затраты на их создание велики, а сами устройства по многим параметрам не отвечают решаемым задачам, а отсюда низкая эффективность применения.

Среди объективных причин такого положения следует назвать недостаточное развитие теории, методов и алгоритмов технической диагностики, слабую проработку принципов построения технических средств диагноза на основе микропроцессоров и микро-ЭВМ, а также отсутствие налаженного производства таких средств.

Задачи оценки фактического состояния привода тесно переплетаются с задачами идентификации, поскольку определение параметров всегда позволяет выявить их близость к критическим значениям и определить причину и место возникновения неисправности в системе.

Общие проблемы, существующие в области динамики электро-механических систем, связаны с построением модели и разработкой алгоритма управления, соответствующего заданной модели и некоторой цели управления. На практике более широкое развитие получила вторая проблема, которая решалась на основе априорной информации об объекте. Вместе с тем построение адекватной модели является важнейшей и часто наиболее трудной задачей динамики электро-механических систем. При этом под моделью понимается широкий круг сведений, необходимый для построения процедуры управления си-



стемой. Важно отметить, что применявшиеся долгие годы методы расчета по каталожным данным отдельных элементов, не всегда дают удовлетворительные результаты из-за значительного разброса или отсутствия технических характеристик. Кроме того, реальная идентификация сложного объекта часто позволяет построить минимальную модель, параметры которой не могут быть определены теоретическим путем. Это в частности относится к моделям многомассовых упруго-инерционных систем, которые с успехом могут быть заменены эквивалентной двухмассовой системой. Идентификация параметров эквивалентной двухмассовой системы весьма распространена на практике. Являясь в своей основе экспериментальным методом, идентификация, вместе с тем имеет глубокое теоретическое содержание и, кроме того, создает основательный фундамент для последующего теоретического расчета динамических характеристик. Роль диагностической идентификации резко возрастает в условиях гибкого автоматизированного производства, работающего при ограниченном обслуживании. Идентификация объекта управления весьма важна при создании приводов станков, работающих по самоподнастраивающимся моделям, в системах адаптивного управления, в системах ЧПУ для коррекции динамических характеристик и в целом ряде других случаев.

Современная идентификация динамических систем использует как детерминированные, так и статистические методы. Однако, многие из них слишком сложны, требуют применения специальной аппаратуры и длительной обработки результатов измерений. В связи с этим большой интерес представляют методы прикладной идентификации электромеханических систем при минимальном уровне измерительной информации, пригодные для создания автоматизированных систем контроля, диагностики и идентификации, ориентированных на микропроцессорные системы.

В последние годы наметилась тенденция к созданию комплексных систем, способных решить весь спектр задач по контролю и идентификации различных объектов машиностроения. Однако в области электромеханических систем этот вопрос мало изучен и требует серьезного подхода, как к разработке теории таких систем, так и к вопросам их автоматизированного проектирования.

В последние годы, в первую очередь, в связи с резкой интенсификацией и автоматизацией процессов производства, усложнением и

расширением фронта научных экспериментов, существенно изменились требования к средствам диагностики.

Новые требования оценки состояния ЭМС связаны главным образом с переходом к получению и использованию результатов не отдельных измерений, а потоков информации. В задачах диагностики ЭМС необходимо получать информацию о десятках однородных или разнородных величин, часть из которых может быть недоступной для прямых измерений.

Как правило, получение всего объема информации должно выполняться за ограниченное время. Если эти функции возложить на человека, вооруженного лишь простейшими измерительными и вычислительными устройствами, то в силу физиологических ограничений он, даже при весьма значительной тренировке, не сможет их выполнять. Решение этой проблемы путем увеличения обслуживающего персонала не всегда возможно, а там, где это возможно, в большинстве случаев экономически невыгодно.

Уместно заметить, что из-за использования ЭМС в опасных условиях функционирования или вредности технологического процесса участие человека-оператора может быть вообще недопустимым.

Таким образом, в задачах диагностики ЭМС поставлена проблема создания новых средств, способных разгрузить человека от необходимости сбора и обработки интенсивных потоков измерительной информации.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ<sup>1</sup>

Основы диагностики должны опираться на основные понятия в области надежности. Рассмотрим основные термины и определения:

*Ресурс* – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние;

*Наработка* – продолжительность или объём работы объекта;

*Предельное состояние* – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна; определение, данное в ГОСТ, имеет продолжение, противоречащее целям и задачам диагностического контроля, формулируемым в настоящее время;

*Критерий предельного состояния* – признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией;

*Работоспособное состояние* (работоспособность) – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

*Остаточный ресурс* - суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние;

*Назначенный ресурс* – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния;

*Неработоспособное состояние* (неработоспособность) – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

---

<sup>1</sup> Справочник по технической диагностике под общей редакцией В. В. Клюева

*Исправное состояние* (исправность) – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

*Неисправное состояние* (неисправность) – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

*Отказ* - событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния.

Дополнительный комментарий (выборка из ГОСТ).

Каждое из состояний (исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное) характеризуется совокупностью значений параметров, описывающих состояние объекта, а также качественных признаков, для которых не применяют количественные оценки. Номенклатуру этих параметров и признаков, а также пределы допустимых их изменений устанавливают в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению.

Для сложных объектов можно выделить частично работоспособные состояния, при которых объект способен частично выполнять требуемые функции либо функции с пониженными показателями.

При достижении предельного состояния объект должен быть снят с эксплуатации, направлен в средний или капитальный ремонт, списан, уничтожен или передан для применения не по назначению.

Наработка индивидуального объекта, ресурс и т.п. могут быть определены лишь после того, как наступил отказ или достигнуто предельное состояние. Пока эти события не наступили можно говорить только о прогнозировании этих величин с большей или меньшей достоверностью. Средний и капитальный ремонт позволяют частично или полностью восстанавливать ресурс, возвращать аппарат в работоспособное состояние.

Электропривод состоит из ряда узлов, каждый из которых имеет свой ресурс. Исчерпывание ресурса отдельного узла может привести

к предельному состоянию весь привод, если предельное состояние этого узла влияет на работоспособность привода в целом.

С позиций принятых терминов целью диагностических мероприятий является определение "прогнозируемого остаточного ресурса", т.е. оставшихся возможностей электропривода выполнять свои заданные функции. Если для какого-либо параметра, назначенного в качестве критерия предельного состояния, установлены допустимые границы (начальное и конечное значение критерия предельного состояния), то для этого параметра может быть установлен прогнозируемый остаточный ресурс как местоположение текущего значения этого параметра внутри установленных границ. В ряде случаев, особенно когда изменение данного параметра не является монотонной функцией работы объекта, приходится ограничиться констатацией факта достижения предельного состояния, что соответствует полному израсходованию ресурса по данному параметру, фактически отвечая на вопрос "да-нет": есть ресурс - нет ресурса.

Итак, для решения вопроса об исправности и работоспособности электропривода необходимо иметь соответствующие технические требования нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

#### *Тактическая задача диагностического контроля*

Итак, объектом диагностического внимания является электропривод. Но при его диагностике необходимо учитывать различия функционального назначения электронных и электромеханических устройств и элементов, входящих в его состав и тесно взаимосвязанных. Основной задачей диагностики электропривода является определение его состояния и прогнозирование его работоспособности, определение путей и средств продления или восстановления его работоспособности.

#### *Стратегическая цель диагностического контроля*

Главная цель диагностического контроля электропривода – на основе определения состояния электропривода максимально использовать его фактический ресурс и предотвращать аварийный отказ. Решение основных задач диагностирования электропривода, в том числе и ЭШИМ1 сводится к следующим этапам:

- выдача заключения о работоспособности привода;
- контроль запаса работоспособности;

- прогнозирование технического состояния;
- поиск возникшего дефекта в случае его возникновения.

#### *Методы достижения цели диагностического контроля*

Главными методами достижения поставленной цели являются;

1) установление частого или непрерывного контроля для потенциально ненадежного, дефектного оборудования, эксплуатация которого, тем не менее, возможна неопределенное продолжительное время, с целью своевременного его отключения по достижении установленных пределов контролируемых параметров;

2) своевременный вывод оборудования из эксплуатации для проведения предупредительного ремонта в соответствии не с планом, а с объективными показаниями с целью полного или частичного восстановления ресурса.

#### *Принципы диагностического контроля*

Таким образом, диагностический контроль – это комплекс мероприятий, направленных на определение текущего состояния электропривода с целью максимального и безопасного его использования.

Диагностический контроль начинается с момента создания электропривода. Приемосдаточные испытания являются фактически диагностическим мероприятием, направленным на определение дальнейшей работоспособности электропривода по установленным техническим требованиям. Но в полной мере понятие диагностического контроля относится к работающему электроприводу, уже находящемуся в эксплуатации, и в задачу такого диагностического исследования входит либо определение возможности безаварийно завершить назначенный срок службы, либо, по его завершении, определить возможности дальнейшей безаварийной эксплуатации электропривода. В настоящее время контрольные мероприятия осуществляются тремя путями: осмотрами, диагностическими испытаниями и мониторингом.

Осмотр - традиционная профилактическая мера поддержания работоспособности электропривода. Проведение осмотров связано с затратами и с привлечением специально подготовленного персонала для работы. Осмотр, являясь диагностическим мероприятием, по сути, практически не решает диагностических задач (в их сегодняшнем понимании), поскольку с его помощью невозможно предотвратить аварийный отказ, невозможно сделать прогноз о работоспособности

привода и можно оценить состояние привода только по внешним, доступным проявлениям. И всё же, оборудование требует постоянного наблюдения. Разрешить противоречие между необходимостью более тщательного контроля, чем это может быть сделано посредством осмотра, необходимостью удаления персонала из рабочей зоны и необходимостью снижения расходов на профилактические мероприятия с одновременным повышением объективности и надежности контроля может создание автоматических систем непрерывного контроля состояния оборудования (систем технической диагностики). Эта система представляет собой набор программно-аппаратных модулей, осуществляющий с помощью датчиков сбор информации о технических параметрах наиболее важных узлов и элементов станка, контроль и оценку их состояния (диагноз) принятие решения по результатам диагноза. Разработка автоматических систем контроля и управления приводит к дифференциации функции контроля: часть контрольных функций возлагается на автоматику и электронику, высвобождающую персонал от рутинного слежения за нормативными параметрами, а остающиеся за персоналом контрольные мероприятия приобретают всё больший диагностический уклон, т.е. фактически реализуются как диагностические испытания. Осуществление персоналом контрольных мероприятий теперь обычно выполняется не столько для поддержания каких-либо установленных параметров, сколько с целью предсказания дальнейшего поведения привода в части его работоспособности, т.е. главная направленность контрольных мероприятий - это диагностика состояния привода: установление отклонений в функционировании и их причин с целью прогнозирования возможности электропривода выполнять возложенные на него функции и для предотвращения неожиданного отказа. Одновременно, и на автоматические системы контроля возлагается все больше диагностических функций: система непрерывного слежения должна не только констатировать текущее состояние наблюдаемого параметра, но, используя накопленные знания, формировать научное предсказание о работоспособности привода на перспективу.

Итак, задачи диагностического контроля состояния электропривода решаются двумя путями (рисунок):

- посредством эпизодического определения наиболее важных параметров - посредством *диагностики*;

- посредством непрерывного слежения за наиболее информативными параметрами – посредством *мониторинга*.

Диагностика, состоящая из комплекса диагностических испытаний, подразделяется на два этапа: оперативную диагностику и диагностическое обследование.

Диагностические мероприятия могут выполняться как на работающем электроприводе, так и на неработающем. Если в первом случае речь идет о ресурсных показателях электропривода, то во втором, в дополнение к этому, готовность электропривода для включения должна быть оценена прямым соответствием установленных параметров: при вводе его в эксплуатацию все текущие характеристики должны быть в разрешенных пределах или приведены в это состояние.

*Оперативная диагностика.* Выполняемая первоочередно оперативная диагностика предполагает использование неразрушающих методов контроля, т.е. методов, не приводящих к расходованию ресурса, и осуществляется одновременно с выполнением электроприводом основных своих функций. Основная цель оперативной диагностики – определение вида дефекта, его опасности и скорости развития. В отсутствие мониторинга основная диагностическая функция обеспечения безопасной эксплуатации ложится на оперативную диагностику, и по ее показаниям решается вопрос о необходимости более глубокого, фундаментального диагностического обследования для принятия окончательного решения о судьбе объекта.

*Диагностическое обследование* выполняется на отключенном электроприводе, т.е. с приостановкой основной функции по показаниям оперативной диагностики или мониторинга. И здесь может быть применена вся мощь имеющихся в распоряжении методов для детального исследования состояния всех элементов, обеспечивающих работоспособность: физические, электрические, технические и механические методы - в соответствии с предписанием разработчиков вне зависимости от их значимости и сложности.

*Мониторинг.* Под *мониторингом* понимается непрерывное (т.е. с частотой большей, чем частота, необходимая для оценки наблюдаемого события) слежение за установленным параметром с целью контроля за приближением его значения (или зависящего от него значения другого параметра) к граничному для последующего принятия



соответствующего решения по восстановлению контролируемого параметра. И конечно, главная идеологическая составляющая мониторинга также лежит в сфере решения диагностических проблем.

Совершенно очевидно, что мониторинг, как и оперативная диагностика, предполагает использование неразрушающих методов контроля, т.е. методов, не приводящих к расходованию ресурса, и осуществляется одновременно с выполнением электроприводом основных своих функций. Непрерывный контроль может быть функциональным и параметрическим. При функциональном непрерывном контроле проверяется правильность исполнения тех или иных команд и оценивается состояние оборудования и технологического процесса после поступления от системы управления различных управляющих команд. При параметрическом непрерывном контроле используется метод эталонных параметров. Для контролируемого параметра устанавливаются три зоны: зону нормальной работы, зону «риска» (предупреждение о подходе к предельно допустимому уровню) и критическую зону.

При наличии системы мониторинга сигнал о необходимости более глубокого диагностического обследования должен поступать от нее.

Создание систем мониторинга является логическим следствием развития техники на современном этапе. На систему автоматического контроля оборудования можно было бы возложить много самых разнообразных задач. Тем не менее, принцип "автоматизировать все" был бы неправильным. Система автоматического контроля должна решать минимум задач и только тех задач, которые не могут быть решены или обеспечены иным образом. Столь строгий подход диктуется исключительно экономическими соображениями: чем сложнее система контроля, тем она дороже, а с увеличением стоимости снижается целесообразность ее применения. Тем не менее, сегодня система автоматического контроля рассматривается не только и не столько как система пассивного наблюдения и предупреждения, а как интеллектуальная система диагностического контроля и управления.

Основным методом устранения дефектов является ремонт (профилактический, мелкий, средний и капитальный). Поэтому конечная цель диагностического обследования как последнего этапа диагностического контроля – определение вида и объема ремонта для увели-

чения остаточного ресурса или для восстановления работоспособного состояния.

Каким бы путем не проводилось диагностическое обследование, для решения вопросов о ресурсе, о работоспособности разработчик способов диагностического контроля должен в первую очередь разработать *критерии предельного состояния* в случае их отсутствия в нормативно-технической и конструкторской (проектной) документации. В конечном счете, для выполнения диагностических мероприятий в качестве правовых документов должны быть представлены:

сводка нормативных параметров и сводка критериальных параметров. Первые - основные технические требования нормативно-технической и конструкторской (проектной) документации - предназначены для квалификации состояния оборудования в категориях "исправно-неисправно", вторые - требования, характеризующие аппарат с позиций исключительно возможности выполнения своих заданных функций – для квалификации в категориях "работоспособно – частично работоспособно - неработоспособно". Эти квалификационные сводки ложатся в основу компьютерных программ диагностики, как при диагностическом обследовании, так и при мониторинге.

*Техническая диагностика* – отрасль научно-технических знаний, сущность которой составляют теория, методы и средства обнаружения и поиска дефектов объектов технической природы. Под *дефектом* следует понимать любое несоответствие свойств объекта заданным, требуемым или ожидаемым его свойствам. *Обнаружение дефекта* есть установление факта его наличия или отсутствия в объекте. *Поиск дефекта* заключается в указании с определенной точностью его местоположения в объекте.

Основное назначение технической диагностики состоит в повышении надежности объектов на этапе их эксплуатации, а также в предотвращении производственного брака на этапе изготовления объектов и их составных частей. Повышение надежности обеспечивается улучшением таких показателей, как коэффициент готовности, коэффициент технического использования, время восстановления работоспособного состояния, а также ресурс или срок службы и наработка до отказа или наработка на отказ для резервированных объектов с восстановлением. Кроме того, диагностическое обеспечение позволяет получать высокие значения достоверности правильного функцио-

нирования объектов. Предотвращение производственного брака достигается правильной организацией диагностирования на операциях входного контроля комплектующих изделий и материалов и контроля технологических процессов изготовления объектов, включая выходной контроль последних. Любой технический объект после проектирования проходит две основные стадии "жизни"- *изготовление* и *эксплуатацию*. Применительно к задачам, решаемым технической диагностикой, на стадии изготовления целесообразно выделять периоды *приемки* комплектующих изделий и материалов, процесса *производства, наладки и сдачи* объекта ОТК или представителю заказчика. Для стадии эксплуатации типичными являются этапы *применения объекта по назначению, профилактики* (плановой, перед и после применения по назначению), *ремонта, транспортирования и хранения* объекта.

Требования, которым должен удовлетворять изготовленный (новый) или эксплуатируемый объект, определяются соответствующей нормативно-технической документацией. Объект, удовлетворяющий всем требованиям нормативно-технической документации, является *исправным* или, говорят, что он находится в *исправном техническом состоянии*. Убеждаться в исправности объекта необходимо после его изготовления и после ремонта.

Для условий эксплуатации практически важным является понятие *работоспособного технического состояния* объекта. Объект *работоспособен*, если он может выполнять *все* заданные ему функции с сохранением значений заданных параметров (признаков) в требуемых пределах. Убеждаться в работоспособности объекта необходимо, например, при его профилактике, после транспортирования и хранения.

Наконец, для этапа применения по назначению существенным является понятие *технического состояния правильного функционирования* объекта. *Правильно функционирующим* является объект, значения параметров (признаков) которого в текущий момент реального времени применения объекта по назначению находятся в требуемых пределах (в этот момент времени объект не отказал, т. е. правильно выполняет конкретную заданную функцию).

*Неисправное и неработоспособное техническое состояние, а также техническое состояние неправильного функционирования* объ-

екта могут быть детализированы путем указания соответствующих дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования и относящихся к одной или нескольким составным частям объекта, либо к объекту в целом.

Обнаружение и поиск дефектов являются процессами *определения технического состояния* объекта и объединяются общим термином "*диагностирование*", *диагноз* есть результат диагностирования. Таким образом, задачами диагностирования являются задачи проверки исправности, работоспособности и правильности функционирования объекта, а также задачи поиска дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования. Строгая постановка этих задач предполагает, во-первых, прямое или косвенное задание класса возможных (рассматриваемых, заданных, наиболее вероятных) дефектов и, во-вторых, наличие формализованных методов построения алгоритмов диагностирования, реализация которых обеспечивает обнаружение дефектов из заданного класса с требуемой полнотой или поиск последних с требуемой *глубиной*.

Диагностирование технического состояния любого объекта осуществляется теми или иными *средствами диагностирования*. Средства могут быть аппаратными или программными; в качестве средств диагностирования может также выступать человек-оператор, контролер, наладчик. Средства и объект диагностирования, взаимодействующие между собой, образуют *систему диагностирования*

Различают системы *тестового* и *функционального диагностирования*. В системах тестового диагностирования на объект подаются специально организуемые *тестовые воздействия*. В системах функционального диагностирования, которые работают в процессе применения объекта по назначению, подача тестовых воздействий, как правило, исключается; на объект поступают только *рабочие воздействия*, предусмотренные его алгоритмом функционирования. В системах обоих видов средства диагностирования воспринимают и анализируют *ответы объекта* на входные (тестовые или рабочие) воздействия и выдают результат диагностирования, т.е. ставят диагноз: объект исправен или неисправен, работоспособен или неработоспособен, функционирует правильно или неправильно, имеет такой-то дефект или в объекте повреждена такая-то его составная часть и т. п. Системы тестового диагностирования необходимы для проверки исправно-

сти и работоспособности, а также поиска дефектов, нарушающих исправность или работоспособность объекта. Системы функционального диагностирования необходимы для проверки правильности функционирования и для поиска дефектов, нарушающих правильное функционирование объекта.

Система диагностирования в процессе определения технического состояния объекта реализует некоторый *алгоритм (тестового или функционального) диагностирования*. Алгоритм диагностирования в общем случае состоит из определенной совокупности так называемых *элементарных проверок* объекта, а также правил, устанавливающих последовательность реализации элементарных проверок, и правил анализа результатов последних. Каждая элементарная проверка определяется своим тестовым или рабочим воздействием, подаваемым или поступающим на объект, и *составом контрольных точек*, с которых снимаются ответы объекта на это воздействие.

Результатом элементарной проверки являются конкретные значения ответных сигналов объекта в соответствующих контрольных точках. Диагноз (окончательное заключение о техническом состоянии объекта) ставится в общем случае по совокупности полученных результатов элементарных проверок.

Любая система диагностирования является специфической системой управления или контроля. Специфика заключается в цели управления (контроля), состоящей в определении технического состояния объекта диагностирования. В соответствии с этим при разработке систем диагностирования должны решаться те задачи, которые решаются при разработке любых других систем управления или контроля. Это:

- Изучение объекта, его возможных дефектов и признаков проявления последних.

- Выбор или построение математического описания (модели) поведения исправного объекта и его неисправных модификаций, анализ математической модели с целью получения реализуемого системой алгоритма диагностирования.

- Внесение при необходимости изменений в структуру и конструкцию объекта, для обеспечения требуемых условий диагностирования.

- Выбор или разработка средств диагностирования, рассмотрение и расчет характеристик системы диагностирования в целом.

Для разработки системы диагностирования сложных объектов могут потребоваться итерации, сопровождающиеся возвратами с данного этапа разработки на предшествующие с соответствующим изменением принятых ранее решений. Существенную роль при этом могут играть вопросы обеспечения контролепригодности объекта, в частности введение дополнительных контрольных точек, управляющих входов, изменение структуры объекта и др.

Уточним понятия "управление", "контроль" и "диагностирование" применительно к общей теории управления. Под *управлением* понимают процесс выработки и осуществления целенаправленных (управляющих) воздействий на объект. *Контроль* есть процесс сбора и обработки информации с целью определения событий. Если событием является факт достижения некоторым параметром объекта определенного заданного значения (уставки), то говорят о контроле параметров. Если фиксируемым событием является установление факта пребывания объекта в исправном или неисправном, работоспособном или неработоспособном состоянии, или состоянии правильного или неправильного функционирования, то можно говорить о контроле технического состояния объекта. Более того, понятие контроля технического состояния можно распространить также на задачи поиска дефектов, если событие определить как факт указания местоположения в объекте того или иного дефекта.

Следовательно, системы тестового диагностирования являются системами управления, поскольку в них реализуется выработка и осуществление специально организованных тестовых (т. е. управляющих) воздействий на объект с целью определения технического состояния последнего. Системы функционального диагностирования являются типичными системами контроля (в широком смысле этого слова), не требующими подачи на объект целенаправленных воздействий. Это важно знать и учитывать разработчику систем диагностирования. Системы как тестового, так и функционального диагностирования пользователь, которого не интересует "внутренняя кухня" разработчика, может называть системами контроля технического состояния объекта. С изложенной точки зрения, например, системы, получившие название систем неразрушающего контроля, являются

классом систем тестового диагностирования, а виброакустические системы контроля технического состояния – классом систем функционального диагностирования.

Бытует также точка зрения, заключающаяся в том, чтобы системы, которых является проверка технического состояния объекта (т. е. установление наличия или отсутствия дефектов), называть системами контроля, а системы, решающие задачи поиска дефектов, - системами диагностирования. Методологически такое разделение систем не выдерживает критики, поскольку теория и методы решения задач обнаружения и задач поиска дефектов принципиально одни и те же.

Задачи изучения физических свойств объектов и их возможных дефектов достаточно специфичны и вряд ли поддаются какому-либо обобщению из-за многообразия и различия отдельных классов объектов. Если предшествующего опыта по диагностированию изучаемого объекта нет или такой опыт недостаточен, то существенной становится роль технолога-разработчика, работающего со специалистом-диагностом либо, что еще лучше, являющегося таким специалистом. В результате должен быть определен (например, явно в виде списка или неявно через указание свойств классов) перечень дефектов, подлежащих обнаружению и поиску в условиях производства и эксплуатации объекта, а также определены признаки проявления дефектов, включаемых в перечень. При формировании перечня следует учитывать опыт производства и эксплуатации аналогичных или таких же объектов, статистические данные по дефектам и т. п. Другим результатом изучения объекта должно быть установление требуемой или, точнее, желательной полноты обнаружения дефектов, а также желательной глубины их поиска, т. е. той "точности" (выраженной в терминах конструктивных единиц объекта или в терминах групп, не требующих различения дефектов), с которой должны указываться при диагностировании места дефектов.

*Формализованной моделью объекта* (или процесса) является его описание в аналитической, графической, табличной или другой форме. Для простых объектов диагностирования удобно пользоваться так называемыми *явными моделями*, содержащими наряду с описанием исправного, объекта описание каждой из его неисправных модификаций. *Неявная модель* объекта диагностирования предполагает наличие только одного описания, например исправного объекта, формализо-

ванных моделей дефектов и правил получения по заданному описанию и по моделям дефектов описаний всех неисправных модификаций объекта.

Модели объектов бывают *функциональные* и *структурные*. Первые отражают только выполняемые объектом (исправным или неисправным) функции, определенные относительно рабочих входов и рабочих выходов объекта, а вторые, кроме того, содержат информацию о внутренней организации объекта, о его структуре. Функциональные модели позволяют решать задачи проверки работоспособности и правильности функционирования объекта. Для проверки исправности (в общем случае) и поиска дефектов с глубиной большей, чем объект в целом, требуются структурные модели.

В некоторых случаях применяются модели, в которых используются зависимости (установленные опытным путем) между техническими состояниями объекта и такими его параметрами, которые не входят в общепринятые функциональные или структурные описания объекта.

Наконец, модели объектов диагностирования могут быть *детерминированными* и *вероятностными*. К вероятностному представлению прибегают чаще всего при невозможности или неумении описать детерминировано поведение объекта.

Модели объектов диагностирования нужны для построения алгоритмов диагностирования формализованными методами. Другим важным назначением моделей объектов диагностирования является их применение для формализованного анализа заданных (в том числе построенных интуитивно, вручную) алгоритмов диагностирования на полноту обнаружения, на глубину поиска дефектов или на предмет построения *диагностических словарей*.

Построение алгоритмов диагностирования заключается в выборе такой совокупности элементарных проверок, по результатам которых в задачах обнаружения дефектов можно отличить исправное, или работоспособное состояние, или состояние правильного функционирования объекта от его неисправных состояний, а также в задачах поиска дефектов различать неисправные состояния (или группы неисправных состояний).

При построении алгоритмов диагностирования по явным моделям объектов элементарные проверки выбирают путем попарного



сравнения тех описаний, технические состояния которых требуется различать. В задачах тестового диагностирования составы контрольных точек объекта часто определены предварительно и они одинаковы для всех элементарных проверок. В таких случаях выбирают только входные воздействия элементарных проверок – это задачи *построения тестов*. В задачах функционального диагностирования, наоборот, входные воздействия элементарных проверок определены заранее рабочим алгоритмом функционирования объекта и выбору подлежат только составы контрольных точек.

Формализованные методы построения тестов нашли широкое применение для дискретных объектов и редко применяются для аналоговых объектов. Последнее объясняется тем, что для аналоговых объектов не является естественным ни выделение значительного числа различных входных воздействий, ни, главное, определение значений ответов на эти воздействия исправного объекта и его неисправных модификаций.

Существующие машинные системы построения тестов для дискретных объектов электронной техники работают с неявными моделями и ограничиваются обычно *проверяющими тестами* для обнаружения дефектов, моделью которых являются одиночные константные неисправности на выводах компонент объекта. Для дискретных объектов даже средней сложности вычислительные трудности вынуждают отказываться от построения *тестов поиска дефектов* с заданной глубиной. Для дискретных объектов высокой сложности имеющиеся машинные системы не позволяют получить даже проверяющие тесты с приемлемыми затратами времени и памяти. Для эффективной организации диагностического обеспечения таких объектов требуется повышение их контролепригодности и применение высокоорганизованных аппаратурных и программных внешних средств тестового диагностирования. Наряду с этим необходима разработка проблемно-ориентированных машинных систем проектирования диагностического обеспечения, обладающих высокими быстродействием и большими объемами памяти.

Построение *алгоритмов функционального диагностирования* состоит в определении условий работы средств, реализующих эти алгоритмы. Средства функционального диагностирования, как правило, являются встроенными в объект диагностирования и часто называют-

ся средствами встроенного контроля. Обычно стремятся к тому, чтобы при нормальном функционировании объекта в условиях применения его по назначению средства встроенного контроля на своих выходах выдавали известные постоянные значения сигналов и меняли эти значения при нарушении правильности функционирования объекта. На этом принципе строятся схемы встроенного контроля дискретных объектов (схемы сравнения, схемы контроля по модулю и др.). Эту же идею применяют при построении средств встроенного контроля методом избыточных переменных для аналоговых объектов.

# **Глава 1. ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

## **1.1. Направления создания микропроцессорных систем диагностики приводов**

В результате анализа можно сделать утверждение, что для реализации систем стабилизации единственным средством является использование микропроцессорных систем. В первую очередь это связано с большими объемами перерабатываемой информации при измерениях и расчетах. Во-вторых – использованием большого количества разнообразной измерительной и регистрирующей аппаратуры. В-третьих – повышением уровня автоматизации. В-четвертых – повышением уровня "интеллекта" систем управления.

В системах электропривода обычно используют простые устройства, позволяющие определить параметры, выходящие за пределы допуска, т.е. установить неработоспособность электропривода. Однако сделать выводы о состоянии электромеханической системы в целом не представляется возможным. В связи с этим становится закономерным построение специализированных устройств, способных сформировать необходимый объем информации о состоянии привода, позволяющий установить не только работоспособность, но и сделать заключение о возможности изготовления продукции с заданными техническими и технологическими характеристиками.

Построение таких систем начинается с установления работоспособности, а затем формируются управляющие сигналы, выполняется сбор и переработка информации и выдается заключение о состоянии объекта. Причем сложность, как самого процесса, так и систем стабилизации определяется множеством факторов.

Оценка фактического состояния предполагает различную глубину исследований. Если рассматривать электромеханическую систему в терминах "элемент, узел, устройство", то диагностирование можно представить в виде трех уровней. Для каждого из них характерны свои особенности, заключающиеся в выборе способа диагностирования, параметров и технических средств.

Нижний уровень диагностирования сводится к контролю состояния каждого из элементов системы. В данном случае для установления работоспособности необходимо выявить устройство, в котором находится неисправный элемент. Следовательно, мы переходим на второй уровень диагностирования, т.е. определяется соответствие выходных характеристик узлов заданным. Если узлы находятся в работоспособном состоянии, то можно утверждать, что работоспособна и сама система. В противном случае с использованием разработанных алгоритмов отыскания неисправностей, устанавливается неисправный элемент.

Установление работоспособности не дает ответа на вопрос о соответствии ЭМС заданным техническим характеристикам. Определение соответствия достигается на основе выбора характеристик и параметров, подлежащих оценке.

На процесс оценки фактического состояния (ОФС) оказывает влияние множество факторов. Рассмотрим их. Представим процесс определения соответствия технических характеристик заданным в виде системы связей, определяющей особенности построения систем с использованием средств микропроцессорной техники (рис.1.1).

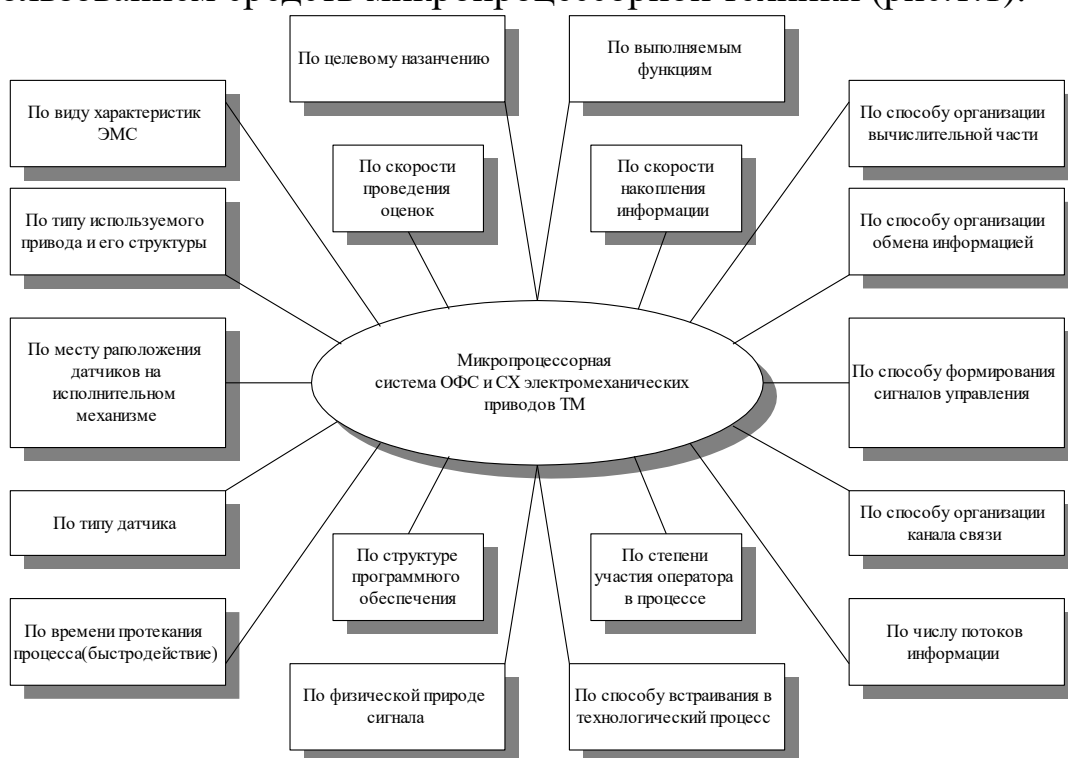


Рис. 1.1. Декомпозиция задач для реализации процесса диагностики фактического состояния привода

Основой для построения таких систем является объект исследований. Из особенностей функционирования, организации структуры, вида характеристик следует специфика построения систем диагностики. В качестве объекта исследований выступает электропривод и механическая система. Механическая система может быть представлена набором механических масс и связей между ними. Привод, не обязательно электрический, представляется любой структурой. Это может быть подчиненная структура регулирования, независимое регулирование координат привода, системы с адаптивными регуляторами. Система электропривода может быть рассмотрена как с двигателем постоянного тока, так и с двигателем переменного тока.

Электромеханический привод представим в виде трех основных подсистем: система управления электродвигателем, электродвигатель и исполнительный механизм. Для каждого из узлов существуют собственные параметры, по которым можно проводить ОФС. Но при объединении узлов эти параметры изменяются, что влечет за собой изменение и методов ОФС. Становится важным выбор доминирующих параметров и способов их измерения. Получение информации о параметрах ЭМС предполагает либо измерение полного вектора состояния, что не всегда возможно, либо получение необходимой информации на основе идентификационных методов по доступным координатам.

ЭМС, как совокупность элементов, по функциональному назначению, может рассматриваться как объект исследований, как система используемая в ГПМ, как автономный регулятор скорости, совместно с двигателем или отдельная механическая система, как система, встроенная в иное технологическое оборудование. Естественно, что самыми сложными системами будут системы ОФС для научных исследований. Они должны отвечать требованиям универсальности, развитых функциональных возможностей, широким набором преобразователей входных сигналов, развитым программным обеспечением, способностью легко адаптироваться на решение практически любой задачи, возникающей при исследованиях электромеханических систем любого технологического оборудования.

В процессе промышленного производства возникает проблема настройки или контроля электромеханических систем в уже готовом изделии, или на промежуточных этапах его изготовления. Есть необ-

ходимость вести входной контроль поступающих на монтаж узлов приводов, т.е. производятся регламентные работы по контролю ЭМС как на технологической машине (ТМ), так и вне ее. Способ организации таких систем определяется условиями удобства работы с ними. Они должны, по возможности, быть мобильными в тоже время отвечать требованиям полного определения всех параметров, необходимых для контроля и настройки. В процессе наладки используется определенный набор требований, т.е. производится строго определенная последовательность операций а, следовательно, программное обеспечение неизменно. Аппаратные средства также неизменные, но определяются типом применяемого микропроцессора, на основе которого строится интерфейс и вычислитель.

При эксплуатации ТМ необходимы встроенные системы стабилизации характеристик. Естественно, что они должны быть построены в виде одноплатного контроллера. При этом структура аппаратной части должна быть построена с учетом того, что необходимо собирать информацию в очень короткие интервалы времени, производить как анализ сигналов поступающих на вход ЭМС, так и реакцию системы на это входное воздействие. Необходимо идентифицировать не только параметры системы, но и вид сигнала управления. Отличительная особенность - высокое быстродействие, наличие адаптивных алгоритмов оценки параметров при произвольном входном воздействии.

Если ТМ встроена в технологический процесс, то для контроля параметров целесообразно использование переносных устройств сбора информации о состоянии объекта, а обработку информации производят на стационарных системах. Последние могут быть представлены обычными вычислительными машинами. Для переносных систем диагностики целесообразно использование пристроенных датчиков информации о состоянии объекта. Это позволяет, не внедряясь в структуру привода т.е. не разрушая связей, получать информацию о нем.

Еще раз вернемся к объекту исследований и отметим, что он может быть представлен механической системой, одно – или много массовой, на которых устанавливаются измерительные системы для измерения перемещений. Датчики положения устанавливаются в различных точках механической системы, что влияет на программное обеспечение при анализе параметров механической системы. Аппа-

ратная часть практически не изменяется, если используются встроенные датчики. Иначе обстоит дело, если используются пристроенные датчики. В научных исследованиях необходимо измерение всех промежуточных координат механической системы. Это в значительной мере упрощает процесс ОФС, за счет упрощения алгоритмов идентификации. Однако моделирование систем и их исследования позволяют внести существенные коррективы в процесс ОФС при использовании только одного датчика параметров. Для ОФС регулируемых электроприводов необходимо получать информацию о свойствах механической характеристики, реакции на импульсное входное воздействие или периодический входной сигнал и т.д.

Диагностика каждого из параметров предполагает определенный подход к формированию сигналов управления и получения информации о реакции на входные воздействия. Полученная при этом информация может быть использована не только для констатации состояния электропривода, но и позволяет, меняя параметры, получить оптимальные настройки, установить предельные значения характеристик, обеспечивающих устойчивые режимы работы.

При переходе к следящим приводам меняются и алгоритмы формирования управляющих воздействий, и способы сбора необходимой информации. В этом случае параметры, обеспечивающие аналогичные свойства, как и в случае регулируемых приводов, должны быть интерпретированы с учетом контура положения. Кроме того, различны и цели диагностики следящих приводов, работающих в режиме позиционирования или траекторного движения. Если для первого типа важно установить предельные возможности в переходных режимах, то для второго случая важно знать, например, возможную ошибку слежения. А в случае, если эти электроприводы установлены на технологической машине, то меняется и аппаратная часть диагностической системы.

На рис.1.2 показаны основные задачи, оказывающие влияние на организационную структуру контура стабилизации характеристик. Кроме ранее указанных характеристик, существенную роль играет тип используемого электродвигателя, и соответственно, системы управления этим двигателем. В ряде случаев в ТМ могут использоваться специальные системы приводов с "экзотическими" видами исполнительных двигателей. Перечисленные причины в равной степени

влиять и на программное обеспечение, так как изменяются и характеристики приводов и способы получения информации о них.

а)

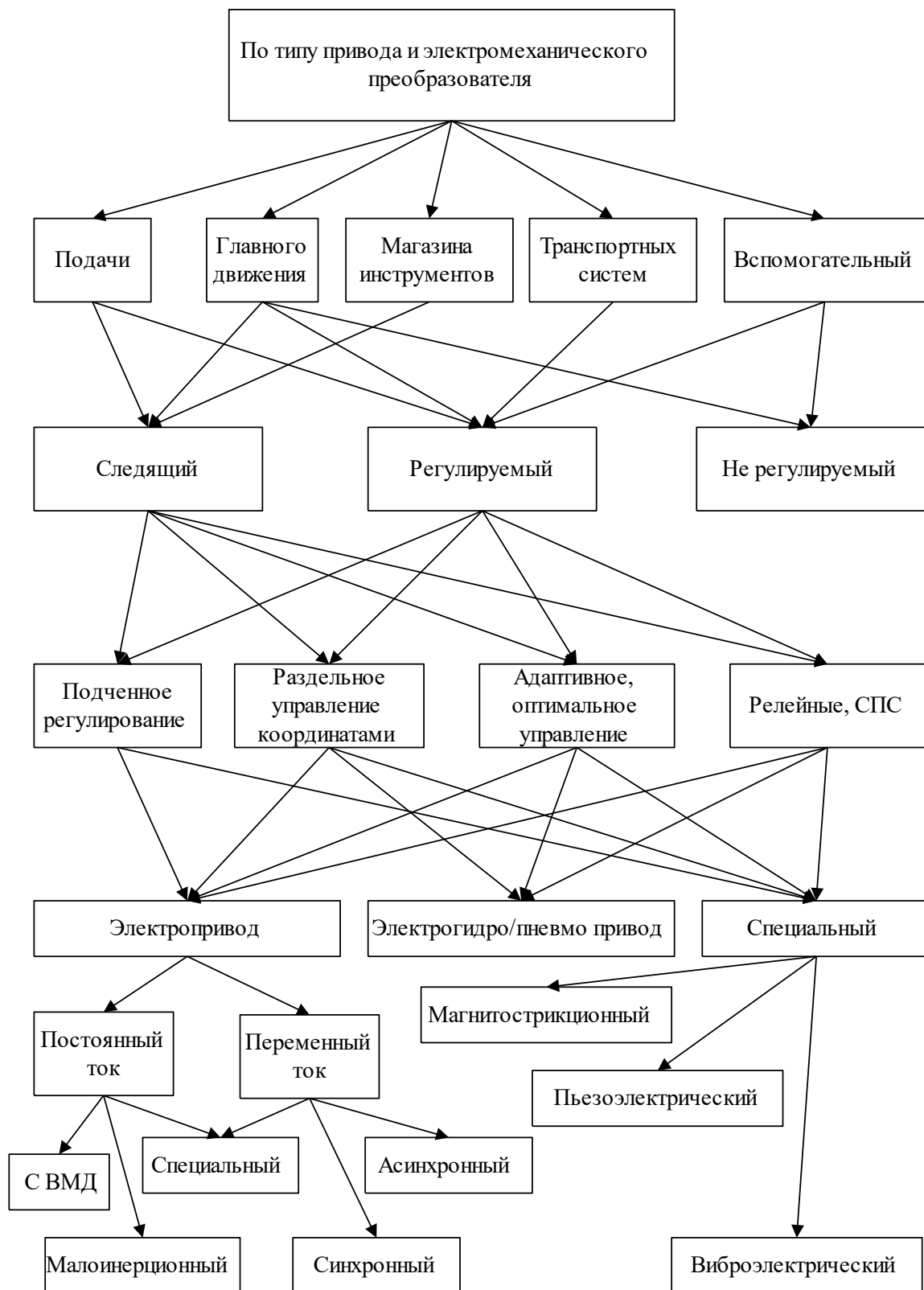


Рис. 1.2. Классификация задач влияющих на построение контура стабилизации характеристик:

а - по функциональному и целевому назначению, б - по типу привода, в - по типу датчика и месту расположения, г- по числу потоков информации и физической природе сигнала, д - по способу встраивания в технологический процесс, организации вычислительной части и взаимодействия объекта с вычислителем

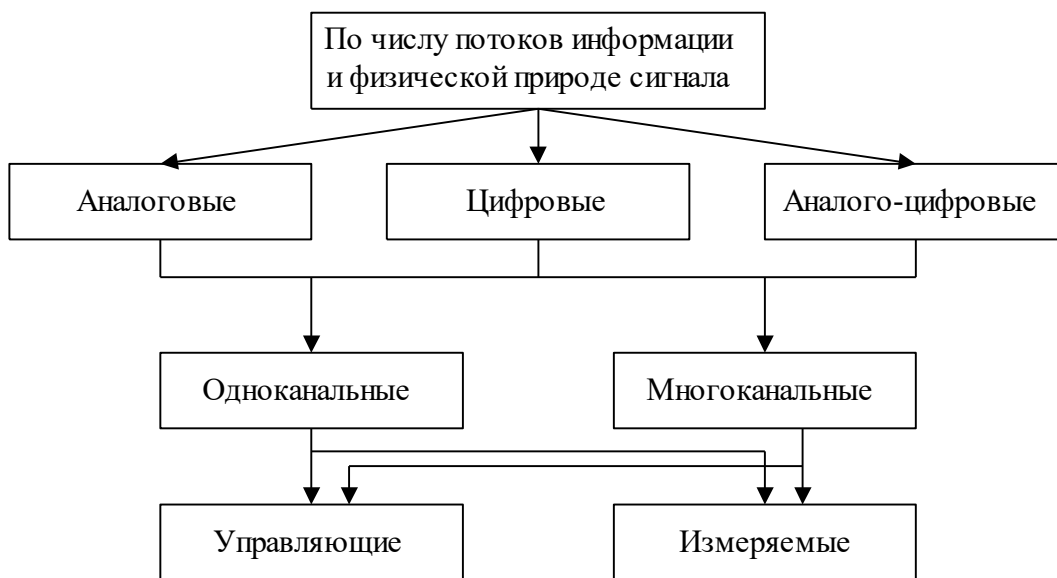
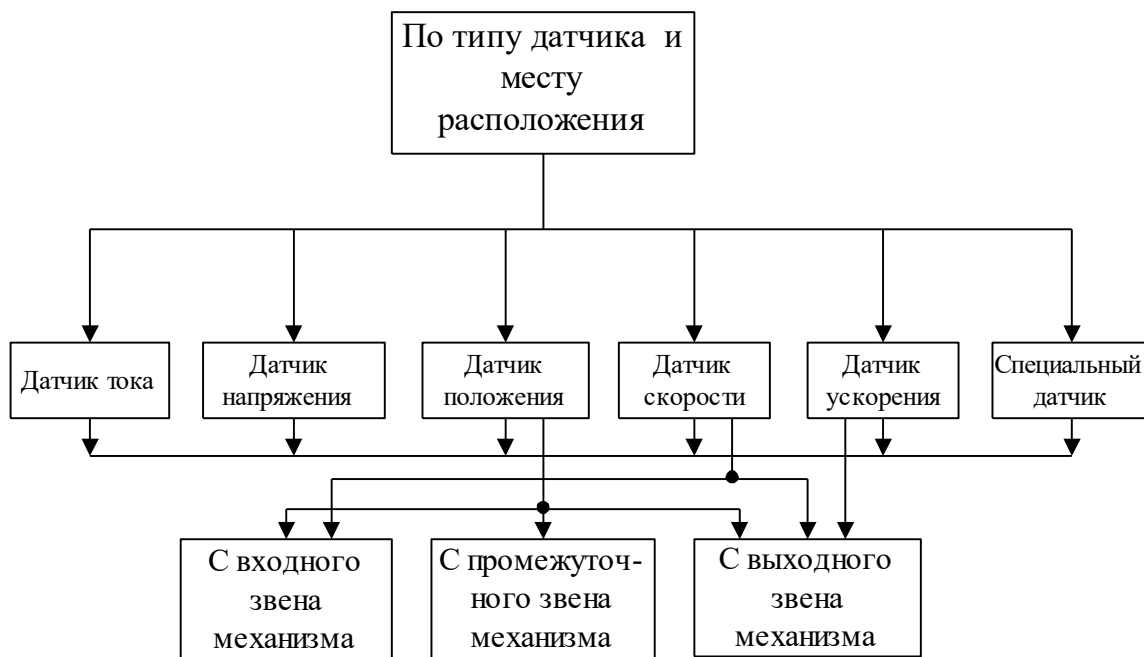
б)





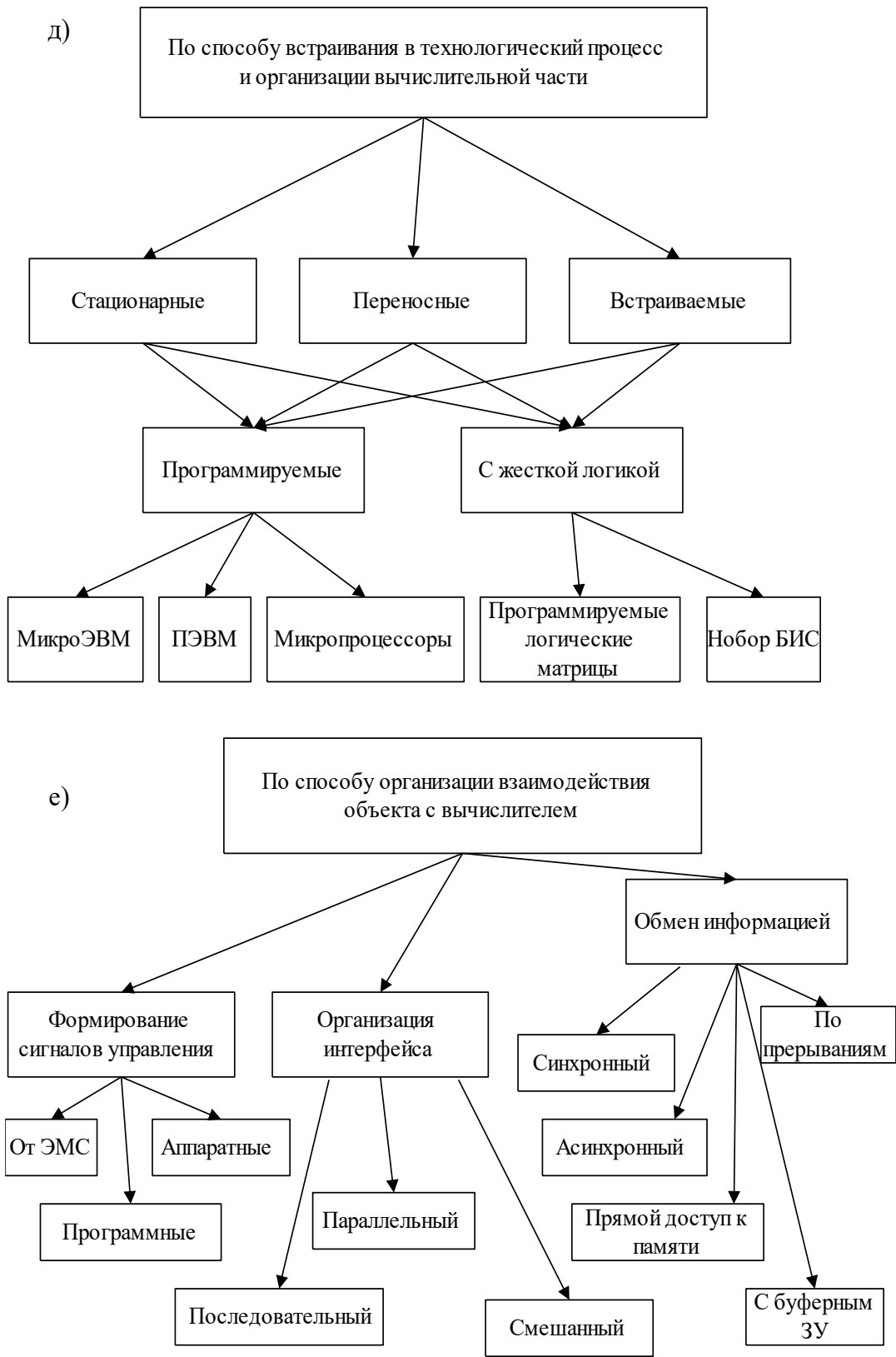
Продолжение рис.1.2.

в)



Продолжение рис.1.2.

г)



Окончание рис. 1.2.

Измерение необходимой информации осуществляется с использованием датчиков параметров, установленных непосредственно в си-

стеме электропривода. В качестве таковых используются датчики тока, скорости и положения, имеющиеся практически во всех системах приводов.

Кроме того, при исследованиях необходимо измерение напряжений в различных точках, таких как силовая часть привода, так и в системе управления. В первом случае необходимы специальные датчики напряжения, во втором – оно может измеряться непосредственно, без использования специальных устройств. Для диагностики дискретного оборудования, не включенного в непрерывный технологический процесс, используются датчики ускорения, которые легко могут быть установлены на исследуемом объекте.

В электромеханических системах ТМ датчики положения могут устанавливаться либо на выходном звене, либо на промежуточном, либо на входном. В каждом конкретном случае используются специальные алгоритмы определения параметров, т.е. меняются алгоритмы расчета, при этом аппаратная часть интерфейса не изменяется.

При измерении напряжений в силовой части привода необходимо введение масштабных усилителей. Аналогично обстоит дело и в случае, когда измеряются сигналы, имеющие малый уровень. Необходимо учитывать и диапазон контролируемых параметров. В этом случае целесообразно ступенчатое переключение диапазонов измерения. Число используемых датчиков прямо определяет число используемых каналов связи используемых в комплексе.

В системах стабилизации характеристик (ССХ) число используемых каналов может быть от одного до нескольких. Это определяется требованиями быстродействия, удобством использования, упрощением процесса программирования. В ССХ можно выделить два основных потока информации. Один поток используется для задания сигналов управления на вход исследуемого привода, второй – для ввода измеренной информации. Управляющие сигналы, исходя из особенностей получения необходимых характеристик, формируются по двум каналам, один из которых задает сигнал управления на вход привода, а второй на вход системы нагружения. Оба канала должны работать отдельно, но иметь при этом возможность синхронизации работы. Кроме того, в канале управления необходимы устройства задания постоянного уровня и соответственно сумматоров этих сигналов. Ввиду того, что реализация систем управления и датчиков пара-

метров может быть как аналоговая, так и цифровая, то необходимы задающие и принимающие устройства обоих типов.

Ввод может осуществляться, вообще говоря, по одному каналу, а оператор производит переключение его в соответствующую измерительную цепь, что не приемлемо при полностью автоматизированном исследовании (рис. 1.2 в, г).

На основе выполняемых функций и способе встраивания в технологический процесс ССХ можно разделить на стационарные, переносные и встраиваемые. Стационарные системы используются для построения сложных систем научных исследований. Переносные используются для контроля и настройки дискретного оборудования, а также могут быть использованы для технических систем удаленного типа, т.е. находящихся на удалении от основного технологического процесса. Непрерывные технологические процессы требуют использования встроенных систем ССХ. Это определяется особенностями, связанными с отсутствием обслуживающего персонала в процессе производства. В этом случае ССХ предполагают иерархический принцип построенных на основе централизованного или децентрализованного управления с использованием сетевых технологий.

Основой построения ССХ являются микропроцессорные устройства. Для построения стационарных систем должны быть использованы персональные компьютеры. В связи с этим, для каждого из них характерен определенный принцип построения интерфейса связи с внешними устройствами. Для ССХ такого типа используются стандартные интерфейсы: последовательный или параллельный. Использование того или иного интерфейса продиктовано исключительно соображениями экономичности. Очевидно, что использование последовательного интерфейса, содержащего только два физических проводника, является предпочтительным. Но с другой стороны, использование их целесообразно для удаленных систем исследования, и процессы в таких системах должны протекать достаточно медленно. В ССХ используются параллельные интерфейсы. Это позволяет принимать информацию словами, что не требует дополнительных аппаратных средств для преобразования последовательности сигналов в параллельный код с которым работает микро-ЭВМ. Измерительно - управляющий интерфейс может быть либо встроенным в микроЭВМ, либо может быть выполнен в виде встраиваемого устройства. Лю-

бое из технических устройств этого интерфейса реализуется на основе программных или аппаратных средств. Программная организация ИИИ (информационно - измерительного интерфейса) предполагает использование для каждого устройства либо микропроцессора, либо однокристальной микро-ЭВМ. Это, естественно, усложняет структуру диагностического комплекса, но дает исключительно высокое быстродействие и большую универсальность.

Переносные и встраиваемые системы диагностики строятся на основе микропроцессорных наборов или однокристальных микро-ЭВМ. В тех случаях, когда процедура диагностики носит стационарный характер, целесообразно использование жестких вычислителей, выполненных на основе программируемых логических матриц или на логических элементах повышенной степени интеграции.

Режимы работы таких устройств могут быть реализованы в стандартных средствах обмена с использованием специализированных контроллеров прямого доступа к памяти, с использованием промежуточных устройств памяти с произвольным доступом в синхронном или асинхронном режиме. Возможно использование режимов работы по прерываниям. Для организации взаимодействия между устройствами используются специальные устройства синхронизации, выполненные программными или аппаратными средствами. Внутри устройства также предусматриваются связи, обеспечивающие синхронизацию работы как внутри системы, так и при связях с объектом исследований (рис. 1.2 д, е).

## **1.2. Структура электромеханического привода с контуром стабилизации характеристик**

В общем виде состояние любой ЭМС можно охарактеризовать как совокупность переменных достоверно ее оценивающих, т.е.

$$I = F(Se, P, St, S, t), \quad (1.1)$$

где  $Se$ - оператор семантического обогащения,  $P$ - оператор прагматического обогащения,  $St$ - оператор статистического обогащения,  $S$ - оператор структурного обогащения,  $t$ - текущее время,  $F$ - комбинаторный оператор.

При статистическом оценивании происходит накопление параметрической информации, формирование на ее основе сведений о

дисперсии, корреляционных функциях, математическом ожидании. При структурном оценивании выявляются связи между изменяемыми диапазонами параметров, их количестве и т.д., в пределах общего объема информации. Перераспределение информации характеризуется координатами: параметрами  $Pr$ , временем  $t$ , и пространством состояний  $N$ . Семантическое оценивание связано с выявлением логических закономерностей, их оптимизацией, устранением избыточности и противоречий. Этот вид оценивания основывается на исчислении высказываний и связан с алгоритмами работы микропроцессорных систем и взаимодействием оператора с системой. Прагматическое оценивание позволяет выделить из общего объема объективной информации наиболее практически полезные результаты. Это достигается с применением теории нечетких множеств.

Полученная информация используется для оценки текущего состояния ЭМС, формирования заключения о текущем состоянии, получения прогноза о будущем состоянии, а при необходимости, для выработки стратегии управления и управляющего сигнала.

Диагностическая станция, выполняющая функции приема информации, формирования управляющих сигналов и обработки введенной информации описана в литературе. Алгоритмы определения состояния ЭМС по (1.1) представляют собой базу данных и знаний, которые хранятся в памяти компьютера.

При таком подходе, используя полученную информацию и диагностическую станцию, можно сформировать дополнительный контур управления в системе электропривода. Тогда структурная схема будет иметь вид представленный на рис.1.3. Назовем этот контур – контуром семиотического\* управления или контуром стабилизации характеристик привода (КСХ).

На рисунке утолщенными линиями выделены потоки информации, используемые диагностической станцией для реализации контура семиотического регулирования. Эти же потоки информации используются и для оценки текущего состояния.

Диагностическая станция при работе в режиме СХ решает задачу формирования стратегии управления для достижения на каждом

---

\*Семиотика-1) наука о признаках болезней.(с.459), Словарь иностранных слов. М.: Русский язык,1981г.-620с. 2)наука исследующая свойства знаков и знаковых систем.(с.1174),Большой толковый словарь русского языка. СПб.: Норинт-1998г.-1536с.

этапе функционирования системы главной цели управления, при соблюдении множества ограничений. Такое управление возможно при выражении главной цели управления в виде функционала или целевой функции. Хотя для каждого режима технологического процесса или движения объекта обычно можно указать главную цель, процессы управления современными объектами должны удовлетворять множеству условий. Каждое из этих условий, взятое в отдельности, может выражаться в виде некоторой целевой функции или функционала.

В состав ЭМС входит электропривод, система управления которого, кроме основной системы регулирования содержит и дополнительные регуляторы. Чаще всего, дополнительными контурами регулирования в ЭМС являются контуры оптимального или адаптивного управления. Для каждого из них характерны определенные условия и особенности функционирования. Так при оптимальном управлении решается задача перевода системы из одного состояния в другое, причем из множества возможных решений выбирается наилучшее.

Алгоритм оптимального управления можно представить в общем виде

$$J = J[y(t), u(t), \dot{y}(t), \dot{u}(t), y(t_0), y(t_f), t_0, t_f, t] , \quad (1.2)$$

при условии, 
$$F_i = (y, \dot{y}, u, \dot{u}, t) = 0, \quad i = 1 \dots h$$
 , 
$$\int_{t_0}^{t_f} f_{n+j}(x, u, t) dt = C_j \quad j = 1 \dots l$$
 ,

и ограничениях

$$x(t_0) \in X_t; \quad x(t_f) \in X_f; \quad x \in X_t; \quad u \in U_t.,$$

а методы решений связаны с принципом максимума Понтрягина, вариационным исчислением и динамическим программированием.



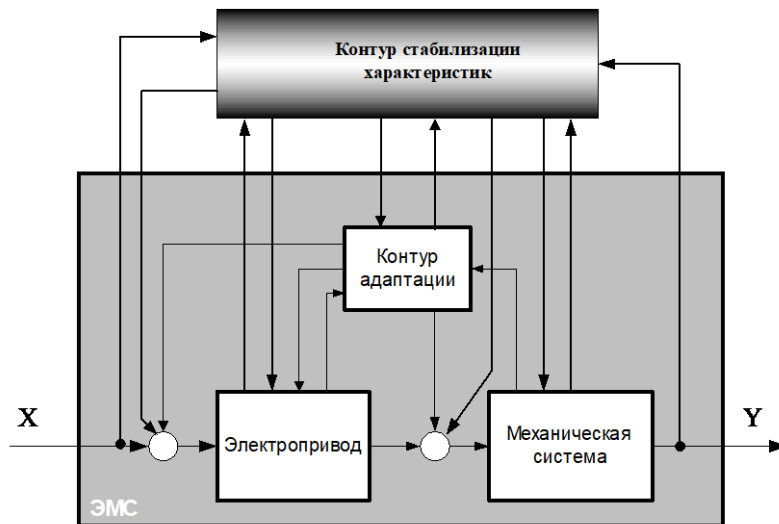


Рис. 1.3. Структурная схема привода с контуром стабилизации характеристик

Адаптивные системы представлены широким набором, как принципов, так и методов их реализации, среди которых отметим три основных: самонастраивающиеся, с адаптацией в особых фазовых состояниях и обучающиеся.

В самонастраивающихся системах для достижения заданных параметров используется функционал вида:

$$J = \text{opt} J[x(t), y(t), u(t), \varepsilon(t), f(t), t] \quad (1.3)$$

В системах с адаптацией в особых фазовых состояниях формируется вид движения, слабо зависящий от внешних условий и использующий закон движения, описываемый выражениями:

$$\begin{cases} dx_i / dt = x_{i+1} \\ dx_n / dt = -\sum_{i=1}^n a_i(t)x_i - u \end{cases} \quad (1.4)$$

где  $u = \sum_{i=1}^n \psi_i x_i$  управляющее воздействие и  $\psi_i = \begin{cases} \alpha_i, & \text{при } g_x > 0 \\ \beta_i, & \text{при } g_x < 0 \end{cases}$  - оценочная функция.

В обучающихся системах способы формирования вида движения сопряжены с получением информации извне ее преобразовании и использовании для формирования управляющих воздействий.

Если два предыдущих принципа используются практически в любых системах управления, то последний имеет ограниченное применение. В настоящее время теория и практика таких систем получает дальнейшее развитие и не только в задачах управления подвижными объектами.

Методы и средства реализации подобных систем определяются множеством факторов и представлены настолько широко, что представляют определенную сложность при их анализе. Тем не менее, общим при реализации всех систем является выбор критерия качества или функционала.

Указанные особенности определяют построение алгоритмов управления объектом, а, следовательно, и способы оценки состояния системы в процессе движения. Последнее особенно важно для реализации задач управления с использованием КСХ, т.к. вид алгоритма и способы его вычисления являются основой для построения базы фактических данных и знаний.

В силу этого, задачей рассматриваемого контура управления является накопление информации на интервале времени большим, чем в режиме непосредственного слежения при непрерывном управлении. Полученная информация обрабатывается таким образом, что используется не только для выполнения диагностики, но и для формирования сигналов управления непосредственно на привод, на контур адаптивного управления и т.п. Контур позволяет отслеживать все изменения, происходящие в системе регулирования на длительном интервале времени, и парировать их, что не обеспечивается ни самой системой регулирования электропривода, ни контуром адаптивного или иного другого регулирования, обеспечивающего слежение за изменением одного, как максимум двух параметров.

Вполне очевидно, что в такой постановке вопроса структура привода должна отвечать таким требованиям, как:

- возможность получать управляющие воздействия от диагностических станций,
- обеспечивать доступ для измерений и управления в пространстве состояний и сигналов,
- иметь развитое информационное обеспечение,
- изменять свою структуру и параметры.

Структурой привода, которая в наиболее полной форме отвечает указанным потребностям, является микропроцессорная. В ней управляющее устройство выполнено в программно-алгоритмическом виде, а, следовательно, процедура получения необходимой информации, ее обработка и формирование управляющих воздействий сводится к соответствующим изменениям алгоритма(ов). При этом не требуется дополнительных аппаратных затрат на устройства реализующих тот или иной принцип адаптивного или оптимального управления.

Однако, если принять единый подход к построению дополнительных контуров управления в виде микропроцессорного модуля, то структура системы управления способна интегрироваться в структуру диагностической станции и все предыдущие требования будут выполняться и для аналоговых систем управления, кроме одного - изменение структуры системы управления электроприводом.

Структуру такого модуля можно представить в следующем виде (рис. 1.4.)

Связь с диагностической станцией осуществляется по последовательному каналу в стандарте RS232(485).

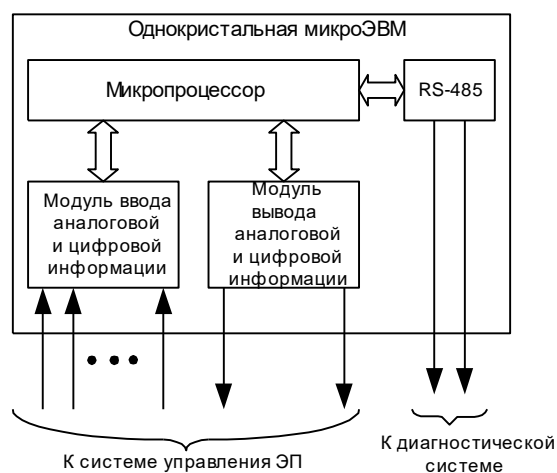


Рис. 1.4. Универсальный модуль для реализации контуров управления

Отметим два основных момента, которые необходимы для реализации алгоритмов управления: сформировать оценочную функцию и разработать алгоритм принятия решения о целесообразности применения соответствующего метода оценки параметров.

В основу построения алгоритмов анализа выбора того или иного принципа управления положен обобщенный критерий качества. Для детерминированных процессов с непрерывным временем, описывае-

мых в пространстве состояний, этот критерий, в общем случае, задается в форме

$$I = V_3[x(t_k), \rho] + \int_{t_1}^{t_2} L[x(\theta), u(\theta), \theta, \beta, K] d\theta.$$

Здесь  $V_3$  – заданная с точностью до вектора параметров  $\rho$  скалярная функция конечного состояния процесса  $x(t_k)$ ,  $L$  – скалярная функция или в самом общем случае – оператор со скалярным выходом, действующий из пространств состояния, управления; вектор параметров  $\beta$  влияет преимущественно на зависимость  $L$  от  $x$ ; вектор параметров  $K$  влияет главным образом на зависимость  $L$  от  $u$ .

Функционал такого типа не является исчерпывающим и в каждом конкретном случае он выбирается исходя из особенностей поставленной задачи. Тем не менее, все имеющиеся функционалы образуют множество, из которого и выбирается необходимый, сообразно текущему состоянию.

Диагностическая станция, пополняя информацию, выполняет основную функцию - анализ состояния ЭМС, на основе обработки накопленной информации, по (1.1). Одновременно производится оценка критериев качества. По результатам вычислений определяется, какой из методов управления применять в тот или иной момент времени. При выборе стратегии управления, ДС из множества функционалов выбирается наиболее подходящий по соответствующему параметру, используя при этом процедуру логического выбора, описываемую следующим выражением

$$(\forall J)[(\forall I)[I \in J \rightarrow I \neq \emptyset] \wedge (\forall I)(\forall i)[i, I \in J \wedge I \neq i \rightarrow i \wedge I = \emptyset] \rightarrow (\exists U)(\forall I)[I \in J \rightarrow (\exists t)[U \cap I = \{t\}]] ]'$$

т.е. каждому элементу  $i$  (частный критерий) непустого множества  $J$  (множество возможных критериев, обеспечивающих управление с оптимальным значением характеристик или параметров) ставится в соответствие один из элементов  $I$  (подмножество, множества  $J$ , или множества критериев одного вида).

Структура программного обеспечения построена таким образом, что кроме баз фактических данных, знаний и архива включает в себя такие основные алгоритмы, как:

- ввода диагностической информации в реальном времени

- представление данных в формате пригодном для преобразования в знания,
- интерпретации входных знаний и фактических данных и распределения их по базам,
- обработки фактических данных и преобразования их в знания,
- интерпретации знаний в задачах принятия решений,
- принятия решений.

В базу фактических данных входит информация о структуре построения контуров управления, контуров адаптивного и оптимального управления, описываемых в терминах «вход-выход», измеряемых переменных, предельных значениях регулируемых параметров и многое другое.

База знаний представлена набором функционалов, соответствующих различным способам реализации дополнительных контуров управления, методов оптимизации, алгоритмов их вычислений, в том числе и приведенных в выражениях (1.3), (1.4), (1.5) и т.д.

Еще одной, существенной, составляющей базы знаний является обработка вводимой информации. Процесс измерений неизбежно связан с наличием шумов в измеряемом сигнале. Для устранения помех из сигнала производится обработка с использованием методов усреднения, сглаживания, прореживания, цензурирования и фильтрации. В силу того, что эта процедура должна выполняться без участия оператора, применяется алгоритм, в котором задается относительное значение погрешности и выполняется обработка в автоматическом режиме. Тот или иной метод обработки применяется на основе анализа среднеквадратичной ошибки отклонения от формы воспроизведенного сигнала.

Наиболее сложными являются алгоритмы обработки знаний и связанные с ними алгоритмы, реализующие выводы. Обработка знаний предполагает использование методов распознавания ситуаций, когда множества, описывающие набор данных и знаний, необходимо отождествлять вполне конкретной ситуации. Последнее связано с тем, что одни и те же данные могут характеризовать различные состояния системы.

Алгоритмы обработки знаний, в свою очередь, образуют базу обработки знаний. Наибольший интерес для процедур обработки знаний представляют алгоритмы, связанные с теорией нечетких мно-

жеств и исчисления предикатов, а в качестве моделей, описывающих принципы работы ЭМС – динамические сети, построенные в терминах причинно-следственных связей.

Общее построение программно-алгоритмического обеспечения всего комплекса основано на принципах работы экспертных систем, с одной существенной особенностью: место человека–эксперта занимает диагностическая станция с присущими ей алгоритмами работы. Это обстоятельство нельзя не учитывать. Поэтому диагностическая станция должна иметь "способность" к обучению и самообучению.

Взаимодействие отдельных процедур обеспечения регулирования с контуром стабилизации сводятся к следующей последовательности.

- Вводятся измеряемые параметры, включая и сигнал на входе системы управления;
- Производится обработка введенной информации, обеспечивающая ее достоверность;
- Анализируются параметры введенных сигналов во временной и частотной областях, определяются статистические характеристики;
- Обработанная информация распределяется по соответствующим базам;
- Формируется заключение о текущем состоянии объекта управления и системы управления;
- Составляется прогноз о возможном состоянии объекта диагностики в будущем и при неудовлетворительном будущем состоянии принимается решение о введении иных законов управления;
- Используя, например, математический аппарат теории чувствительности, определяют ближайшие границы, при которых система будет находиться в работоспособном состоянии и отвечать заданным техническим характеристикам;
- По степени отклонений от номинальных значений принимается решение об использовании того или иного метода коррекции параметров или структуры;
- Вычисляются функционалы, способные обеспечить необходимые характеристики;
- Проверяются гипотезы о состоятельности выбранных функционалов;

- Выбирается функционал, наиболее полно отвечающий текущему состоянию;
- Выполняются пробные шаги с новым принципом управления, и принимается решение о применении выбранного способа управления.
- Если удовлетворительный результат не достигнут, то вновь производится выбор способа управления, и процедура анализа вновь повторяется.
- Если с течением времени принятый к реализации алгоритм не удовлетворяет процессу управления, то принимается решение об изменении выполняемого алгоритма и процедура возвращается к прогнозу о возможном состоянии на ближайшую перспективу.

Данная последовательность действий выполняется непрерывно. При отключении системы управления сохраняются все предшествующие настройки, а продолжение работы начинается вновь с ввода информации с измерительных систем. Обязательным условием является включенное состояние ЭВМ диагностической станции.

Программное обеспечение диагностической станции представляет собой специализированную оболочку. В состав оболочки, кроме перечисленных выше, входят программы ввода предварительной информации об объекте управления, включающей в себя фактические данные о параметрах и характеристиках, структурной схеме и способах построения регуляторов, возможных неисправностях и методах их устранения и т.п.

### **1.3. Обобщенная структурная схема контура стабилизации характеристик**

Приведенная классификация технических средств охватывает исключительно основные аспекты, оставляя без внимания второстепенные факторы. Однако при окончательном решении необходимо учитывать и разрядность микропроцессоров, и возможности использования программного обеспечения и т.д. Не отражена и роль оператора в процессе диагностирования, и способы получения окончательной информации, и виде ее представления. Эти вопросы будут раскрыты по ходу рассмотрения последующих разделов настоящей работы.

Обобщенная структура диагностического комплекса может быть представлена рис.1.5.

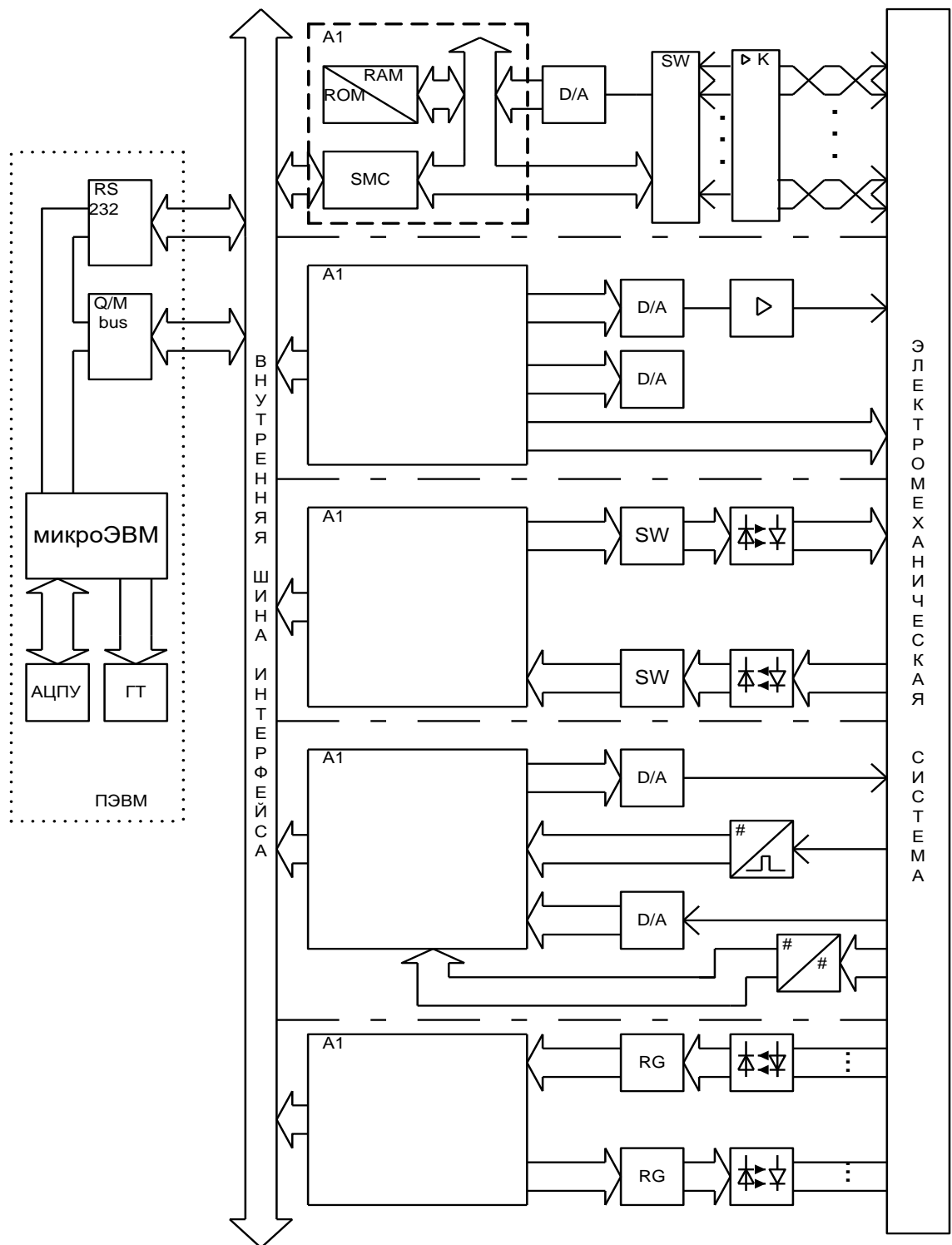


Рис. 1.5. Обобщенная структурная схема системы диагностики



В состав комплекса входит персональная ЭВМ, имеющая в своем составе набор периферийного оборудования, необходимый для получения текстовой и графической документации. Выполнение диагностических задач сопровождается большим количеством экспериментов. При этом обработка информации должна проводиться в короткие сроки и отображаться в удобном для оператора виде на экране дисплея.

Естественно, что графический режим работы ПЭВМ обязателен.

Способ организации взаимодействия ПЭВМ с устройствами, обеспечивающими связь с объектом, реализуется через интерфейс "Общая шина". В качестве интерфейса, вообще говоря, могут быть использованы любые другие технические средства, включая и стандартные интерфейсы, такие как И41 (и его модификации) RS232 и т.д.

Следующим устройством комплекса является генератор, формирующий сигналы произвольной формы. Число каналов выходных сигналов определяется числом входов управления, подаваемых на вход объекта исследования. Чаще всего для ЭМС достаточно иметь два одновременно работающих генератора, один из которых формирует сигнал управления на вход привода, а второй формирует сигналы возмущения. Форма сигнала и его параметры задаются программным путем, а для разгрузки ПЭВМ он выполнен на отдельном микропроцессорном устройстве. Структура генератора определяется особенностями процесса диагностирования, и в самом простом варианте он может быть выполнен в виде жесткой структуры (на элементах постоянных запоминающих устройств). При наличии цифровой структуры электропривода на его вход должен подаваться сигнал в соответствующем виде, т.е. в цифровой форме. Это так же учтено в структуре генератора.

В зависимости от физической природы измеряемых сигналов, в системе диагностики предусмотрены два типа устройств ввода. Для ввода аналоговой информации используется подсистема с аналого-цифровым преобразователем, вход которого связан с коммутатором, позволяющим вводить информацию с нескольких источников. При необходимости входные цепи снабжаются специальными усилителями с автоматической регулировкой уровня вводимого сигнала (на схеме не показаны).

Диагностика каждого из параметров предполагает определенный подход к формированию сигналов управления и получения информации о реакции на входные воздействия. Полученная при этом информация может быть использована не только для констатации состояния электропривода, но и позволяет, меняя параметры получить оптимальные настройки, установить предельные значения характеристик, обеспечивающих устойчивые режимы работы. На рис. 1.2 показаны основные уровни или связи, оказывающие влияние на организационную структуру диагностического комплекса.

Кроме указанных ранее характеристик, существенную роль играет тип используемого электродвигателя, и соответственно, системы управления этим двигателем. В ряде случаев в ТМ могут использоваться специальные системы приводов с "экзотическими" видами исполнительных двигателей. Перечисленные причины в равной степени влияют и на программное обеспечение, так как изменяются и характеристики приводов и способы получения информации о них.

Для ввода цифровой информации (параллельный код, унитарная последовательность импульсов) используется аналогичное устройство, на базе аналого-цифрового преобразователя. Управление этими подсистемами может производиться как от ПЭВМ, так и от встроенного микропроцессорного устройства.

В зависимости от частоты входного сигнала и числа источников информации могут быть рекомендованы следующие подходы при вводе информации:

- ввод информации непосредственно с источника информации в ПЭВМ, минуя промежуточные устройства. При этом может использоваться один АЦП с коммутатором на входе;

- ввод информации в буферное запоминающее устройство.

Это позволяет накапливать информацию на определенном интервале, а затем передавать ее для обработки в ПЭВМ. Управление в этом случае осуществляется от микропроцессора;

- ввод информации с использованием автономных каналов, имеющих в своем составе оперативное запоминающее устройство и АЦП.

Управление ведется по жесткому циклу с использованием либо логического устройства, либо микропроцессора.

Построение той или иной подсистемы ввода определяется, кроме указанного выше, стоимостью, которая возрастает с повышением точности процесса диагностирования.

Следует отметить, что любая из подсистем, реализованная на основе микропроцессора, может быть использована как основа для построения экспресс диагностических систем (переносных или встраиваемых в ТМ).

Реализация следящих систем при диагностировании ЭМС вне станка обеспечивается с использованием микропроцессорных регуляторов. Структура регулятора построена таким образом, что обеспечивает два основных режима: режим позиционирования и движения в следящем режиме. Программа, обеспечивающая эти режимы, хранится в ПЗУ. Однако при необходимости этот регулятор может быть свободно программируемым. В составе регулятора(ов) входят: цифровой ввод (с импульсного датчика или иного с цифровым выходом) и аналоговый ввод/вывод.

Такой набор позволяет реализовать контур положения с любым датчиком. Число регуляторов определяется структурой механизма перемещений и числом управляемых координат.

В полностью автоматизированных комплексах существует множество технологических операций, обеспечивающих нормальный процесс функционирования. Часть этих сигналов используется для контроля об исполнении команд, а часть – задает команды для выполнения определенного цикла операций, определяемых программой эксперимента. Для этой цели в качестве приемников и передатчиков дискретных сигналов используются регистры.

Принципиальное значение имеет программное обеспечение диагностического комплекса. Кроме базового программного обеспечения, в основу построения прикладного программного обеспечения положен пакет графических программ и программы, написанные на языках высокого уровня (Фортран, Си, Бейсик). Поскольку процесс диагностики ведется в реальном времени, то большая часть программ написана на языке Ассемблер. Это программы ввода/вывода данных, обмена информацией между микропроцессорными устройствами и между ПЭВМ и микропроцессорами. Вводимая информация запоминается в ОЗУ, а затем производится ее обработка (например, сглаживание и цензурирование данных) с целью исключения случайных вы-

бросов. Обработанная информация сохраняется на дисках (гибких или жестких, в зависимости от типа ПЭВМ). В дальнейшем обработанная информация используется как для вычисления параметров, подлежащих диагностики, так и для формирования заключения о состоянии привода и пополнении баз данных и знаний. ОФС привода предполагает исследование его на типовое входное воздействие. Исследование проводится либо во временной области, либо в частотной. В первом случае используются программы формирования тестовых сигналов, таких как скачок напряжения, импульсное воздействие и т.д. Во втором случае на вход системы подается периодический сигнал (синусоидальный или прямоугольный). При оценке параметров, которые не могут быть измерены, используются специально разработанные программы идентификации. К ним относится идентификация параметров механической системы, электродвигателя и ЭМС в целом.

В программное обеспечение, позволяющее исследовать следящие и позиционные системы, входят алгоритмы точного позиционирования, а следящий режим основан на движении при управляющем входном сигнале, формируемом на постоянной несущей частоте.

Все программное обеспечение объединяется в единый комплекс и оформляется как *экспертная система*, работающая при минимальном участии оператора.

Поскольку диагностика используется в самом широком смысле, т.е. от диагностики в научных исследованиях до диагностики на объекте (встроенных систем), то прикладное программное обеспечение имеет специфику для каждого конкретного случая. Однако неизменными остаются программы обработки, ввода и вывода данных.

#### *Основные решаемые задачи*

1. В последние годы, в первую очередь в связи с резкой интенсификацией и автоматизацией процессов производства, усложнением и расширением фронта научных экспериментов, существенно изменились требования к средствам диагностики.

Новые требования оценки состояния связаны главным образом с переходом к получению и использованию результатов не отдельных измерений, а потоков информации. В задачах ОФС необходимо получать информацию о десятках однородных или разнородных величин, большая часть из которых может быть недоступной для прямых измерений.

Как правило, получение всего объема информации должно выполняться за ограниченное время. Если эти функции возложить на человека, вооруженного лишь простейшими измерительными и вычислительными устройствами, то в силу физиологических ограничений он, даже при весьма значительной тренировке, не сможет их выполнять. Решение этой проблемы путем увеличения обслуживающего персонала не всегда возможно, а там, где это возможно, в большинстве случаев экономически невыгодно. Уместно заметить, что из-за использования ЭМС в опасных условиях функционирования или вредности технологического процесса участие человека-оператора может быть вообще недопустимым.

Таким образом, в задачах ОФС была поставлена проблема создания новых средств, способных разгрузить человека от необходимости сбора и обработки интенсивных потоков измерительной информации. Решение этой проблемы привело к появлению нового класса технических средств – диагностические комплексы, предназначенные для автоматического сбора, обработки информации и принятия решений. Основой построения таких комплексов должны быть микропроцессорные системы.

2. Решение обозначенной проблемы предполагает развитие научных исследований и разработок по следующим направлениям:

- разработка информационной модели процесса диагностики учитывающей особенности функционирования ЭМС, существующие методы и средства диагностики и идентификации, на основе выявления новых подходов и принципов построения микропроцессорных систем и алгоритмов;
- разработка и исследование алгоритмов интегральной оценки состояния приводов и параметров на основе комплексного подхода, базирующегося на теории информации, нечетких множествах, теории подобия и энергетических характеристик, на основе частотных характеристиках;
- создание экспертных систем реального времени для диагностики приводов и для проектирования систем СХ на базе микропроцессорной техники;
- теоретическое и экспериментальное обоснование методов оценки текущего состояния, параметров и прогнозирование будущего

состояния. Определение состава оборудования для достижения целей ОФС, алгоритмического и программного обеспечения;

- практическая реализация КСХ на основе разработанных принципов построения систем, методов диагностики и идентификации, алгоритмического и программного обеспечения, являющихся уникальным оборудованием с характеристиками на уровне лучших мировых образцов, внедрение их в производство;

3. В результате проведенного анализа отметим существенные особенности, определяющие направления создания диагностических станций:

- первое, и самое важное, современные ЭМС не содержат в своем составе устройств, обеспечивающих процедуры диагностики, за исключением встроенных средств выполняющих индикацию состояния в аварийных режимах;

- схемотехническая реализация приводов существенно различается. Во многих случаях, кроме аналоговых элементов, привод содержит и дискретные. Если даже привод состоит только из аналоговых компонентов, то и в этом случае, за счет множества обратных связей, в том числе и перекрестных, а также использование устройств адаптации и самонастройки, выполнение диагностики и алгоритмов для ее проведения представляет собой существенную проблему;

- общие проблемы диагностики САУ ЭМС связаны с разработкой технических средств и алгоритмов, ориентированных на микропроцессорную реализацию;

- оценка состояния и параметров ЭМС в процессе эксплуатации нуждается в создании встроенных микропроцессорных систем диагностики и алгоритмов, обеспечивающих их выполнение в реальном времени.

4. Развитие теории и практики экспертных систем делает возможным использование их для решения задач ОФС. Очевидно, что построение подобных систем возможно исключительно с использованием средств микропроцессорной техники. Еще одним доводом в пользу экспертных систем является значительно усложнение ТС, расширение их функциональных возможностей, повышение требований к процессам движения по точности и быстродействию и многое другое.

5. Анализ современных тенденций развития устройств диагностики показал, что определенные успехи в этой области достигнуты. Однако ряд проблем диагностики работоспособности и параметров ЭМС сохраняет актуальность и, прежде всего, в отношении микропроцессорных средств, используемых для построения диагностических станций, алгоритмов, способных выполнять диагностику в реальном времени с ограниченным объемом информации. Переход к информационным технологиям предопределил специфику получения диагностической информации, переводя ее в плоскость анализа информации, содержащейся в диагностическом сообщении.

6. Развитие информационных технологий позволяет решать проблемы диагностики в глобальном их понимании, используя сетевые технологии. Подобные вопросы мало изучены и требуют своего разрешения.

## Глава 2. АЛГОРИТМЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА

### 2.1. Алгоритм диагностики электромеханических систем на основе измерения количества информации

Работа электромеханической системы характеризуется многообразием входных воздействий, внутренних состояний, различной реакцией на входное воздействие и может рассматриваться как канал передачи информации (КПИ). Информационную модель процесса диагностирования представим в следующем виде (рис. 2.1).

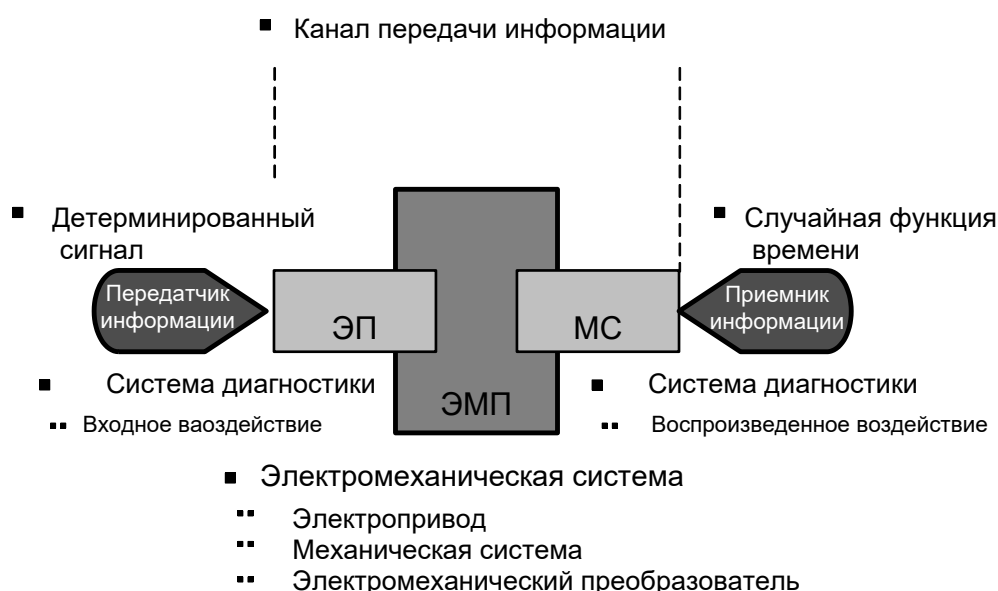


Рис. 2.1. Модель процесса диагностирования при измерении количества информации

Схема состоит из передатчика информации, в качестве которого может использоваться микропроцессорная система диагностики, если процесс диагностики ведется вне оборудования или система числового программного управления, если диагностика выполняется на действующем оборудовании, а формируемые ей сигналы управления интерпретируются как сигналы для выполнения диагностики; приемника информации, в качестве которого используется микропроцессорная система диагностики. Передатчик информации вырабатывает сигнала-



лы, параметры которого известны, а в приемнике информации они представлены как случайная функция времени и требуют определения. Канал передачи информации может быть представлен в виде электромеханической системы, диагностику которой необходимо провести.

В частном случае в качестве канала передачи информации может быть использован любой узел электропривода или механической системы при условии, что возможно измерение хотя бы одного выходного сигнала.

Каждая из составляющих ЭМС подвержена внутренним возмущениям, обусловленным особенностями конструкции и внешним - обусловленным технологическим процессом. Будем считать, что передатчиком и приемником является микропроцессорное устройство, а диагностике подлежит электромеханическая система.

Оценку работоспособности ЭМС свяжем с энтропией состояния. Для ЭМС, имеющей  $n$  возможных состояний с вероятностями их появлений  $p(S_1), p(S_2), \dots, p(S_n)$ :

$$H(S) = \sum_{i=1}^n p(S_i) \log \frac{1}{p(S_i)} = -\sum_{i=1}^n p(S_i) \log p(S_i). \quad (2.1)$$

Если принять, что ЭМС может находиться в работоспособном состоянии или в неработоспособном, то

$$H(S) = -\sum_{i=1}^n p(S_i) \log_2 p(S_i). \quad (2.2)$$

Энтропия ЭМС представляет собой среднее значение энтропии отдельных состояний.

$$H(S) = \sum_{i=1}^n p(S_i) H(S_i). \quad (2.3)$$

В этом выражении  $H(S_i)$  является оценкой неопределенности состояния отдельного узла (элемента) и вычисляется:

$$H(S) = \log_2 \frac{1}{p(S_i)}. \quad (2.4)$$

В случае равновероятного состояния узлов системы энтропия определяется как:

$$H(S) = \log_2 n. \quad (2.5)$$

Так как мы рассматриваем сложную систему, объединяющую в себе диагностируемую ЭМС и микропроцессорную систему диагностики, то энтропия равна:

$$H(SSD) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(S_i SD_j) \log_2 p(S_i SD_j). \quad (2.6)$$

Поскольку между объектом и системой диагностики существует статистическая связь, то энтропия может быть определена:

$$H(SD/S) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(S_i) p(SD_j / S_i) \log_2 p(SD_j / S_i). \quad (2.7)$$

В этом выражении величина  $p(SD/S)$  представляет собой ожидаемое значение энтропии системы при различных состояниях объекта диагностики,  $p(S_i)$  представляет собой априорную вероятность пребывания ЭМС в работоспособном состоянии.

Получив значения энтропии, можно перейти к определению количества информации. Информация, которая характеризует состояние ЭП, определяется разностью энтропии состояний ЭМС до подачи сигнала и после прохождения сигнала, то есть:

$$I = H(S_i) - H(S_i^*). \quad (2.8)$$

Если считать, что система диагностики контролирует параметры ЭМС, то информация  $SD$  относительно  $S_i$  определяется соотношением:

$$I_s(SD) = H(S_i) - H(S_i / SD_j). \quad (2.9)$$

Среднее значение информации, содержащееся в ЭМС относительно системы диагностики равно:

$$I_{SD}(S) = H(SD_j) - H(SD_j / S_i). \quad (2.10)$$

В силу равенства

$$H(S_i / SD_j) = H(S_i SD_j) - H(SD_j), \quad (2.11)$$

запишем величину информации сложной системы

$$I_s(SD) = H(S_i) + H(SD_j) - H(S_i SD_j). \quad (2.12)$$

Последнее выражение с учетом вероятностей  $p(S), p(SD)$  и  $p(SDS)$  можно привести к следующему виду:

$$I_s(SD) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(S_i SD_j) \log_2 \frac{p(S_i SD_j)}{p(S_i) p(SD_j)}. \quad (2.13)$$

Информация, полученная в результате контроля параметров, определяется:

$$I_s(SD) = \sum_{j=1}^m p(SD_j / S_i) \log_2 \frac{p(S_i SD_j)}{p(S_i) p(SD_j)}, \quad (2.14)$$

а информация, которую несет диагностируемый, параметр относительно состояния ЭМС равна:

$$I_s(SD) = \log_2 \frac{p(S_i SD_j)}{p(S_i)p(SD_j)}. \quad (2.15)$$

Таблица 2.1

Экспериментальные данные

| Время п/п | Состояние СД | Состояние ЭМП |    |
|-----------|--------------|---------------|----|
|           |              | s1            | s2 |
| 0.05      | sd1          | 30            | 0  |
| 0.08      | sd2          | 5             | 3  |
| 0.1       | sd3          | 3             | 9  |

Проведем сравнительную оценку количества получаемой информации в процессе функционирования ЭМС, с электроприводом ЭПУ1-2-П. Электропривод предназначен для работы в режимах S1 (длительный), S2(кратковременный) и S3(повторно - кратковременный). Длительная работа, например, в режиме S1 ведет к нагреву электродвигателя, что в свою очередь приводит к изменению времени переходного процесса. Это связано с изменением электрической постоянной времени. Аналогичное происходит и с изменением момента инерции механической системы. Непрерывный контроль за переходной характеристикой ЭМС показал, что состояние оценивалось, как удовлетворительное в 38 и как не удовлетворительное - в 12 случаях, с разным отклонением от первоначального состояния.

Выделим в экспериментальных данных три диапазона значений и представим их в виде таблицы 2.1. Вычисленные значения вероятностей по приведенным выше формулам сведем в таблицу ( см. табл. 2.2.).

Из анализа таблицы 2.2. можно утверждать, что диагностируемая система находится в состоянии S1, т.к. количество информации к моменту окончания оценки состояния имеет наибольшее значение. Иными словами, утверждаем, что температура ЭМП не превышает предельно допустимого значения, т.к. электромеханическая постоянная времени не изменилась до такой степени, что переходный процесс значительно увеличился. С другой стороны, оценка относительно технического состояния имеет наибольшее значение для  $t=0,1$ , из чего так же выводим, что температура ЭМП не увеличилась.

Таблица 2.2

## Расчетные значения количества информации

| Объем информации \ Количество информации      | 50    | 100        | 150        | 200        | 250        | 300        | 350        | 400        | 450        |
|---|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| относительно исправного состояния             | 0.148 | 0.079      | 0.225      | 0.306      | 0.267      | 0.235      | 0.207      | 0.183      | 0.164      |
| среднее значение                              | 0.448 | 0.268      | 0.409      | 0.341      | 0.353      | 0.388      | 0.399      | 0.398      | 0.392      |
| относительно неисправного состояния           | 1.393 | 1.076      | 0.745      | 0.387      | 0.478      | 0.677      | 0.852      | 1.006      | 1.144      |
| относительно неисправного состояния, $t=0.05$ | -     | -<br>2.670 | -<br>2.856 | -<br>1.687 | -<br>1.929 | -<br>2.145 | -<br>2.282 | -<br>2.377 | -<br>2.446 |
| относительно неисправного состояния, $t=0.08$ | 0.643 | 0.810      | 0.822      | 0.642      | 0.678      | 0.941      | 1.162      | 1.356      | 1.526      |
| относительно неисправного состояния, $t=0.1$  | 1.644 | 1.810      | 1.189      | 0.877      | 0.988      | 1.251      | 1.473      | 1.666      | 1.836      |
| относительно технического состояния, $t=0.05$ | 0.395 | 0.172      | 0.390      | 0.359      | 0.354      | 0.306      | 0.267      | 0.235      | 0.209      |
| относительно технического состояния, $t=0.08$ | 0.065 | 0.083      | 0.219      | 0.195      | 0.193      | 0.313      | 0.427      | 0.531      | 0.626      |
| относительно технического состояния, $t=0.1$  | 0.830 | 0.780      | 0.620      | 0.479      | 0.527      | 0.718      | 0.885      | 1.032      | 1.164      |

Однако следует заметить, что предприятия эксплуатирующие ЭМС не уделяют должного внимания накоплению статистической информации, а ее отсутствие в значительной мере ограничивает действие рассмотренного подхода.

Тем не менее, можно выполнить оценку количества информации и, соответственно, выполнить процедуру диагностики по несколько иной методике.

Если изначально предположить, что канал передачи информации свободен от погрешностей, а квантование сигнала по уровню носит идеальный характер и, кроме того, если известен динамический диапазон  $L$  и шаг  $\Delta P$  (ступень) квантования, то число уровней определяется как:

$$N = L / \Delta P = a^{I(q/U)}, \quad (2.16)$$

где  $a$  - основание систем счисления.

При равномерном распределении

$$I(q,U) = \log_a (L/\Delta) - H(q/U), \quad (2.17)$$

и тогда

$$N = La^{-H(q/U)} / \Delta P. \quad (2.18)$$

В этом случае скорость получения информации можно определить:  $V = I(q,U)/T$ , а пропускную способность как  $C = \max_{\{f(x)\}} V$ .

При нормально распределенных аддитивной помехи  $U$  и сигнала  $q$  с мощностями  $P_{\Pi}$  и  $P_c$ , и заданной граничной частоте сигнала пропускная способность

$$C = n/T [ H(q) - H(q/U) ], \quad (2.19)$$

или с учетом предыдущих рассуждений

$$C = f_m \log(1 + P_c / P_{\Pi}), \quad (2.20)$$

а максимальное количество получаемой информации:

$$I_{\max}(q,U) = CT = Tf_m \log(1 + P_c / P_{\Pi}). \quad (2.21)$$

Для вычисления количества информации необходимо определить значение мощности сигнала и помехи. Для этого можно поступить следующим образом. Для рассматриваемого сигнала  $q(t)$  ограничим его спектр значением  $f_m$ , которое определим из условия, что энергия суммы потерянных гармоник при прохождении через канал не превышает энергии ошибки. Тогда полную энергию  $P_s$  сигнала  $q(t)$  можно представить следующим образом:

$$P_s = P_c + P_0, \quad (2.22)$$

где  $P_c$  - энергия сигнала, ограниченного частотой  $f_m$ ;  $P_0$  - энергия потерянных гармоник.

Полную энергию  $P_s$  сигнала  $q(t)$  можно найти по его спектральной плотности

$$P_s = \int_0^{\infty} [q(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) S^*(\omega) d\omega, \quad (2.23)$$

где  $S^*(\omega)$ -функция, комплексно сопряженная с функцией  $S(\omega)$ .

Аналогично, энергия  $P_c$  сигнала  $q(t)$ , ограниченного частотой  $f_m$ .

$$P_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_m} S(\omega) S^*(\omega) d\omega. \quad (2.24)$$

Пусть представление сигнала по его квантованным значениям не превышает величины  $(\pm n\Delta P)$  ( где  $n$ - коэффициент, а  $\Delta P$  - шаг шкалы уровней). Если допустить, что любое значение сигнала на выходе объекта в пределах заданной величины  $(\pm n\Delta P)$  равновероятно, то среднее значение энергии потерянных гармоник можно представить в виде

$$P_0 = \frac{1}{2n\Delta P} \int_{-n\Delta P}^{n\Delta P} q^2 dq = \frac{(n\Delta P)^2}{3}. \quad (2.25)$$

Аналогично, если положить что любое значение сигнала  $q(t)$  в пределах от 0 до  $k$  (где  $k$  - максимальное число шагов шкалы уровней) равновероятно, то среднее значение полной энергии:

$$P_s = \frac{1}{k\Delta P} \int_0^{k\Delta P} q^2 dq = \frac{(k\Delta P)^2}{3}. \quad (2.26)$$

Из выражений (2.25), (2.26) следует, что

$$P_0 = \frac{n^2}{k^2} P_s, \quad (2.27)$$

где  $\Delta = n/k$  относительная ошибка.

Подставляя выражение (2.27) в формулу (2.22), получим

$$(1 - \Delta^2) P_s = P_c. \quad (2.28)$$

Аналогично определяется мощность помехи. Для этого представим канал передачи информации в виде одномерной системы, на вход которой поступает сигнал  $x(t)$ ,  $q(t) = v(t) + n(t)$ - измеренный сигнал на выходе системы,  $v(t)$ -выходной сигнал,  $n(t)$ - помеха, приложенная к выходу системы.

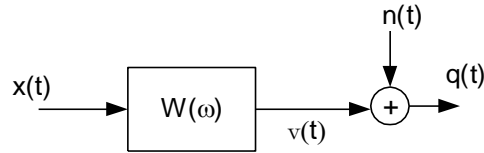


Рис.2.2. Одномерная система

Анализ осуществляется на основе только реализации  $x(t)$  и  $q(t)$ , каждая из которых с достаточной полнотой описывает соответствующий стационарный или случайный переходный процесс с нулевым средним значением. Допущение об отсутствии помех в измерениях входного процесса  $x(t)$  является вполне приемлемым так, как исследователь может контролировать измерения. Однако для выходного процесса дело обстоит иначе, поскольку измерения  $q(t)$  помимо вклада заданного входного процесса  $x(t)$  могут содержать компоненты, обусловленные другими известными или неизвестными возмущениями, действующими на входе системы. Все эти компоненты, а также нелинейные эффекты и другие возмущения, которые ведут к тому, что процесс  $q(t)$  не совпадает с  $v(t)$ - результатом прохождения  $x(t)$  через систему с частотной характеристикой  $W_{xq}(\omega)$ , включены в помеху  $n(t)$  на выходе системы.

Оценка оптимальной частотной характеристики представленной системы имеет вид

$$\bar{W}(\omega) = \frac{\bar{S}_{xq}(\omega)}{\bar{S}_x(\omega)}, \quad (2.29)$$

где  $\bar{S}_x(\omega)$   $\bar{S}_{xy}(\omega)$  – оценки спектральной плотности входного процесса и взаимного спектра входа и выхода. Обычная функция когерентности оценивается по формуле

$$\gamma_{xq}^2(\omega) = \frac{|\bar{S}_{xq}(\omega)|^2}{\bar{S}_x(\omega) \bar{S}_q(\omega)}, \quad (2.30)$$

где  $\bar{S}_q(\omega)$  – оценка спектральной плотности выходного сигнала.

При вычислении оценок  $S_q(\omega)$ ,  $W_{xq}(\omega)$  и  $\gamma_{xq}^2(\omega)$  необходимо располагать измерениями  $x(t)$  и  $q(t)$ , выполненными в одном масштабе времени, и вводить поправку на время распространения  $\tau$ , вызывающее сдвиг по времени между реализациями  $x(t)$  и  $q(t)$ . В этой поправке

нет необходимости, если запаздывание пренебрежимо мало по сравнению с длиной  $T$  экспериментальной реализации, по которой затем выполняется усреднение оценок.

Для системы, показанной на рис.2.2. имеем

$$\bar{S}_{xq}(\omega) = |W_{xq}(\omega)|^2 \bar{S}_x(\omega) = \gamma_{xq}^2(\omega) \bar{S}_q(\omega) \quad (2.31)$$

$$\bar{S}_n(\omega) = [1 - \gamma_{xq}^2(\omega)] \bar{S}_q(\omega) \quad (2.32)$$

Функция  $\bar{S}_v(\omega)$  оценка спектра выходного процесса определяется путем вычислений, а не по данным измерений. По измерениям выходного процесса вычисляется функция  $\bar{S}_q(\omega) = \bar{S}_v(\omega) + \bar{S}_n(\omega)$ .

Для вычисления мощности помехи выполним интегрирование соответствующих спектров по формуле (2.23) и на основании выражений (2.31, 2.32) получим следующие соотношения:

$$\frac{P_v}{P_n} = \frac{\gamma_{xq}^2(\omega)}{1 - \gamma_{xq}^2(\omega)}, \quad (2.33)$$

$$\gamma_{xq}^2(\omega) = \frac{P_v / P_n}{1 + P_v / P_n}. \quad (2.34)$$

Таким образом, оценка  $\gamma_{xq}^2(\omega)$  является функцией отношения сигнала к шуму  $\bar{S}_v(\omega) / \bar{S}_n(\omega)$ .

Окончательно, количество информации определяется из следующего соотношения

$$I_{\max}(q, U) = CT = Tf_m \log(1 + \gamma_{xq}^2). \quad (2.35)$$

## 2.2. Диагностика электромеханических приводов по энергии выходного сигнала

Упрощение процедуры диагностики, уменьшение времени на ее выполнение, и сокращение объема аппаратных средств может быть достигнуто за счет подачи на вход ЭМС сигнала прямоугольной формы и последующего определения энергии выходного сигнала.

Рассмотрим структурную схему процесса диагностики (рис.2.3).



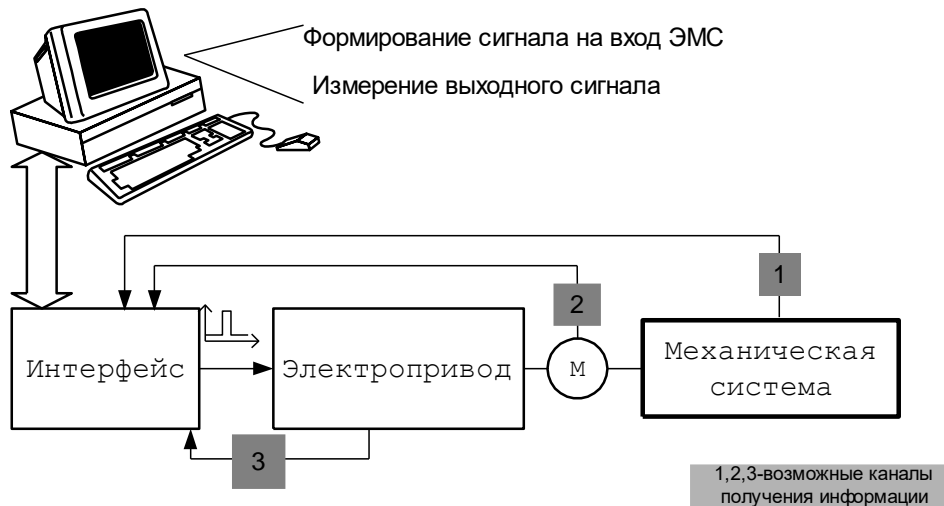


Рис.2.3. Структурная схема процесса диагностика

Микропроцессорная система через интерфейс подает на вход электропривода сигнал прямоугольной формы. Форма сигнала и его параметры таковы что позволяют для формирования сигнала использовать любую, одну, линию шины данных микропроцессора. Длительность импульса задается программно с использованием, например, интервального таймера, являющегося обязательным элементов любой микропроцессорной системы. Съем информации осуществляется либо с выхода МС (линия 1 на схеме), если имеется соответствующий измерительный преобразователь, либо с тахогенератора электродвигателя (линия 2 на схеме), либо с любой точки схемы системы управления электродвигателем (линия 3 на схеме).

В основу процесса диагностики положим разложение заданной функции по ортогональной системе функций. Запишем неравенство Бесселя

$$\sum_{n=0}^N C^2 \|\varphi\|^2 \leq \|f\|^2, \quad (2.36)$$

и условие полноты ортогональной системы

$$\sum_{n=0}^{\infty} C^2 \|\varphi\|^2 = \|f\|^2. \quad (2.37)$$

Применительно к сигналам, являющимся функциями времени справедливо равенство  $s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \varphi_n(t)$ .

Тогда соотношение (2.37) приобретает энергетический смысл, т.е. при соответствующей замене  $f(x)$  на  $s(t)$  величину  $\|f\|^2$  можно записать

$$\|s\|^2 = \int_{t_1}^{t_2} s^2(t) dt = \mathfrak{E}, \quad (2.38)$$

и тогда

$$\mathfrak{E} = \sum_{n=0}^{\infty} C^2 \|\varphi\|^2. \quad (2.39)$$

Зададим на вход ЭМС простейшее колебание, определяемое выражением

$$S(t) = \begin{cases} U & \text{при } -\frac{\tau_n}{2} \leq t \leq \frac{\tau_n}{2} \\ 0 & \text{при } t < -\frac{\tau_n}{2} \text{ и } t > \frac{\tau_n}{2} \end{cases}, \quad (2.40)$$

и имеющее вид, представленный на рис.2.4.

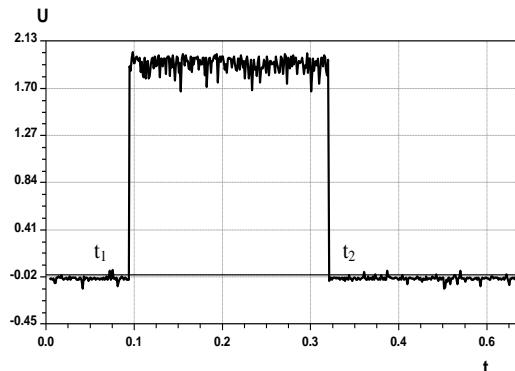


Рис.2.4. Сигнал, формируемый диагностическим комплексом

Выделив произвольный промежуток времени  $T$ , включающий в себя интервал времени  $t_1, t_2$  и представив заданное колебание в виде ряда Фурье, получим

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega t}, \quad 0 < t < T,$$

где  $\omega = 2\pi/T$ , а коэффициенты  $C_n$

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} s(t) e^{-in\omega t} dt. \quad (2.41)$$

Используя свойство взаимозаменяемости в преобразованиях Фурье, заменяя сумму на интеграл, найдем спектральную плотность:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i\omega t} dt = U \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-i\omega t} dt = \frac{2U}{\omega} \text{Sin} \frac{\omega\tau_n}{2}. \quad (2.42)$$

Выполнив преобразования в последней формуле, окончательно имеем

$$S(\omega) = U\tau_n \left[ \frac{\text{Sin}(\omega\tau_n/2)}{\omega\tau_n/2} \right]. \quad (2.43)$$

Заметим, что произведение  $U\tau_n$  равное площади импульса, определяет значение спектральной плотности импульса при  $\omega = 0$ , т. е.  $S_i(0) = U\tau_n$ . Этот вывод можно распространить и на импульс произвольной формы, такой, например, как представлен на рис.2.5. Этот сигнал формируется на выходе ЭМС и используется для дальнейших исследований.

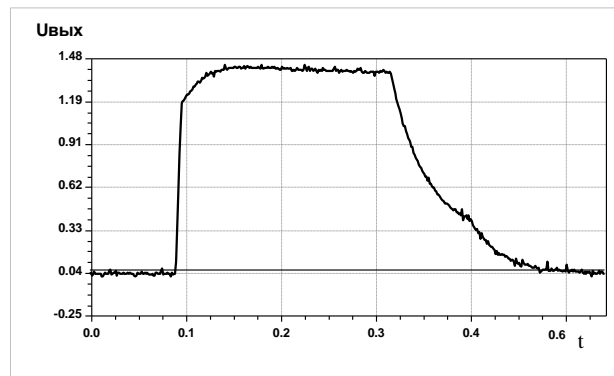


Рис.2.5. Выходной сигнал исследуемой системы

Действительно, из выражения (2.42) следует, что

$$S(0) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i0t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) dt$$

Правая часть этого выражения есть площадь импульса  $S(t)$ . Таким образом, выражение (2.43) можно записать в форме

$$S(\omega) = S(0) \frac{\text{Sin}(\omega\tau_n/2)}{\omega\tau_n/2} = S(0) \text{Sinc}(\omega\tau_n/2)$$

При удлинении (растягивании) импульса расстояние между нулями функции  $S(\omega)$  сокращается, что равносильно сужению спектра. Значение  $S(0)$  при этом возрастает. При укорочении (сжатии) импульса, наоборот, расстояние между нулями функции  $S(\omega)$  увеличивается (расширение спектра), а значение  $S(0)$  уменьшается. Учитывая это обстоятельство, будем задавать тестовый сигнал  $S(t)$  всегда с одними и теми же параметрами.

Рассмотрим распределение энергии в спектре импульса. Спектральная плотность энергии прямоугольного импульса (см. рис.2.6) равна:

$$S^2(\omega) = S^2(0) \frac{\text{Sin}^2(\omega\tau_n/2)}{(\omega\tau_n/2)^2} = S^2(0)[\text{Sinc}(\omega\tau_n/2)]^2. (2.44)$$

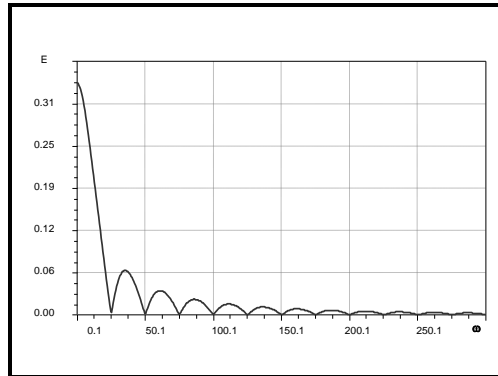


Рис.2.6. Спектральная плотность мощности

Используя равенство Парсеваля, вычислим энергию в заданной полосе частот.

$$\mathcal{E}_{\Delta\omega} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega} S^2(\omega) d\omega = U^2 \tau_n^2 \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega} \frac{\text{Sin}^2(\omega\tau_n/2)}{(\omega\tau_n/2)^2} d\omega = U^2 \tau_n \eta(\omega\tau_n/2),$$

где  $U^2 \tau_n$  есть полная энергия импульса, а функция  $\eta$  определяет относительную долю энергии в полосе частот от 0 до  $\omega$ .

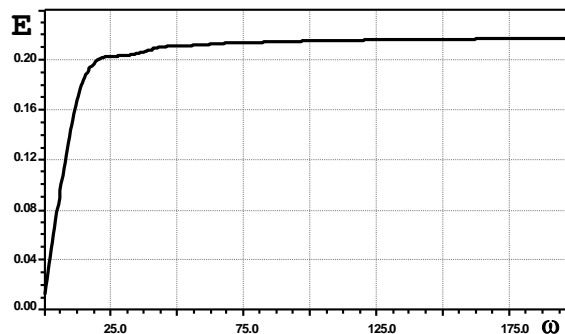


Рис.2.7. Энергия сигнала на выходе системы

Проведем сопоставительный анализ энергии выходного сигнала для чего возьмем в качестве объекта исследования типовые структуры регуляторов ЭП. Схемы регуляторов и их характеристики представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3.

Энергетические характеристики типовых регуляторов

| Схема                |  | Передаточная функция   | Выходной сигнал | Спектральная плотность мощности | Энергия |
|----------------------|--|--|-----------------|---------------------------------|---------|
| <p>П регулятор</p>   |  | $K_p = R_1 / R_0$  |                 |                                 |         |
| <p>ПИ регулятор</p>  |  | $W(p) = \frac{K_p(1 + T_i p)}{p T_i}$ $T_i = R_1 C_1, \quad K_p = R_1 / R_0$               |                 |                                 |         |
| <p>ПД1 регулятор</p> |  | $W(p) = K_p(1 + T_d p)$ $T_d = R_0 C_0, \quad K_p = R_1 / R_0$                             |                 |                                 |         |
| <p>ПД2 регулятор</p> |  | $W(p) = K_p(1 + T_d p)$ $T_d = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_1, \quad K_p = R_1 + R_2 / R_0$ |                 |                                 |         |

Энергетические характеристики типовых регуляторов

| Энергетические характеристики типовых регуляторов |   | Характеристики выходного сигнала |                                 |         |
|---|---|----------------------------------|---------------------------------|---------|
| Схема   | Передаточная функция  | Выходной сигнал                  | Спектральная плотность мощности | Энергия |
| <p>АП1 регулятор</p>                              | $W(p) = \frac{K_p T_i}{(1+p)}$ $T = R_0 C_1, \quad K_p = \frac{R_0}{R_1}$   |                                  |                                 |         |
| <p>АП2 регулятор</p>                              | $W(p) = \frac{K_p T_d}{(1+p)}$ $T = \frac{R_0 R_0}{R_0 + R_0}, \quad K_p = \frac{R_1}{R_0 + R_0}$   |                                  |                                 |         |
| <p>К31 регулятор</p>                              | $W(p) = \frac{\omega_p^2}{p^2 + \omega_p / q + \omega_p^2}$ $q = \frac{\sqrt{R_3 R_2 / R_1 C_4}}{1 + R_3 / R_1}$ $K_p = R_1 / R_1 + R_1^2$ $\omega_p^2 = 1 / R_1 R_3 C_2 C_4$ |                                  |                                 |         |
| <p>ПИД регулятор</p>                              | $W(p) = \frac{(1 + T_i p)(1 + T_d p)}{T_i}$ $T_i = R_0 C_1$ $T_d = (R_1 + R_2) C_1$ $T_d = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_2$   |                                  |                                 |         |

Для каждого из регуляторов проведем процедуру обучения по физически реализованной модели, изменяя заданным образом параметры системы и фиксируя каждый раз выходной сигнал. Для этих сигналов получим спектральную характеристику и рассчитаем численные значения энергии. Далее задача сводится к распознаванию состояния системы.

В силу представления информация в графическом виде воспользуемся метрическим методом]. Заметим, что в большинстве методов распознавания делается естественное предположение, что изображения объектов одного класса более близки друг другу, чем изображения разных классов. В качестве изображения объекта принимаем точку в пространстве признаков, мерой близости будем считать расстояние между точками и угол наклона.

Введем некоторые дополнения положив, что система удовлетворяет условиям полного соответствия по всем признакам, если хотя бы один из них лежит вне рассматриваемой области.

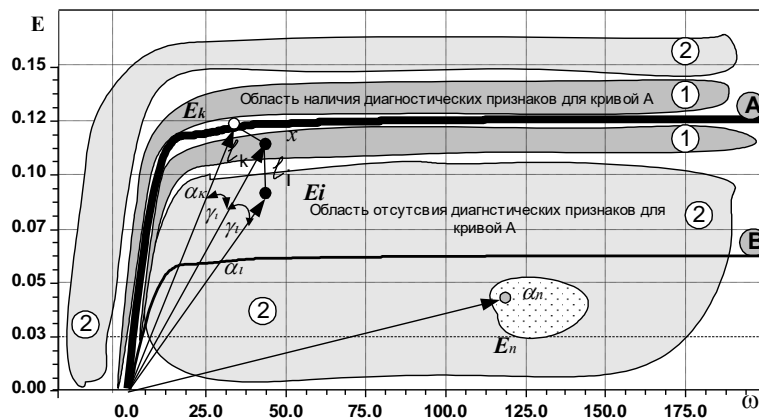


Рис. 2.8. Распознавание состояния системы

На рис. 2.8 представлены две кривые A и B. Первая из них получена в результате оценки состояния заведомо исправной системы (считается эталоном), а вторая — некоторая кривая, которая может быть принципиально получена в процессе диагностики. Относительно кривой A указаны области наличия (область 1) диагностических признаков и их отсутствия (область 2). Аналогичное представление областей справедливо и для кривой B.

Для опознания предъявленной кривой A необходимо, первоначально, установить принадлежность ее к диагностируемому объекту.

Используя принцип подобия, проведем идентификацию. Согласно теории подобия системы или процессы называются подобными, если они формально описываются одной и той же математической моделью, а их переменные величины связаны между собой коэффициентами подобия. Т.к. рассматриваемый регулятор не изменяет своей структуры, то утверждаем, что математическая модель определена. Подобие между величиной  $X_0$  в рассматриваемом физическом процессе и соответствующей величиной  $X_m$  описывающей некоторый процесс определяется коэффициентом  $C_x = X_0/X_m$ . В понятие некоторый процесс, вкладываем понятие изменчивости состояния диагностируемого объекта. На рис. 2.9 показаны подобные процессы  $U=f(t)$  при различных коэффициентах подобия.

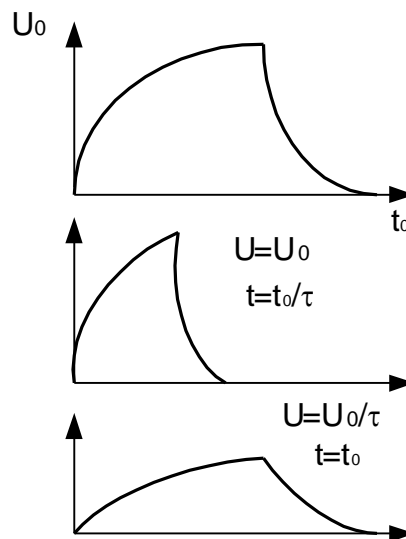


Рис. 2.9. Процессы с разными коэффициентами подобия

Для диагностируемого объекта такие изменения возможны либо при изменении амплитуды (уровня) входного сигнала, либо изменении коэффициента усиления или/и постоянной времени.

Таким образом, рассматриваемые процессы будут подобными, за исключением тех случаев, когда в системе возникает дефект, приводящий к изменениям физических связей и, как следствие их, нельзя описать подобными уравнениями. Подобие уравнений в строю очередь означает, что коэффициенты  $C_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , вкуче с параметрами  $X_1, \dots, X_n$  и  $Y_1, \dots, Y_n$  моделей  $y_i=C_i X_i$ , удовлетворяют условию

$$f(Y_1, \dots, Y_n) = f(C_1, \dots, C_n) \bullet f(X_1, \dots, X_n).$$

Для целевой функции исходной модели



$$z = z(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^m C_i \prod_{i=1}^n x_i^{a_{il}}, \quad (2.46)$$

при дополнительных условиях

$$z_k = \sum_{i=1}^m C_{ki} \prod_{i=1}^n x_i^{a_{il}} = 1, \quad (2.47)$$

где  $z$ - целевая функция,  $m$ - число слагаемых функции,  $n$ - число переменных,  $C_i, C_{ki}$ - коэффициенты подобия,  $x_i$ - переменные,  $a_{il}$ - показатели степени,  $K$ - число дополнительных условий,

$$C_{ik} = \begin{cases} C_{ik} & \text{когда } i\text{-е слагаемое в дополнительном условии} \\ 0 & \end{cases}$$

в противном случае, решим задачу минимизации  $z(x) \rightarrow \min_{x \in R^n}$ ,

гая  $z_k(x) \leq 1, k=1, \dots, K; C_i \geq 0, i=1, \dots, m; x_l > 0, l=1, \dots, n; -\infty < a_{il} < +\infty$ .

Соразмерность, определяющую веса оптимального варианта, определим через:

$$w_i = \frac{C_i}{z} \prod_{i=1}^n x_i^{a_{il}}. \quad (2.48)$$

Разрешив задачу установления подобия можно, выполнить распознавание, учитывая, что область признаков трансформируется, изменяясь пропорционально на величину соразмерности.

Вновь вернемся к оценке состояния системы.

В пространстве признаков объект характеризуется  $N$ - мерным вектором

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.49)$$

Информация о координатах пространства  $\mathbf{x}_j$  задается дискретными величинами. Тогда  $x_j$  представляет признак  $k_j$ , имеющий несколько диагностических разрядов. В ЭВМ эта информация представляется в бинарном коде и тогда координата  $\mathbf{x}$ , выражается двоичным числом, а величины  $\mathbf{x}_j$  в байте могут принимать значения:  $x_{j1} = 0, x_{j2} = 1$ .

Обычное расстояние между точками  $x$  и  $a$  пространства признаков

$$\ell(x, a) = |x - a| = \sqrt[1/2]{(x_1 - a_1)^2 + \dots + (x_N - a_N)^2} = \left\{ \sum_{j=1}^N |(x_j - a_j)^2| \right\}^{1/2}. \quad (2.50)$$

Равенство (2.50) устанавливает метрику евклидова пространства, причем основные метрические свойства этого пространства выражаются условиями:

$$\begin{aligned} \ell(a,b) &= \ell(b,a); \quad \ell(a,b) \geq 0; \quad \ell(a,a) = 0, \\ \ell(a,c) &\leq \ell(a,b) + \ell(b,c). \end{aligned} \quad (2.51)$$

Наиболее эффективно в качестве меры расстояния принимать квадрат расстояния

$$\ell^2(x,a) = \sum_{j=1}^N (x_j - a_j)^2, \quad (2.52)$$

и с учетом соразмерности

$$\ell^2(x,a) = \sum_{j=1}^N w_j (x_j - a_j)^2. \quad (2.53)$$

Величина  $\ell^2$  тесно связана с многомерным нормальным распределением, более проста для вычислений, а неравенство  $\ell_1 > \ell_2$  влечет за собой более сильное неравенство  $\ell_1^2 > \ell_2^2$ .

Для определения углового расстояния будем использовать соотношение

$$\text{Cos} \gamma = \frac{xa_i}{|x||a_i|}, \quad (2.54)$$

$$\text{где } xa_i = x_1 a_{i1} + \dots + x_N a_{iN} = \sum_{j=1}^N x_j a_{ij}.$$

Для определения расстояния примем более строгую форму, введя порог распознавания

$$L_k + \varepsilon > L_i, \quad (2.55)$$

$$\gamma_k + \varepsilon > \gamma_i,$$

где  $\varepsilon$  – порог распознавания ( $\varepsilon > 0$  и не более двух бит в самых младших разрядах), и введем оценку качества распознавания с использованием следующего соотношения:

$$\xi_i = \frac{1/L_i}{\sum_{s=1}^n 1/L_s}. \quad (2.56)$$

Чем ближе величина  $\xi$  к единице, тем достовернее диагноз. В случае полного несовпадения кодов диагноз считается также состоявшимся. Однако вывод единственный - диагностируемый объект не работоспособен.

*Алгоритм распознавания.* Пусть в пространстве признаков используется диагностическая мера расстояния  $L_i$  предъявлен для диа-

гностики объект  $x$ . Для отнесения объекта  $x$  к одному из  $n$  диагнозов определим расстояния  $L$  и  $\text{Cos}\gamma$  до точек  $a_1, a_2 \dots a_n$ , характеризующих объект в предшествующие моменты времени. Если мера расстояния между точками  $x, a$  минимальна  $L_i = \min$ ,  $\text{Cos}\gamma$  имеет максимальное значение, объект находится в заданном интервале значений  $|x - a_i| < \rho_i$ , то  $x \in E_k$  и тогда объект  $x$  относят к диагнозу  $Z$ .

На основании приведенных рассуждений выполним процесс диагностики, считая, что формат представления диагностической информации равен шестнадцати разрядам. Пусть представлен для опознания объект с кодом 1111110100010100. В качестве базовых величин значений  $a_i$  имеем  $a_1 = (1111111011100011)$ ,  $a_2 = (1111110100110100)$ ,  $a_3 = (1111111011011111)$ .

Проанализируем код объекта, выделив в нем разряды, несовпадающие с базовыми кодами. Для этого воспользуемся логической операцией "исключающее ИЛИ".

Маскирование разрядов дает нам следующие результаты. В первом случае не совпадают 9 разрядов, во втором - 1, в третьем - 7. Соответствующие значения параметра, вычисленные по формуле (2.56)  $\xi_1 = 0.01$ ,  $\xi_2 = 0.97$ ,  $\xi_3 = 0.02$ . Отсюда следует, что  $a_2$  ближе к диагностируемой области и можно оценить на сколько.

*Алгоритм реализации выводов.* Механизм реализации выводов сформулируем в виде следующего выражения

$$\begin{aligned}
 & \forall (x \in E(a_i \& \gamma_i \& \rho_i)) (\exists z(x)) F(L, \text{Cos}\gamma, \rho) \& \\
 & (L \in \{\min L\} \& \text{Cos}\gamma \in \{\max \text{Cos}\gamma\} \& (x - l) < \rho) \\
 & \mapsto (x \in E) = Z(\text{система работаспособна}) \\
 & \forall (x \in E(a_i \& \gamma_i \& \rho_i)) (\exists z(x)) F(L, \text{Cos}\gamma, \rho) \& \\
 & ((L \notin \{\min L\} \& \text{Cos}\gamma \in \{\max \text{Cos}\gamma\} \& (x - l) < \rho) \vee \\
 & (L \in \{\min L\} \& \text{Cos}\gamma \notin \{\max \text{Cos}\gamma\} \& (x - l) < \rho) \vee \\
 & (L \in \{\min L\} \& \text{Cos}\gamma \in \{\max \text{Cos}\gamma\} \& (x - l) > \rho)) \\
 & \mapsto (x \notin E) = \bar{Z}(\text{система неработаспособна})
 \end{aligned}
 \tag{2.57}$$

Повышение достоверности процесса диагностики заключается в расширении числа диагностических признаков, используемых для

дальнейшего анализа. Поэтому, в задаче установления подобия будем использовать, кроме энергии, форму выходного сигнала и его спектральную характеристику. Кроме того, при анализе энергии сигнала будем рассматривать не только всю полосу частот, а еще и энергию отдельных составляющих в интервалах. Практически, рассматривая, таким образом, весь процесс, будем говорить о воспроизводимости энергии в заданном диапазоне частот, что позволит выполнить диагностику, оценив отклонение в исследуемом процессе в рамках ограниченных интервалов, образующих весь процесс.

### **2.3. Диагностика электромеханических систем в пространстве состояний**

Процесс движения в электромеханических системах (ЭМС) основан на измерении координат, образующих пространство переменных состояния, на основе информации о которых осуществляется формирование законов движения и реализуется управление. Эта информация может быть использована не только для целей управления, но и для диагностики, используемой при настройке приводов, построения моделей, в системах адаптивного управления, отыскания неисправностей и многих других случаях. Рассмотрим процессы, сопровождающие процедуру получения информации о состоянии ЭМС. Заметим, что при выполнении процессов диагностики, на работающем оборудовании, существует ряд ограничений, связанных с невозможностью прямого измерения всех переменных состояния. Действительно, если рассматривать ЭМС станка или промышленного робота, то прямому измерению доступны лишь положение, скорость и ток, т.к. в ЭМС по этим координатам ведется управление и имеются устройства измерения и преобразования сигналов. Для механической части привода, в лучшем случае, можно получить только информацию о перемещении, что явно недостаточно для анализа. Тем не менее, для качественного управления и настройки электропривода необходимы знания практически обо всех переменных, таких как постоянные времени, коэффициенты усиления, значения ошибок, параметрах электромеханического преобразователя и т.п. При этом процесс диагностики можно выполнять на оборудовании, специально подготовленном для этих целей.

В практике эксплуатации ЭМС используется метод получения информации путем непосредственного измерения в контрольных точках соответствующих величин. Затем, с использованием инструкции по эксплуатации производят настройку или ремонт. Эта процедура носит длительный характер и не всегда приводит к желаемым результатам. Альтернативой этому является диагностика в пространстве состояний, выполняемая с использованием специальных микропроцессорных систем.

Для выполнения процесса диагностики с ограничениями на число измеряемых переменных целесообразно использовать единственный сигнал, который несет комплексную оценку состояния ЭМС. В этом случае объем измерительной информации минимален, а алгоритм достаточно прост. Этим параметром, в принятой концепции, является переходный процесс по скорости, а стимулирующим сигналом на входе электропривода является скачок напряжения. Действительно, если использовать переходный процесс как критерий оценки состояния ЭМС, то для него необходимо сформировать набор параметров, по которым производится диагностика. Рассмотрим это на примере рис.2.10.

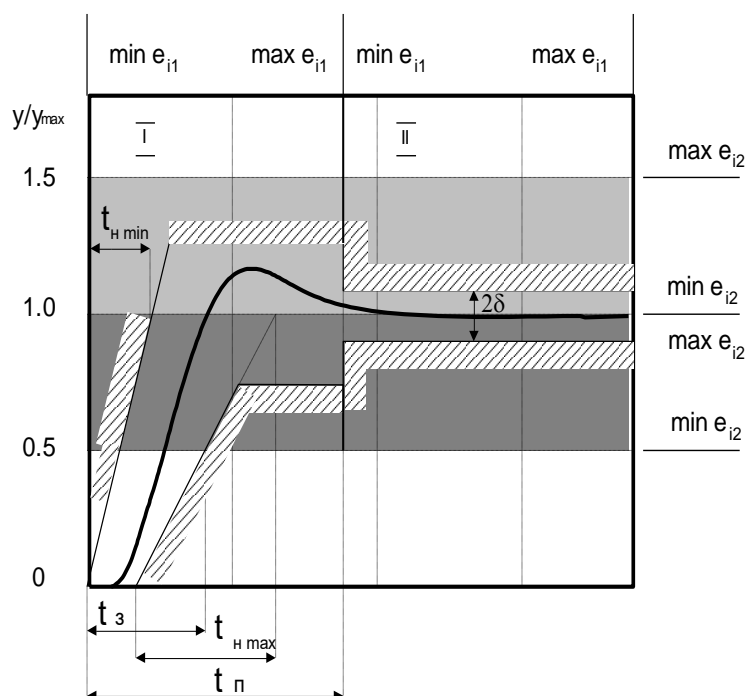


Рис.2.10. К оценке состояния системы по переходной характеристике

Переходный процесс характеризуется следующим набором характеристик: величиной перерегулирования, длительностью переходного процесса, допустимым числом колебаний, временем запаздывания, временем нарастания.

Таким образом, диагностируемая система считается исправной, работоспособной и отвечает заданным параметрам, если кривая переходного процесса находится в ограниченной области. Это представлено на рис.2.10 заштрихованной областью. Информационная емкость сигнала велика, однако установить по нему причину неработоспособного состояния, если кривая переходного процесса выходит за пределы зоны, весьма сложно. Доопределить состояние системы можно, если получать информацию обо всех переменных, с последующим сопоставлением их с видом выходного сигнала. Такой процесс предполагает использование точных инструментальных средств и высокоэффективных алгоритмов распознавания ситуаций. Естественно, что целесообразно использовать алгоритмы, имеющие меньшие затраты времени на проведение диагностики, особенно для систем работающих в реальном времени.

Прежде чем сформировать требования к аппаратным средствам и алгоритму диагностики, необходимо провести анализ объекта с целью определения диагностических параметров. Рассмотрим структурную схему ЭМС, представленную электроприводом постоянного тока и механической системой (рис.2.11а). Электропривод выполнен по системе подчиненного регулирования с контуром скорости и тока.

Силовой преобразователь построен на тиристорах с питанием от трехфазной сети, а электромеханический преобразователь представляет собой высоко моментный двигатель (ВМД) постоянного тока. Механическая система состоит из стола, приводимого в движение ВМД через механическую передачу, представленную парой винт-гайка и перемещаемого по направляющим на роликах. ВМД связан со столом через зубчато-ременную передачу.

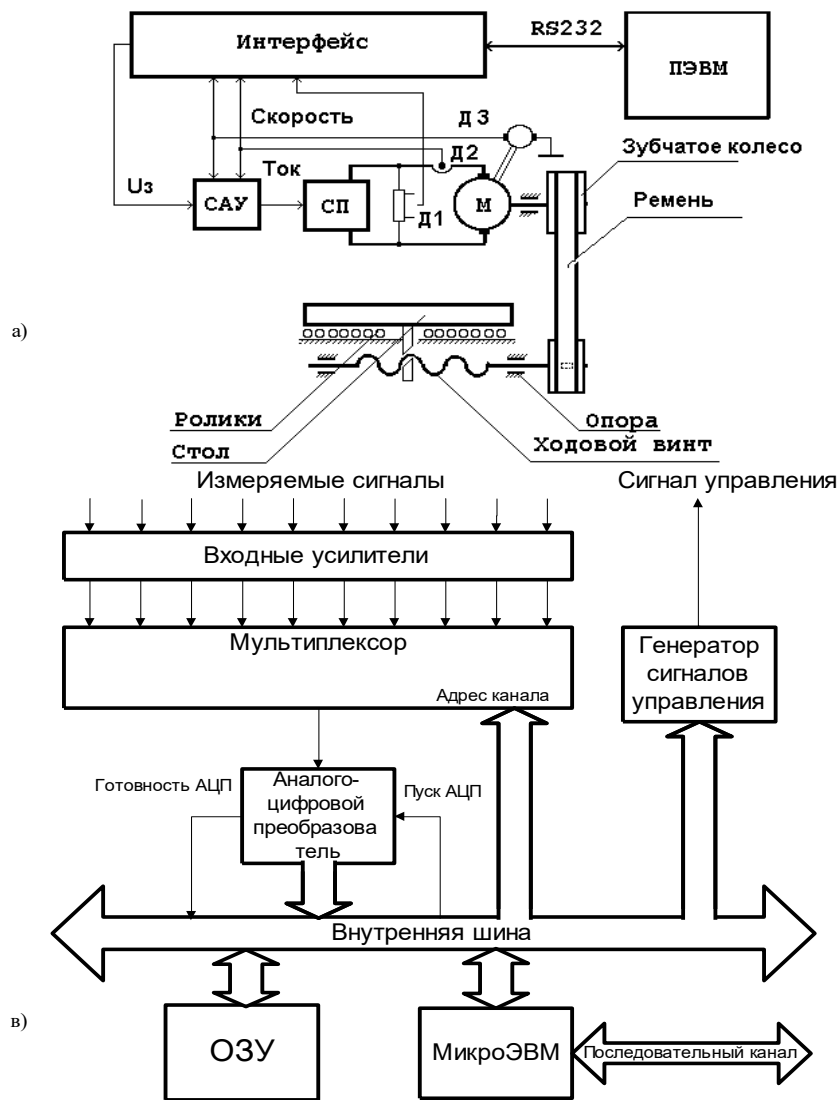


Рис.2.11. Структурная схема диагностической станции

Представим диагностируемую систему математической моделью:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu};$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx},$$

где  $\mathbf{A} - (n \times n)$  - матрица коэффициентов;  $\mathbf{B} - (n \times m)$  - матрица управления;  $\mathbf{C} - (r \times n)$  - матрица выходного сигнала.

Состояние системы в любой момент времени может быть охарактеризовано положением в  $n$  - мерном пространстве состояний изображающей точки, координатами которой, являются выходные переменные элементарных звеньев системы. Такому представлению соответствует запись дифференциальных уравнений в нормальной форме.

Выберем, исходя из реальных условий, контрольные точки в которых можно производить измерения и, которые дают наибольшее количество информации с позиции оценки состояния электропривода. Этими точками являются: выходное напряжение регулятора скорости  $x_1$ , регулятора тока  $x_2$ , тиристорного преобразователя  $x_3$ , ток двигателя  $x_4$ , скорость вращения ротора электродвигателя  $x_5$ , промежуточного  $x_6$  и выходного звеньев механической системы  $x_7$ , а также упругие моменты  $x_8$  и  $x_9$ . Для нее запишем уравнения всех элементов в виде:

$$px_1 = A_{15} x_5 + B_{11} u \dot{K}$$

$$px_2 = A_{21} x_1 + A_{24} x_4 + A_{25} x_5 + B_{21} u \dot{K}$$

$$px_3 = A_{31} x_1 + A_{32} x_2 + A_{33} x_3 + A_{34} x_4 + A_{35} x_5 + B_{31} u \dot{K}$$

$$px_4 = A_{43} x_3 + A_{44} x_4 + A_{45} x_5$$

$$px_5 = A_{54} x_4 + A_{55} x_5 + A_{58} x_8$$

$$px_6 = A_{66} x_6 + A_{68} x_8 + A_{69} x_9$$

$$px_7 = A_{77} x_7 + A_{79} x_9 + B_{72} M_c$$

$$px_8 = A_{84} x_4 + A_{85} x_5 + A_{86} x_6 + A_{88} x_8 + A_{89} x_9$$

$$px_9 = A_{96} x_6 + A_{97} x_7 + A_{98} x_8 + A_{99} x_9 + B_{92} M_c$$

Коэффициенты, входящие в эти уравнения, находят по формулам:



$$\begin{aligned}
A_{15} &= -\varepsilon_{m,,} \varepsilon_{,,} / T_{m,,} & A_{44} &= -r_{III} / L_{bt} \\
A_{21} &= \varepsilon_{mT} / T_{mT} & A_{45} &= --- / L_{bt} \\
A_{24} &= -\varepsilon_{mT} \varepsilon_{T} / T_{mT} & A_{54} &= -1 / J_1 \\
A_{25} &= -\varepsilon_{m,,} \varepsilon_{,,} \varepsilon_{mT} / T_{mT} & A_{55} &= -\beta_1 / J_1 \\
A_{31} &= \varepsilon_{mT} \varepsilon_n / \tau & A_{58} &= -A_{54} \\
A_{32} &= \varepsilon_n \tau & A_{66} &= -\beta_2 / J_2 \\
A_{32} &= \varepsilon_n \tau & A_{66} &= -\beta_2 / J_2 \\
A_{33} &= -1 / \tau & A_{68} &= -1 / J_2 \\
A_{34} &= -\varepsilon_{mT} \varepsilon_T \varepsilon_n / \tau & A_{69} &= -A_{68} \\
A_{35} &= -\varepsilon_{m,,} \varepsilon_{,,} \varepsilon_{mT} / \tau & A_{77} &= -\beta_3 / J_3 \\
A_{43} &= 1 / L_{bt} & A_{79} &= -1 / J_3 \\
A_{84} &= \beta_{12} \beta_1 / J_1 & B_{11} &= \varepsilon_{m,,} / T_{m,,} \\
A_{85} &= C_{12} - \beta_{12} \beta_1 / J_1 & B_{21} &= \varepsilon_{m,,} \varepsilon_{,,} / T_{m,,} \\
A_{86} &= -C_{12} - \beta_{12} \beta_2 / J_2 & B_{31} &= \varepsilon_{m,,} \varepsilon_{mT} \varepsilon_n / \tau \\
A_{88} &= -\beta_{12} (1/J_2 + 1/J_3) & B_{72} &= -1 / J_3 \\
A_{89} &= \beta_{12} / J_2 & B_{92} &= -\beta_{23} / J_3 \\
\\
A_{96} &= C_{23} - \beta_{23} \beta_2 / J_2 \\
A_{97} &= -C_{23} - \beta_{23} \beta_2 / J_2 \\
A_{98} &= \beta_{23} / J_2 \\
A_{99} &= -\beta_{23} (1/J_2 + 1/J_3)
\end{aligned}$$

Вектор переменных состояния представляет собой вектор столбец, состоящий из девяти строк  $[x_1 \dots x_9]^T$ . Каждая из этих переменных доступна непосредственному измерению, а местоположение их указано на структурной схеме ЭМС. Возвращаясь вновь к описанию в виде (2.58), имеем: квадратная матрица  $\mathbf{A}$  имеет размерность 9x9:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & A_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & 0 & 0 & A_{24} & A_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{43} & A_{44} & A_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{54} & A_{55} & 0 & 0 & A_{58} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} & 0 & A_{68} & A_{69} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{77} & 0 & A_{79} \\ 0 & 0 & 0 & A_{84} & A_{85} & A_{86} & 0 & A_{88} & A_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{96} & A_{97} & A_{98} & A_{99} \end{bmatrix}. \quad (2.62)$$

Двухстолбцовая матрица внешних воздействий имеет размерность  $9 \times 2$ :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{21} & B_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{72} & 0 & B_{92} \end{bmatrix}^T. \quad (2.63)$$

Последний вектор внешних воздействий представлен только двумя элементами:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_3 \\ M_c \end{bmatrix}. \quad (2.64)$$

Входящая в уравнение (2.59) матрица  $C$  представляется вектором строкой и для анализа выходной переменной  $x_5$  имеет следующий вид:  $C = [000010000]$

Составим структурную схему, соответствующую представленному описанию (рис.2.12) и проведем ее исследования. Запишем реализации всех составляющих вектора  $x$ , которые представим в виде графиков. Эту процедуру проделаем для граничных значений, которые можно определить, используя аппарат функций чувствительности. Для этого выполним преобразования над (2.58). Будем считать, что от параметров  $\alpha_1, \dots, \alpha_q$  зависят все коэффициенты  $A_i$ . При этом для функций чувствительности имеем:

$$f_k(t) = \frac{\partial x}{\partial \alpha_k} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\partial x}{\partial A_i} \frac{\partial A_i}{\partial \alpha_k}.$$

Сомножители  $\partial x / \partial A_i$  определяются видом уравнения (2.65), в то время как сомножители  $\partial A_i / \partial \alpha_k$  зависят от коэффициентов  $A_i$ . Если для указанных сомножителей ввести обозначения

$$a_{ik} = \frac{\partial A_i}{\partial \alpha_k}, \quad b_i(t) = \frac{\partial x}{\partial A_i}, \quad \text{то выражение (2.65) можно записать в виде}$$

$$f_k(t) = \sum_{i=0}^{n-1} a_{ik} b_i(t).$$

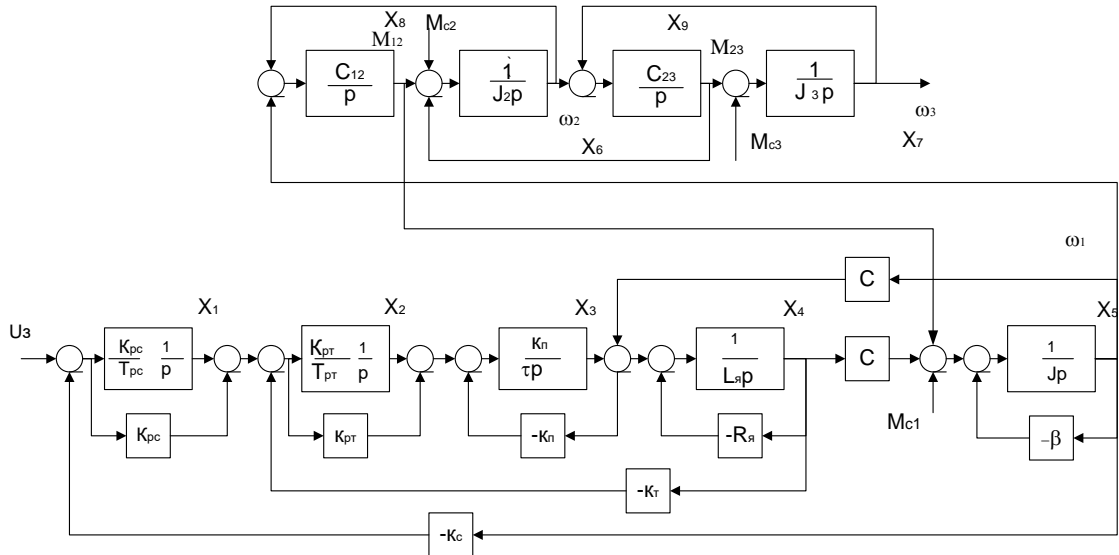


Рис.2.12. Структурная схема системы в пространстве состояний

Значения коэффициентов  $A_i$  определены и теперь необходимо отыскать функции  $b_i(t)$ , которые характеризуют чувствительность выходной переменной к вариациям коэффициентов.

Продифференцировав уравнение (2.58) по коэффициентам  $A_i$ , получим уравнения чувствительности для определения функций  $b_i(t)$ :

$$(p^n + A_n p^{n-1} + \dots + A_1 p + A_0) b_i = -x^{(i)}$$

$$b_i^{(k)}(0) = 0 \quad (2.67)$$

После вычисления функции  $b_i(t)$  и расчета коэффициентов  $a_{ik}$ , вычисляют по формуле (2.66) функции чувствительности для каждого из параметров.

Рассмотрим в качестве примера электромеханический преобразователь и получим для него модель чувствительности к частоте сво-

бодных колебаний и коэффициенту демпфирования. Запишем уравнение ЭМП в следующем виде:

$$\frac{d^2 x_5}{dt^2} + A_1 \frac{dx_5}{dt} + A_0 x_5 = kU,$$

где  $A_1 = 2\xi \omega$ ,  $A_0 = \omega_0^2$ ,  $\xi$  - коэффициент демпфирования,  $\omega_0$  - частота свободных колебаний.

Построим модель чувствительности для получения функций

$$f_\xi(t) = \frac{\partial x}{\partial \xi}, \quad f_{\omega_0}(t) = \frac{\partial x}{\partial \omega_0}.$$

Запишем согласно (2.66)

$$f_{\omega_0}(t) = a_0^{\omega_0} b_0(t) + a_1^{\omega_0} b_1(t),$$

$$f_\xi(t) = a_0^\xi b_0(t) + a_1^\xi b_1(t),$$

где  $A_1^\xi = 2\omega_0$ ,  $A_0^\xi = 0$ ,  $A_1^{\omega_0} = 2\xi$ ,  $A_0^{\omega_0} = 2\omega_0$ ,

$$b_1(t) = \frac{\partial x_5}{\partial a_1}, \quad b_0(t) = \frac{\partial x_5}{\partial a_0}.$$

Представим алгоритм решения этих уравнений в виде структурной схемы (рис.2.13.).

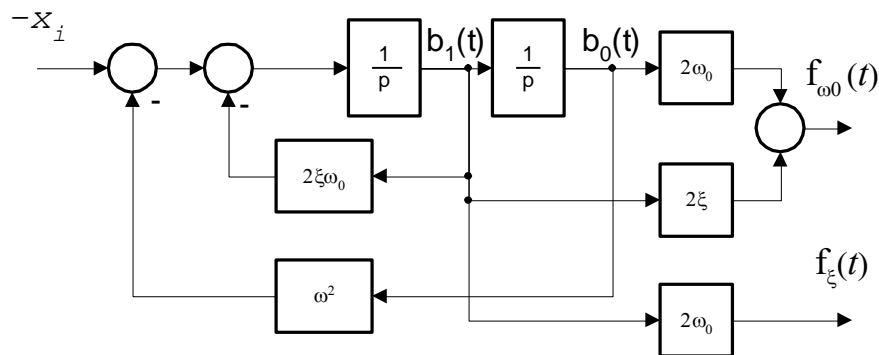


Рис.2.13. Модель чувствительности для электродвигателя постоянного тока

Полученные в результате экспериментов функции чувствительности представлены на рис.2.14.

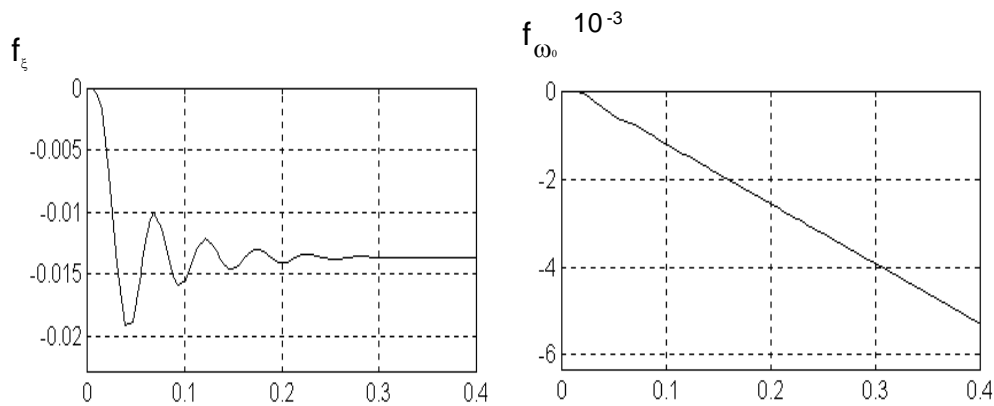


Рис. 2.14. Функции чувствительности

Подобным образом определяются функции чувствительности для полного вектора состояния. В алгоритме эти функции выполняет блок преобразования информации. Влияние каждого из параметров, вызывающих отклонение от истинных значений, вычисляется по соотношению:

$$\Delta Y = f_k(t) \alpha_j.$$

Графики изменения вектора состояния для граничных значений параметров приведены на рис. 2.15.

Рассмотрим реализацию диагностической системы. В принятой задаче система диагностики должна иметь в своем составе устройство ввода информации о скорости, снимаемой с тахогенератора электродвигателя. Для выдачи управляющего сигнала необходим функциональный генератор, способный формировать скачок напряжения в произвольный момент времени с различной величиной амплитуды. Это соответствует методу тестовых испытаний.

Возможно и использование сигналов, которые формируются в самой системе в процессе работы, что выполняется при функциональном диагностировании. Исследование системы в пространстве состояния предполагает, что измерению подлежат все переменные. В нашем случае их девять.

Следовательно, устройство ввода информации должно иметь десять входов (включая и сигнал на входе исследуемой системы). Тогда структура микропроцессорного устройства диагностики имеет вид представленный на рис.2.11в. В состав комплекса входят: входные усилители, мультиплексор, аналого-цифровой преобразователь, гене-

ратор сигналов управления, микро-ЭВМ и оперативное запоминающее устройство. Комплекс работает следующим образом. Сигналы, снимаемые с исследуемой системы, поступают на входы масштабных усилителей. Их наличие определяется различной амплитудой напряжений в контрольных точках. Величины сигналов колеблются от единиц милливольт (сигналы ошибок) до десятков вольт (напряжение на двигателе). Однако, следует заметить, что максимальный входной сигнал на привод не превышает стандартной величины 10 вольт, регламентируемого ГОСТ(ом). За каждым сигналом закреплен определенный вход, задаваемый адресом канала в мультиплексоре.

Сигнал с выбранного входа поступает на аналого-цифровой (АЦП) преобразователь, где преобразуется в цифровой код. Разрядность выходного кода АЦП определяется точностью преобразования информации. Практически во всех случаях удовлетворительным считается двенадцати разрядный код.

Процесс преобразования информации сопровождается сигналами Готовность АЦП и Пуск АЦП. По первому из них производится запись преобразованной информации в оперативное запоминающее устройство, по второму осуществляется запуск АЦП на новый цикл преобразования. Этот же сигнал используется и для переключения адреса канала участвующего в измерении.

Для управления работой ЭМС используется генератор сигналов, который формирует сигнал ступенчатой формы. Этот сигнал инициирует работу всей системы. Одновременно с вводом информации происходит диагностирование состояния исследуемого объекта.

Анализ состояния ЭМС будем выполнять по следующему алгоритму. Пусть в первоначальный момент времени измерялся единственный сигнал на выходе, характеризующий состояние системы  $S_i \in (y | t, t_K, t_*, \delta, \sigma)$ . После ввода и предварительной обработки сигнала, производится анализ системы, для которой характерны два возможных состояния  $v(s_i) \in \{\varepsilon\}$ , система исправна и  $v(s_i) \in \{\varepsilon^* \subset (\varepsilon^+, \varepsilon^-)\}$ , система работоспособна, но не отвечает техническим характеристикам.

Стратегия принятия решения в этом случае описывается следующим выражением:

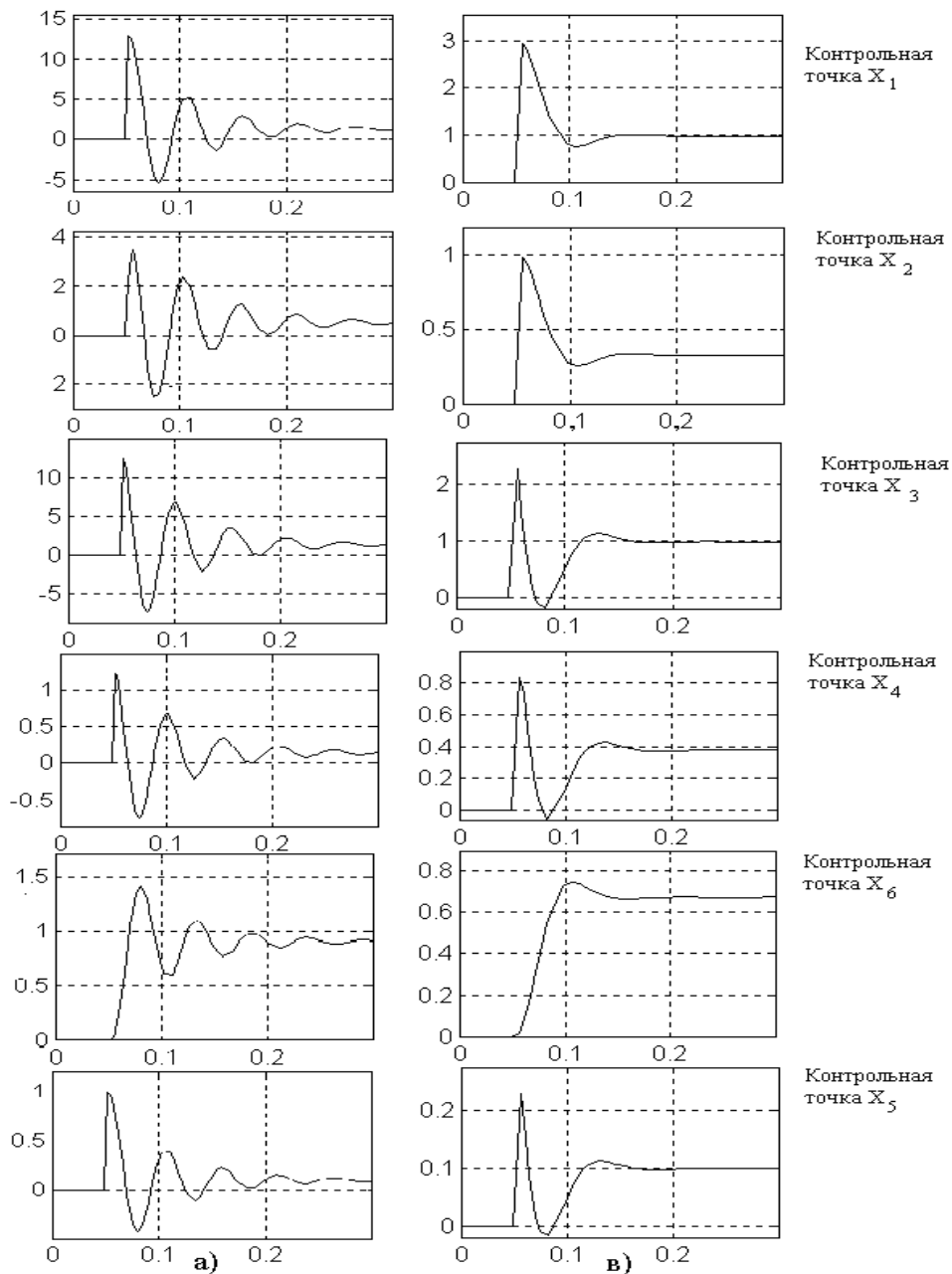


Рис.2.15. Графики напряжений в контрольных точках:  
а) при  $K_{pc}=13$ ,  $T=0.0027$ , в) при  $K_{pc}=3$ ,  $T=0.0027$

$$\begin{aligned}
& \forall (y \in Y) (\exists y_i) (P(y_i) \wedge S(y_i)) \rightarrow \\
& ((\exists s) P_i(S) \mapsto Y \supset \mathcal{E} \wedge (\neg \text{ЦЦ-Ь} \text{ " } \text{Ц} \cdot \text{p} \in \% \text{'e}) \wedge MUX = 0) \vee \\
& ((\exists s) (P_j(S) \mapsto Y \supset \mathcal{E}^* \wedge (\neg \text{ЦЦ-Ь} \text{ " } \text{ЬЦ} \cdot \text{p} \in \% \text{'e}) \wedge MUX = 1)
\end{aligned}$$

В этом выражении  $S$  есть множество всех возможных состояний ЭМС, для которых существует множество алгоритмов проверок  $P, \mathcal{E}$  -

область допустимых значений,  $\varepsilon^*$  - область неисправного состояния. Этому случаю соответствует фрагмент алгоритма, представленный в виде структуры на рис.2.16. (выделен светлым фоном).

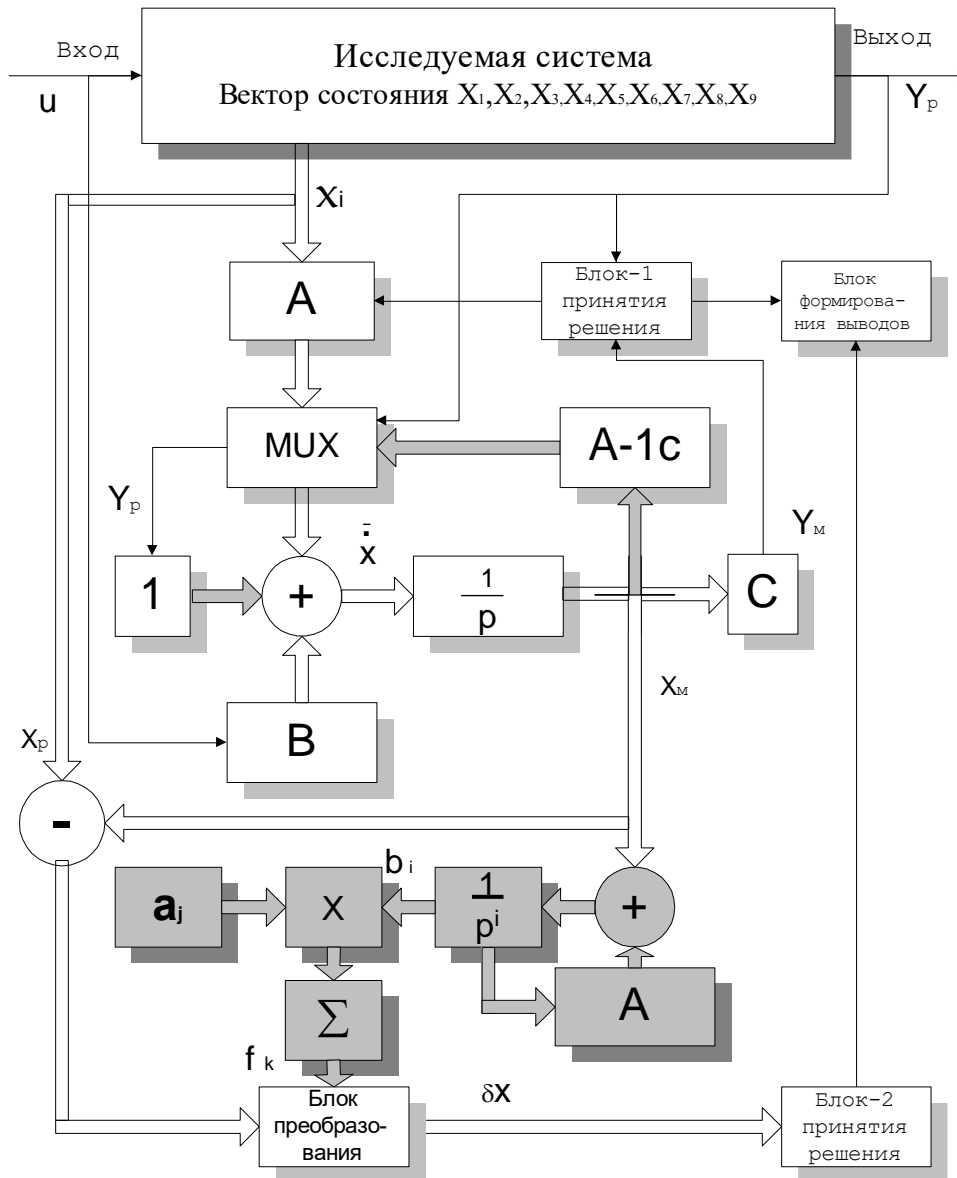


Рис.2.16. Структура программного обеспечения при решении задач диагностики в пространстве состояний

Выбор наиболее правильного решения будем производить на основе критерия

$$E_0 = \{E_{i_0} | E_{i_0} \in E \wedge e_{i_0} = \max_i e_i\},$$



для которого  $E_i$  - множество вариантов выбора,  $e_i$  - оценка, характеризующая параметр.

Разобьем пространство состояний выходной координаты на две области, область  $\mathcal{E}^+, \mathcal{E}$  (верхняя часть рис.2.16, темный цвет) и  $\mathcal{E}^-, \mathcal{E}$  (нижняя часть рис.2.16, светлый цвет) и две подобласти I и II. Для каждой из них запишем матрицу решений  $\|e_{ir}\|$  в виде табл. 2.4.

Чтобы прийти к однозначному варианту решения  $E_i$ , которому соответствуют различные условия  $S_j$ , необходимо ввести оценочную функцию.

Для областей I и II,  $\mathcal{E}^+, \mathcal{E}$  в качестве оценочной функции будем использовать выражение

$$\max_i e_{ir} = \max_i (\max_i e_{ij}), \quad (2.71)$$

а для областей I и II,  $\mathcal{E}^-, \mathcal{E}$ , оценочную функцию

$$\min_i e_{ir} = \min_i \max_i (\max_i e_{ij} - e_{ij}).$$

Таблица 2.4

Матрица решений

|       | $S_1$    | $S_2$    | $S_3$    | ... | $S_j$    | ... | $S_n$    |
|-------|----------|----------|----------|-----|----------|-----|----------|
| $E_1$ | $e_{11}$ | $e_{12}$ | $e_{13}$ |     | $e_{1j}$ |     | $e_{1n}$ |
| $E_2$ | $e_{21}$ | $e_{22}$ | $e_{23}$ |     | $e_{2j}$ |     | $e_{2n}$ |
| $E_3$ | $e_{31}$ | $e_{32}$ | $e_{33}$ |     | $e_{3j}$ |     | $e_{3n}$ |
| $E_i$ | $e_{i1}$ | $e_{i2}$ | $e_{i3}$ |     | $e_{ij}$ |     | $e_{in}$ |
| ...   |          |          |          |     |          |     |          |
| $E_m$ | $e_{m1}$ | $e_{m2}$ | $e_{m3}$ |     | $e_{mj}$ |     | $e_{mn}$ |

Матрица решений

Величины  $\|e_{ir}\|$  принимают конкретные нормированные значения из интервала 0.5-1.5 и определяются в процессе измерения выходной координаты. Этот алгоритм выполняется в блоке принятия решений с номером 1.

После анализа выполненного по (2.69) - (2.72) производится анализ всех измеряемых переменных  $X_i$ . Анализ всех переменных состояния предшествует получение сигнала на переключение мультиплексора MUX, после чего выполняется оценка вектора состояния по алгоритму, представленному на рис.2.16. пунктирными линиями. В этом случае решение задачи сводится к отысканию  $\hat{x}$  по следующим соотношениям [80]:

$$\hat{x} = \mathbf{A}\hat{x} + \mathbf{1}(y - \mathbf{c}\hat{x}) + \mathbf{b}u,$$

$$\hat{x} = (\mathbf{A} - \mathbf{1c})\hat{x} + \mathbf{1}y + \mathbf{b}u$$

Полученные по (2.70) значения  $\hat{x}$ , и значения  $x$ , полученные в эксперименте, сравниваются и для каждого из них определяется величина отклонения, т.е.  $\varepsilon_i = x_p - x_m$ . Одновременно по (2.65), (2.66), (2.67), (2.68) вычисляют параметры дополнительного движения, а затем оценивается  $Y$ . Алгоритм принятия решения в этом случае описывается следующим выражением:

$$\forall (x \in X) \exists (x_i (P(x_i) \wedge S(x_i))) \&$$

$$(\exists s_i \bigcup_{i=1}^m (P_i(S)) \mapsto X \subset \mathcal{E}_i = (\text{система исправна})) \vee$$

$$(\exists s_i \bigcup_{i=1}^n (P_i(S)) \mapsto X \subset \mathcal{E}_i^* = (\text{система неисправна по } x_i))$$

Также как и в первом случае, имеется матрица решений, для каждой из переменных пространства состояний и используются оценочные функции вида (2.71.) и (2.72.). Эти действия выполняются блоком 2 принятия решений. В результате выполненных действий возможен исход, при котором диагностическая система выведет три возможных сообщения: система находится в исправном состоянии и функционирует в соответствии с техническими требованиями, на основании информации, сформированной по единственному вектору; выведет аналогичное сообщение с указанием неисправного узла на основании информации о полном векторе и сообщит о своей неисправности, в том случае, если результаты проверок не соответствуют

предыдущим двум выводам. Эти функции выполняет блок формирования выводов.

Таким образом, использование предложенного алгоритма дает возможность определить реальное состояние ЭМС по выходному сигналу, а при возникновении неисправности, на основе информации о полном векторе состояния выявить неисправный узел.

#### **2.4. Диагностика электромеханических систем с использованием логических моделей на основе сетей Петри**

В практических ситуациях при контроле работоспособности ЭМС необходимо оценивать множество состояний и параметров. При этом их изменение можно характеризовать конкретными значениями, более или менее известными и, поэтому, требующими либо уточнения, либо статистического оценивания.

Действительно, в нашем случае, для определения состояния ЭМС по всем переменным необходимо оценить  $S_i = \prod_{j=1}^J V_j$  состояний.

Такое количество параметров можно оценивать только в отрыве от реального процесса, то есть на оборудовании, специально подготовленном к длительным испытаниям. С другой стороны влияние отдельных параметров малозначительно и не всегда определяет окончательный результат. Для упрощения анализа ими можно на первых этапах пренебрегать. В этом случае, для уменьшения неопределенности число переменных или состояний уменьшается до величины, при которой процесс диагностики может проводиться в реальном времени.

Однако в ряде случаев необходимо получать дополнительную информацию о промежуточных параметрах составляющих ЭМС элементов. Такая постановка вопроса, в свою очередь, требует выбора параметра, который будет наилучшим образом соответствовать принятой концепции диагностики.

При выходе из строя одного из элементов ЭМС, получение комплексной оценки затруднительно или не возможно. В этом случае необходимо производить диагностику поэлементно, при условии, что диагностируемый объект может функционировать.

Будем также считать, что возможны такие состояния при функционировании ЭМС, когда те или иные параметры выходят за пределы допусков. В этом случае ЭМС находится в работоспособном состоянии, но не обеспечивает заданных характеристик. Такую ситуацию будем называть в дальнейшем параметрическим отказом.

При параметрическом отказе получение обобщенной выходной характеристики возможно, а, следовательно, возможен и анализ состояния ЭМС. В этом случае, для избежания многочисленных экспериментов получение информации о состоянии ЭМС целесообразно вести по интегральной характеристике. При этом требуется учитывать, что изменение, например, времени переходного процесса может определяться изменением различных параметров схемы (см.рис.2.17):

- изменением коэффициента преобразования датчика скорости и его состояний времени (S11);
- изменением питающего напряжения (S1), которое влечет за собой снижение напряжения на якоре ЭД;
- уменьшение (увеличение) длительности импульса (S2);
- изменением настройки регулятора (S4) и т.д.

Учитывая приведенный пример приходится изменять стратегию диагностики, переходя к анализу состояния при максимально возможном объеме получаемой информации. Причем важно установить источники происхождения дефекта, оценить численное значение отклонения и по возможности установить причину произошедшего.

Для анализа работы ЭМС в процессе эксплуатации представим ее с использованием формализма сетей Петри в виде графа функциональной диагностической модели.

В качестве объекта для построения диагностической модели воспользуемся схемой серийно выпускаемого электропривода ЭПУ1-2П.

Представим ЭМС в виде графа причинно-следственных связей основываясь на описании физических процессов.

Построим граф, применяя обозначения, используемые для описания сетей Петри. Напомним, что сетью Петри является четверка  $S=(P,T,I,O)$ .  $P=\{P_1,P_2,\dots,P_n\}$  конечное множество позиций,  $n \geq 0$ .  $T=\{t_1,t_2,\dots,t_m\}$  - конечное множество переходов,  $m \geq 0$ . Множество позиций и множество переходов не пересекаются,  $P \cap T = \emptyset$ .  $I: T \rightarrow P^\infty$  является входной функцией  $O: T \rightarrow P^\infty$  выходная функция -

отображение из переходов в комплекты. Графическое изображение позиций - кружок, а переходов - планка.  $G=(V,A)$  - граф сети Петри, эквивалентный структуре сети Петри для которой  $V = U \cup T$  и  $A$  комплект дуг такой, что для всех  $p_i \in P$  и  $t_j \in T$

$$\begin{aligned} \#((p_i, t_j), A) &= \#(p_i, I(t_j)), \\ \#((t_j, p_i), A) &= \#(p_i, O(t_j)). \end{aligned}$$

Для построения сети опишем ее набором расширенных входных и выходных функций, поставив в соответствие позициям конкретные устройства. Каждая из вершин графа представляет собой набор элементов  $S_i$  схемы, выполняющих определенную функцию. Вершины графа соединяются между собой ребрами через переходы. Переходы характеризуют конкретный момент времени  $t_i$  в течение которого выполняется определенное действие, а ребра указывают направление передачи сигнала между вершинами и несут информацию о параметрах  $V_i$ . Представим элементы графа в виде таблицы 2.5.

Таблица 2.5

Описание графа сети Петри

|     | Наименование                       | Отображение позиций в переходы  |                                    |
|-----|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
|     |                                    | Входы                           | Выходы                             |
| S1  | Блок питания                       | $I(s1)=\{t15,t15,t15,t15,t15\}$ | $O(s1)=\{t1,t15,t15,t15,t15,t15\}$ |
| S2  | Фильтр                             | $I(s2)=\{t1\}$                  | $O(s2)=\{t2\}$                     |
| S3  | Пороговый элемент                  | $I(s3)=\{t2\}$                  | $O(s3)=\{t3\}$                     |
| S4  | Пороговый элемент                  | $I(s4)=\{t2\}$                  | $O(s4)=\{t4\}$                     |
| S5  | Формирование синхроимпульсов       | $I(s5)=\{t3, t4\}$              | $O(s5)=\{t5\}$                     |
| S6  | Генератор пилообразного напряжения | $I(s6)=\{t5\}$                  | $O(s6)=\{t6\}$                     |
| S7  | Ноль-орган                         | $I(s7)=\{t6\}$                  | $O(s7)=\{t7\}$                     |
| S8  | Триггер разрешения                 | $I(s8)=\{t7,t5\}$               | $O(s8)=\{t8\}$                     |
| S9  | Формирователь импульсов            | $I(s9)=\{t8,t3,t4\}$            | $O(s9)=\{t9\}$                     |
| S10 | Усилитель-формирователь            | $I(s10)=\{t1,t9\}$              | $O(s10)=\{t10\}$                   |
| S11 | Усилитель формирователь            | $I(s11)=\{t1, t9\}$             | $O(s11)=\{t11\}$                   |
| S12 | Силовые ключи                      | $I(s12)=\{t10\}$                | $O(s12)=\{t12,t14\}$               |
| S13 | Силовые ключи                      | $I(s13)=\{t11\}$                | $O(s13)=\{t13,t14\}$               |
| S14 | Электродвигатель                   | $I(s14)=\{t14\}$                | $O(s14)=\{t34\}$                   |
| S15 | Датчик проводимости вентиля        | $I(s15)=\{t13\}$                | $O(s15)=\{t15\}$                   |
| S16 | Датчик проводимости вентиля        | $I(s16)=\{t12\}$                | $O(s16)=\{t16\}$                   |

|     | лей                                    |                              |                      |
|-----|--|------------------------------|----------------------|
| S17 | Схема сравнения                        | $I(s17)=\{t16\}$             | $O(s17)=\{t17\}$     |
| S18 | Схема формирования заданного положения | $I(s18)=\{t17\}$             | $O(s18)=\{t18\}$     |
| S19 | Схема формирования истинного положения | $I(s19)=\{t18,t19\}$         | $O(s19)=\{t20\}$     |
| S20 | Схема сравнения                        | $I(s20)=\{t18,t13,t12\}$     | $O(s20)=\{t20\}$     |
| S21 | Схема разрешения отработки             | $I(s21)=\{t20\}$             | $O(s1)=\{t21\}$      |
| S22 | Элемент задержки                       | $I(s22)=\{t21\}$             | $O(s22)=\{t19\}$     |
| S23 | Ноль-орган                             | $I(s23)=\{t31\}$             | $O(s23)=\{t16\}$     |
| S24 | Датчик скорости                        | $I(s24)=\{t14\}$             | $O(s24)=\{t24\}$     |
| S25 | Блок выделения модуля                  | $I(s25)=\{t24\}$             | $O(s25)=\{t25\}$     |
| S27 | Предельное токоограничение             | $I(s26)=\{t25\}$             | $O(s26)=\{t26\}$     |
| S26 | Инвертор                               | $I(s27)=\{t25\}$             | $O(s27)=\{t26\}$     |
| S28 | Функциональный преобразователь         | $I(s28)=\{t24\}$             | $O(s28)=\{t28\}$     |
| S29 | Схема выделения модуля                 | $I(s29)=\{t37,t24\}$         | $O(s29)=\{t29\}$     |
| S30 | Регулятор скорости                     | $I(s30)=\{t29,t22\}$         | $O(s30)=\{t22,t30\}$ |
| S31 | Нелинейный элемент                     | $I(s31)=\{t30\}$             | $O(s31)=\{t31\}$     |
| S32 | Преобразователь характеристик          | $I(s32)=\{t33,t33,t31,t28\}$ | $O(s32)=\{t33\}$     |
| S33 | Управляющий орган                      | $I(s33)=\{t33, t1\}$         | $O(s33)=\{t33,t6\}$  |
| S34 | Блокзащит                              | $I(s34)=\{t34,t12,t13,t24\}$ | $O(s14)=\{t33\}$     |
| S35 | Механическая система                   | $I(s35)=\{t14\}$             | $O(s35)=\{t35\}$     |
| S36 | Датчик положения                       | $I(s36)=\{t35\}$             | $O(s36)=\{t36\}$     |
| S37 | Регулятор положения                    | $I(s37)=\{t36\}$             | $O(s37)=\{t37\}$     |

И отображением переходов в позиции.

|   |                   |                                |     |                          |                  |
|---|-------------------|--------------------------------|-----|--------------------------|------------------|
| 1 | $I(t1)=\{s1\}$    | $O(t1)=\{s2,s10,s11,s33,s34\}$ | t18 | $I(t18)=\{s17\}$         | $O(t18)=\{s18\}$ |
| 2 | $I(t2)=\{s1\}$    | $O(t2)=\{s2\}$                 | t19 | $I(t19)=\{s18,s19\}$     | $O(t19)=\{s20\}$ |
| 3 | $I(t3)=\{s2\}$    | $O(t3)=\{s3\}$                 | t20 | $I(t20)=\{s18,s13,s12\}$ | $O(t20)=\{s20\}$ |
| 4 | $I(t4)=\{s2\}$    | $O(t4)=\{s4\}$                 | t21 | $I(t21)=\{s20\}$         | $O(t1)=\{s21\}$  |
| 5 | $I(t5)=\{s3,s4\}$ | $O(t5)=\{s5\}$                 | t22 | $I(t22)=\{s21\}$         | $O(t22)=\{s19\}$ |
| 6 | $I(t6)=\{s5\}$    | $O(t6)=\{s6\}$                 | t23 | $I(t23)=\{s31\}$         | $O(t23)=\{s16\}$ |
|   | $I(t7)=\{s6\}$    | $O(t7)=\{s7\}$                 | t24 | $I(t24)=\{s14\}$         | $O(t24)=\{s24\}$ |

7

|    |                      |                      |       |                              |                      |
|----|----------------------|----------------------|-------|------------------------------|----------------------|
| 8  | $I(t8)=\{s7,s5\}$    | $O(t8)=\{s8\}$       | $t25$ | $I(t25)=\{s24\}$             | $O(t25)=\{s25\}$     |
| 9  | $I(t9)=\{s8,s3,s4\}$ | $O(t9)=\{s9\}$       | $t27$ | $I(t26)=\{s25\}$             | $O(t26)=\{s26\}$     |
| 10 | $I(t10)=\{s1,s9\}$   | $O(t10)=\{s10\}$     | $t26$ | $I(t27)=\{s25\}$             | $O(t27)=\{s26\}$     |
| 11 | $I(t11)=\{s1,s9\}$   | $O(t11)=\{s11\}$     | $t28$ | $I(t28)=\{s24\}$             | $O(t28)=\{s28\}$     |
| 12 | $I(t12)=\{s10\}$     | $O(t12)=\{s12,s14\}$ | $t29$ | $I(t29)=\{s37,s24\}$         | $O(t29)=\{s29\}$     |
| 13 | $I(t13)=\{s11\}$     | $O(t13)=\{s13,s14\}$ | $t30$ | $I(t30)=\{s29,s22\}$         | $O(t30)=\{s22,s30\}$ |
| 14 | $I(t14)=\{s14\}$     | $O(t14)=\{s34\}$     | $t31$ | $I(t31)=\{s30\}$             | $O(t31)=\{s31\}$     |
| 15 | $I(t15)=\{s13\}$     | $O(t15)=\{s15\}$     | $t32$ | $I(t32)=\{s33,s33,s31,s28\}$ | $O(t32)=\{s33\}$     |
| 16 | $I(t16)=\{s12\}$     | $O(t16)=\{s16\}$     | $t33$ | $I(t33)=\{s33,s1\}$          | $O(t33)=\{s33,s6\}$  |
| 17 | $I(t17)=\{s16\}$     | $O(t17)=\{s17\}$     |       |                              |                      |

Граф сети Петри, построенный на основании записанных выражений, представлен на рис.2.17. Запись исходных выражений достаточно сложна, потому как приходится учитывать множество параметров, характеристик, способов математического описания объекта, физических явлений и моделей представления. Описание объекта в виде графа причинно-следственных связей носит эвристический характер. Однако, если привлечь для описания аппарат логики высказываний, можно получить аналитические выражения в виде уравнений, использующих семантику алгебры логики и законы алгебры высказываний.

Очевидно, что при таком подходе мы получаем еще один способ описания объекта диагностики, для которого характерны свои правила и приемы анализа.

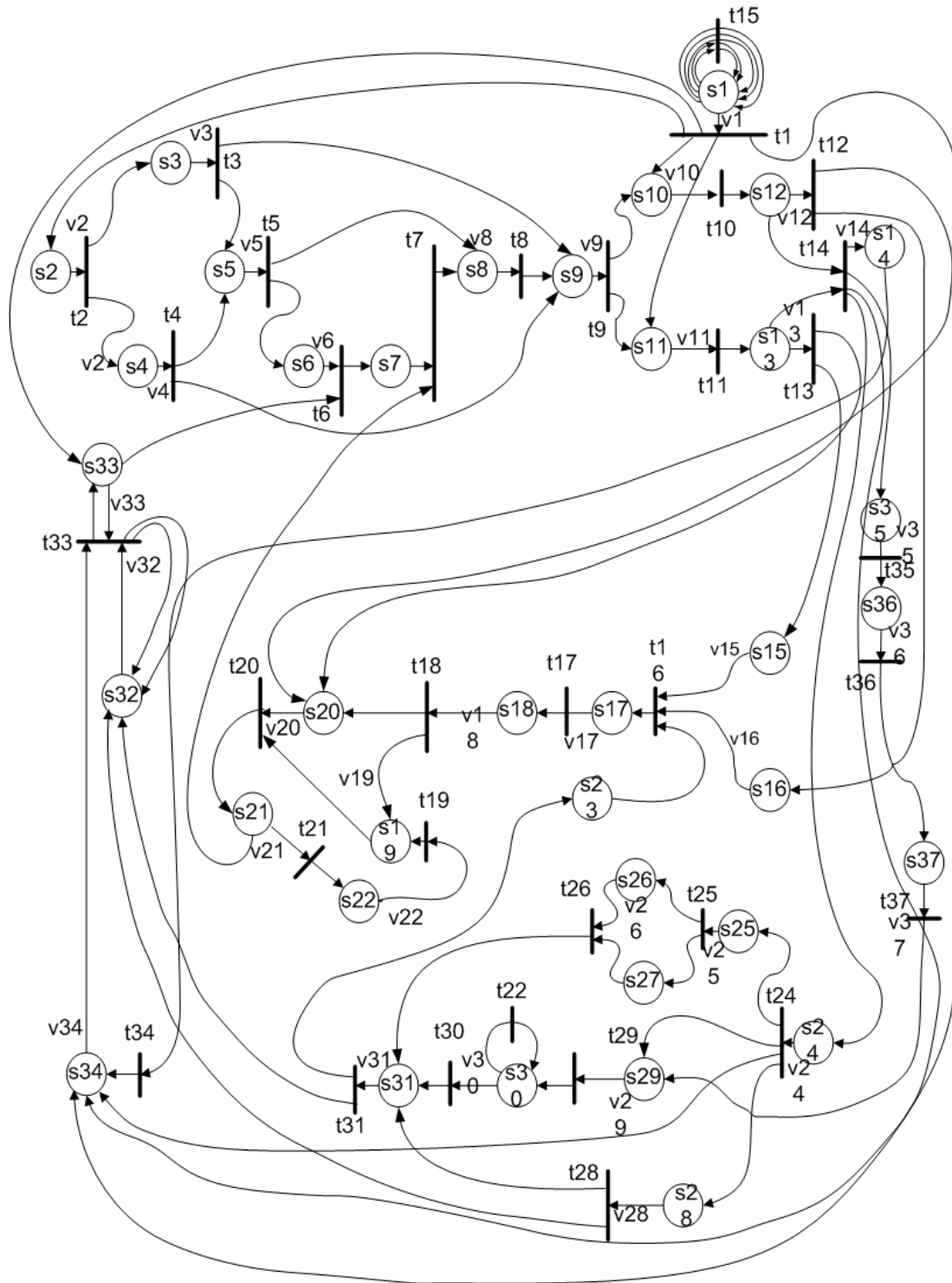


Рис. 2.17. Граф причинно-следственных связей

Для анализа, на первом этапе, можно использовать упрощенный граф, а по мере снятия неопределенности граф усложняется, становясь более информативным. Иными словами, степень детализации



возрастает вплоть до представления отдельных элементов в виде граф схем. Так, например, элемент s14 можно представить, и представляем сетью, показанной на рис.2.18.

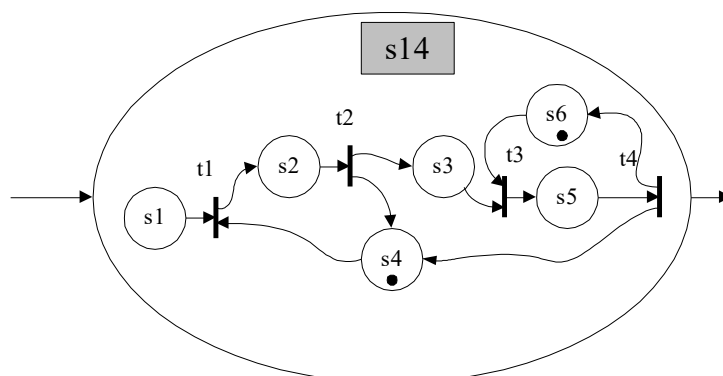


Рис. 2.18. Граф элемента s14

Основой процесса диагностики является структурная схема, представленная на рис.2.19.

Особенностью такого подхода является использование системы диагностики работающей параллельно с объектом и выполняющей предписанные ей функции на всем жизненном цикле работы оборудования. При этом выполняется основная задача – поддержание объекта в работоспособном состоянии и одновременно осуществляется накопление информации, описывающей генезис объекта, столь важный в дальнейшем при оценках текущих состояний.

Естественно, что наиболее лаконичным является подход к определению состояния при представлении ЭМС в виде устройства, имеющего один вход и один выход. Это позволяет выполнить комплексную оценку на основе входного и выходного сигналов. На рис.2.19. эти точки помечены цифрами 1 и 7(2) - для регулируемого ЭП и 9 и 8(2) - для следящего ЭП. Тем не менее, при установлении места неисправности эффективно использовать пространство состояний и сигналов.

ДС включает в себя объект диагностики, интерфейс, встроенный в систему управления объектом и вычислительную систему, реализующую алгоритм контроля состояния объекта.

Интерфейс представляет собой подсистему аналогового ввода. Получаемая от объекта информация может быть представлена и в дискретном виде. При этом подсистема ввода представляет собой

набор пороговых элементов, уставкой для которых используются номинальные значения контролируемой величины. Подсистема ввода может быть и гибридной, т.е. включать в себя устройства аналогового и цифрового ввода. Интерфейс выполняется в виде автономного устройства и встраивается в систему управления объектом. Число каналов ввода определяется числом диагностируемых переменных и поэтому АЦП нуждается во входном коммутаторе.

Вычислительная система может быть построена на основе микроЭВМ, микроконтроллера или на базе платформ Intel. Выбор той или иной вычислительной системы определяется загрузкой. Чем больше потоков информации и сложнее алгоритм оценки состояния, тем выше должны быть характеристики вычислителя. Выбор параметров и самой схемы приведен в последующих главах.

Каждый из параметров  $V_i$  может принимать любое состояние относительно установившегося значения, оговоренного техническими характеристиками на ЭМС. Естественно, что измерить параметры сигнала на входах и выходах трудоемкая задача (в нашем случае 37 устройств). Кроме того, нет необходимости получать такой объем информации, так как МПС будет загружена непроизводительной работой. Достаточно измерить параметры сигналов функциональных блоков. В этом случае число устройств, подлежащих диагностике равно 9.

Теперь если считать, что переходный процесс, представленный в технической документации или полученный экспериментально, является эталонным, то любое отклонение от него есть нарушение режимов работы. Величина отклонения от заданного переходного процесса оговаривается параметрами точности. Если считать, что отклонение может составлять 2-5% от установившегося значения, при котором характеристики имеют допустимое значение и свыше 5%, при котором заданное качество работы ЭМС не обеспечивается, то процесс диагностики ведется в отношении этих показателей. Таким образом, для устройства диагностики можно сформировать требования к оценке переходного процесса в следующем виде: 0% -эталонное значение, +2,5% -допустимое отклонение сверху, 2,5% -допустимое отклонение снизу, +5% -недопустимое отклонение сверху, 5% - недопустимое отклонение снизу

При вводе информации в ЭВМ эти значения интерпретируются двоичными кодами. В соответствие этим значениям поставим значения из интервала  $[0,1]$  двухразрядный двоичный код и сведем данные в таблицу.

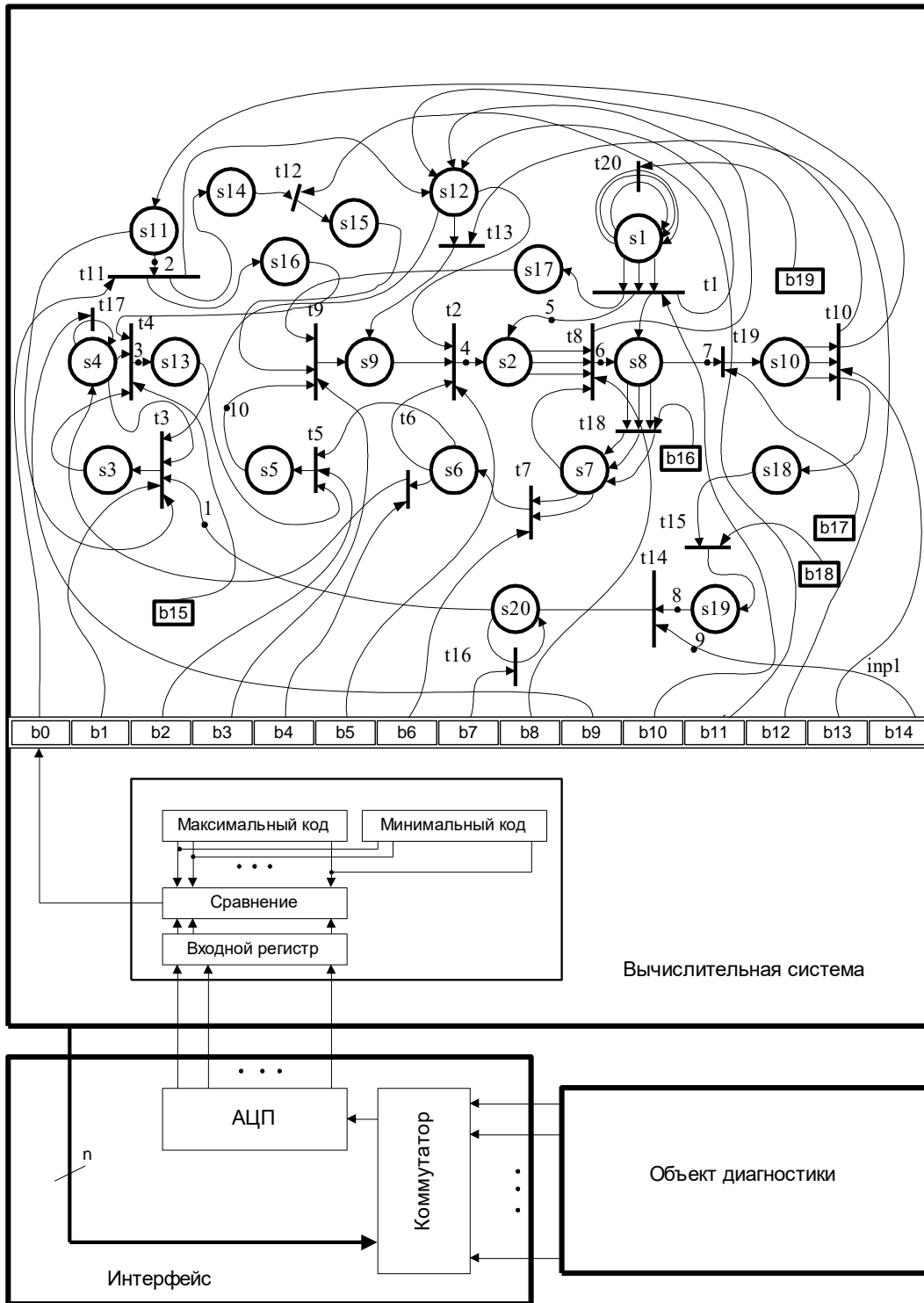
Таблица 2.6

Кодирование разрядов

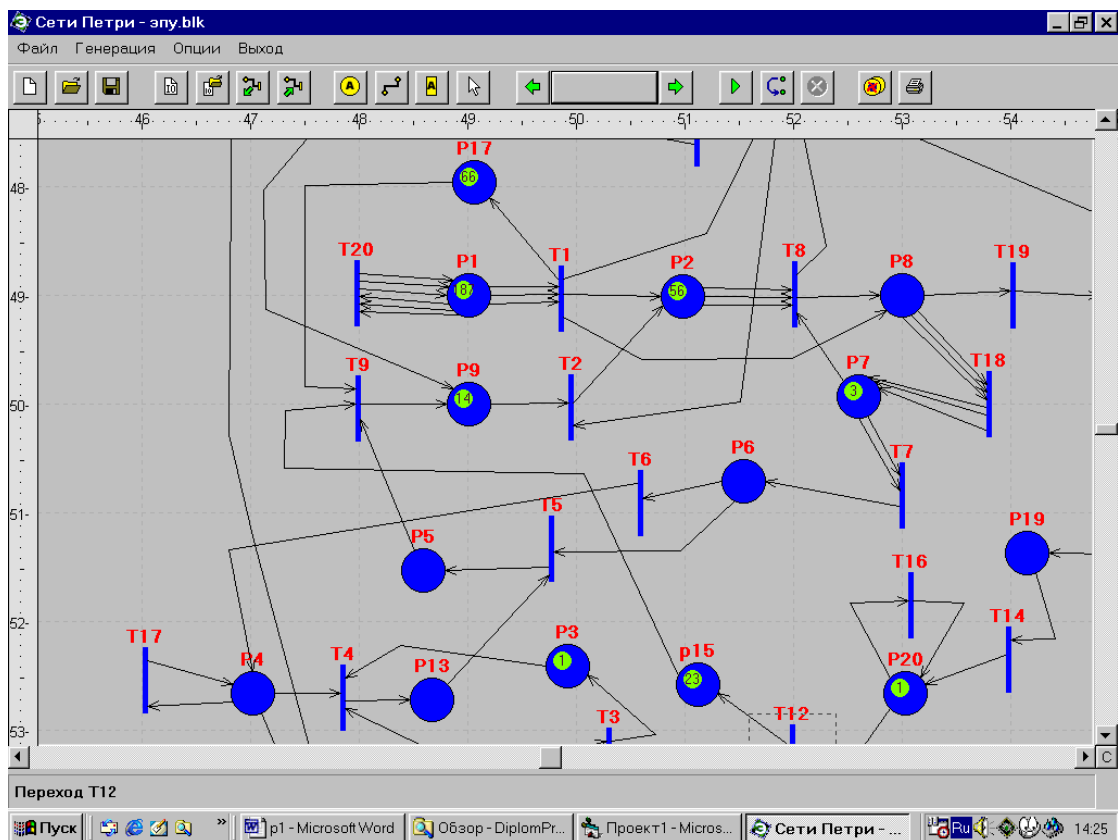
| Величина отклонения | Код           |               | Параметр                |
|---------------------|---------------|---------------|-------------------------|
|                     | Двухразрядный | Одноразрядный |                         |
| 0                   | 00            | 0             | Эталонное значение      |
| 2,5                 | 01            | 0             | Допустимое отклонение   |
| 5                   | 11            | 1             | Недопустимое отклонение |

Алгоритм работы МПС при анализе состояния ЭМС первоначально выполняет функцию "исключающее ИЛИ". При этом формируется одноразрядный двоичный код. Полученные в процессе диагностики значения оформляются в виде матрицы значений. В каждой из проверок задается тестовый сигнал  $U_i$  и для каждой из проверок формируется строка состояний элементов структуры, которая заносится в память вычислительной системы.

Алгоритм оценки работоспособности начнем с упрощения исходного графа, представив его в виде, показанном на рис.2.19. Определим вершины графа так, как это показано в табл. 2.7.



a)



б)

Рис. 2.19. Оценка фактического состояния с использованием логической модели подключенной параллельно процессу: а) структурная схема, б) фрагмент программного обеспечения

Таблица 2.7

### Вершины графа

|     |                                       |     |                                    |
|-----|---------------------------------------|-----|------------------------------------|
| S1  | Блок питания                          | S11 | Датчик скорости                    |
| S2  | Система импульсно-фазового управления | S12 | Блок защиты                        |
| S3  | Узел зависимого токоограничения       | S13 | Нелинейный элемент                 |
| S4  | Регулятор скорости                    | S14 | Блок выделения модуля              |
| S5  | Преобразователь характеристик         | S15 | Элемент насыщения                  |
| S6  | Логическое устройство                 | S16 | Функциональный преобразователь ЭДС |
| S7  | Датчик проводимости вентилях          | S17 | Датчик тока                        |
| S8  | Силовой преобразователь               | S18 | Механическая система               |
| S9  | Управляющий орган                     | S19 | Датчик положения                   |
| S10 | Электромеханический преобразователь   | S20 | Регулятор положения                |

Опишем граф по уравнениям (2.76.), дополнив систему еще одним уравнением, связывающим отображение позиций в переходы с учетом дополнительного сигнала

$$\#((p_i, t_j), A) = \#(p_i, I(t_j), b_j).$$

Получим:

|                             |                                  |                                   |                                |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| $I(s1) = \{ \}$             | $O(s1) = \{t1, t1, t1\}$         | $I(t1) = \{s1, s1, s1, b10\}$     | $O(t1) = \{s17, s8, s2, s12\}$ |
| $I(s2) = \{t1, t2\}$        | $O(s2) = \{t8, t8, t8\}$         | $I(t2) = \{s12, s9, s6, b5\}$     | $O(t2) = \{s2\}$               |
| $I(s3) = \{t3\}$            | $O(s3) = \{t4\}$                 | $I(t3) = \{s12, s4, s20, b1\}$    | $O(t3) = \{s3\}$               |
| $I(s4) = \{t6, t17\}$       | $O(s4) = \{t3, t4, t17\}$        | $I(t4) = \{s3, s4, s16, b15\}$    | $O(t4) = \{s13\}$              |
| $I(s5) = \{t5\}$            | $O(s5) = \{t9\}$                 | $I(t5) = \{s6, s13, b2\}$         | $O(t5) = \{s9\}$               |
| $I(s6) = \{t7\}$            | $O(s6) = \{t5, t6\}$             | $I(t6) = \{s6, b4\}$              | $O(t6) = \{s4\}$               |
| $I(s7) = \{t18, t18, t18\}$ | $O(s7) = \{t7, t7, t8\}$         | $I(t7) = \{s7, s7, b6\}$          | $O(t7) = \{s6\}$               |
| $I(s8) = \{t1, t8\}$        | $O(s8) = \{t18, t18, t18, t19\}$ | $I(t8) = \{s7, s2, s2, s2, b8\}$  | $O(t8) = \{s8\}$               |
| $I(s9) = \{t9, t13\}$       | $O(s9) = \{t2\}$                 | $I(t9) = \{s5, s17, s15, b3\}$    | $O(t9) = \{s9\}$               |
| $I(s10) = \{t19\}$          | $O(s10) = \{t10, t10, t10\}$     | $I(t10) = \{s10, s10, s10, b13\}$ | $O(t10) = \{s18, s12, s11\}$   |
| $I(s11) = \{t10\}$          | $O(s11) = \{t11, t3\}$           | $I(t11) = \{s11, b0\}$            | $O(t11) = \{s14, s16, s12\}$   |
| $I(s12) = \{t11, t8, t1\}$  | $O(s12) = \{t2, t13\}$           | $I(t12) = \{s14, b11\}$           | $O(t12) = \{s15\}$             |
| $I(s13) = \{t4\}$           | $O(s13) = \{t5\}$                | $I(t13) = \{s12, b12\}$           | $O(t13) = \{s9\}$              |
| $I(s14) = \{t11\}$          | $O(s14) = \{t12\}$               | $I(t14) = \{s8, b14\}$            | $O(t14) = \{s20\}$             |
| $I(s15) = \{t12\}$          | $O(s15) = \{t9\}$                | $I(t15) = \{s18, b18\}$           | $O(t15) = \{s19\}$             |
| $I(s16) = \{t11\}$          | $O(s16) = \{t9\}$                | $I(t16) = \{s20, s14, b7\}$       | $O(t16) = \{s20, s3\}$         |
| $I(s17) = \{t1\}$           | $O(s17) = \{t9\}$                | $I(t17) = \{s4, b9\}$             | $O(t17) = \{s4\}$              |
| $I(s18) = \{t10\}$          | $O(s18) = \{t15\}$               | $I(t18) = \{s8, s8, s8, b16\}$    | $O(t18) = \{s7, s7, s7\}$      |
| $I(s19) = \{t15\}$          | $O(s19) = \{t14\}$               | $I(t19) = \{s8, b17\}$            | $O(t19) = \{s10\}$             |
| $I(s20) = \{t14, t16\}$     | $O(s20) = \{t3, t16\}$           | $I(t20) = \{s20, s20, s20, b19\}$ | $O(t20) = \{s20, s20, s20\}$   |

Произведем маркировку сети, т.е. отобразим множеством позиций  $P$  в множество неотрицательных чисел  $N$ .

$$\mu: P \rightarrow N \quad (2.77.)$$

Представим  $\mu$  в виде вектора

$$\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, b_j), \quad (2.78.)$$

где  $n = |P|$  и каждое,  $\mu_i \in N, i = 1, \dots, n$ .

Состояние сети определяется ее маркировкой. Запуск переходов изменяет состояние сети, а пространство ее состояний есть множество всех маркировок  $N$ . Изменение состояния, вызванное запуском перехода, определяется функцией изменений.

Функция следующего состояния

$$\delta: N^n \times T \rightarrow N^n \quad (2.79.)$$

будет определена если  $(p_i) \succ \#(p_i, I(t_j), b_j)$  для всех  $p_i \in P$  и  $b_j \in B$ .

Запуск разрешенного перехода  $t_j$  в начальной маркировке образует новую маркировку  $\mu^1 = \delta(\mu^0, t_j, b_j)$ . В новой маркировке можно запустить другой разрешенный переход, который образует новую маркировку  $\mu^2 = \delta(\mu^1, t_k, b_k)$

Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока в маркировке будет существовать хотя бы один разрешенный переход.

Каждая новая маркировка, если соответствующий переход  $t_j$ , разрешен, будет определяться состояниями:

$$\mu^1(p_i) = \mu(p_i) - \#(p_i, I(t_j), b_j) = \#(p_i, O(t_j)). \quad (2.80.)$$

Устанавливая начальную маркировку сети можно проследить ее выполнение. Эту процедуру выполняем до тех пор, пока сеть не будет выполнима и она весьма длительна. Однако эти действия выполняются в процессе наладки и не влияют на дальнейшие действия. Подобное выполняется на всех уровнях представления сети. Представленный ниже алгоритм позволяет сократить время на выполнение сети.

Для уменьшения числа последовательно просматриваемых маркировок можно воспользоваться матричным представлением сети. В этом случае введем две матрицы  $D^+$  и  $D^-$ , представляющие соответственно входную и выходную функции.

Каждая матрица имеет  $m$  строк (по одной на переход) и  $n$  столбцов (по одной на позицию) и определяются

$$D^- [j, i] = \#(p_i, I(t_j)) \quad (2.81.)$$

и матрицу выходов  $D^+$

$$D^+ [j, i] = \#(p_i, O(t_j)). \quad (2.82.)$$

$$D^- = \begin{bmatrix} 30000000000000000000 \\ 00000100100100000000 \\ 00010000000100000001 \\ 00110000000000010000 \\ 00000100000010000000 \\ 00000100000000000000 \\ 00000020000000000000 \\ 03000010000000000000 \\ 00001000000000101000 \\ 00000000030000000000 \\ 00000000001000000000 \\ 00000000000001000000 \\ 00000000000100000000 \\ 00000001000000000000 \\ 00000000000000000100 \\ 00000000000001000001 \\ 00010000000000000000 \\ 00000003000000000000 \\ 00000001000000000000 \\ 00000000000000000003 \end{bmatrix}$$

$$D^+ = \begin{bmatrix} 01000001000100001000 \\ 01000000000000000000 \\ 00100000000000000000 \\ 00000000000010000000 \\ 00000000100000000000 \\ 00010000000000000000 \\ 00000100000000000000 \\ 00000001000000000000 \\ 00000000100000000000 \\ 00000000100000000000 \\ 00000000011000000100 \\ 0000000000101010000 \\ 00000000000000100000 \\ 00000000100000000000 \\ 00000000000000000001 \\ 00000000000000000010 \\ 00100000000000000001 \\ 00010000000000000000 \\ 00000030000000000000 \\ 00000000010000000000 \\ 00000000000000000001 \end{bmatrix}$$

Переход  $t_j$  в маркировке  $\mu$  разрешен, если  $\mu \geq e[j]D^-$ , а результат запуска перехода записывается как:

$$\delta(\mu, t_j) = \mu - e[j]D^- + e[j]D^+ = \mu + e[j](-D^- + D^+) = \mu + e[j]D,$$

где  $D = D^+ + D^-$  - составная матрица.

Введем вектор запусков последовательности  $t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k}$

$$f(\sigma) = e[j_1] + e[j_2] + \dots + e[j_k]$$

где  $f(\sigma)_i$  - число запусков перехода  $t_i$  в последовательности  $t_{j_k}$ .

Вектор начальной маркировки, согласно рис.2.19, имеет вид:

$$\mu = (3, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0)$$

Тогда для последовательности запусков можно записать

$$\delta(\mu, \sigma) = \delta(\mu, t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k}) = \mu + e[j_1]D + e[j_2]D + \dots + e[j_k]D = \mu + f(\sigma)D$$

Необходимо определить, будет ли достижима маркировка

$$\mu^l = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0).$$



Теперь, если предположить, что маркировка  $\mu^1$  достижима из  $\mu$ , то существует последовательность переходов  $\sigma$ , для которой  $f(\sigma)$  является неотрицательным целым решением следующего матричного уравнения для  $X$ :

$$\mu^1 = \mu + xD$$

И, соответственно, если решений нет, то  $\mu^1$  недостижима из  $\mu$ .

Разрешим уравнение относительно  $x$

$$x = (-3, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, -1, 0, 0, 1, 0, -1, -1, -1, 0, 0, 0, 0).$$

Решение этого уравнения дает положительный ответ о достижимости новой маркировки.

Заметим, что переходы графа связаны с конкретными выводами регистра вычислительной системы. Это необходимо для того, чтобы можно было контролировать выполнение сети. При этом достигается возможность с уверенностью устанавливать факт правильности функционирования ЭМС, т.е., если в процессе работы ЭМС соответствующий переход не установился, а это место вполне конкретное, сеть блокируется и выдается сообщение о нарушении функционирования с указанием места возникновения неисправности. Если сеть функционирует исправно, то за счет решения уравнения достижимости, есть возможность опережать события, а это дает возможность работать с прогнозом о будущем состоянии ЭМС.

## **2.5. Алгоритмы диагностики электромеханических систем на основе методов обучения и самообучения**

Одним из методов получения диагностической информации об электромеханической системе является обучение.

Не обсуждая проблему обучения, являющуюся весьма обширной и проблематичной, остановимся на ее применении в задачах диагностики.

В нашем случае под обучением будем понимать комплекс мер по приобретению *системой диагностики* информации для оценки текущего состояния ЭМС и формирования заключения.

Анализ принципов обучения с использованием микропроцессорной техники в задачах диагностики ЭМС позволил определить основные направления построения аппаратных и программных средств диагностических станций. Основой для построения таковых является

использование принципов искусственного интеллекта. В такой постановке вопроса на первом этапе основной задачей становятся способы приобретения знаний об объекте исследований, а позднее, на основе полученных и целенаправленно переработанных фактических данных в знания для постоянного контроля за его состоянием.

Укажем на три основных пути приобретения фактических данных и знаний об исследуемой ЭМС:

1. обучение для оценки состояния с использованием моделей;
2. получение знаний в процессе обучения при работе реального объекта ;
3. обучение на основе информации, почерпнутой из технической документации, литературных источников и опыта эксплуатации ЭМ систем.

Для решения проблемы обучения представим программное обеспечение в виде структурной схемы (рис.2.20).

Основой программного обеспечения являются базы данных и знаний и более существенное - алгоритмы обработки знаний. Иными словами, процесс обучения основан на обработке фактических данных и знаний об объекте с использованием базы обработки знаний. Фактические данные получают на основе исследований модели объекта или действующего образца. Эти данные включают в себя параметры, различные характеристики системы в целом, отдельных ее узлов, элементов. К этой информации относятся и данные, полученные как предварительная информация из технической документации, литературных источников и опыта эксплуатации подобных устройств. Техническая документация позволяет получить информацию и преобразовать ее в знания о структуре ЭМС, конкретном построении узлов и используемой элементной базы, режимах работы и возможных неполадках. Часть фактических данных получают в результате экспериментов с использованием моделей или в процессе испытаний серийных или опытных образцов. Испытания проводятся с использованием диагностических станций, имеющих в своем составе рассматриваемое программное обеспечение.

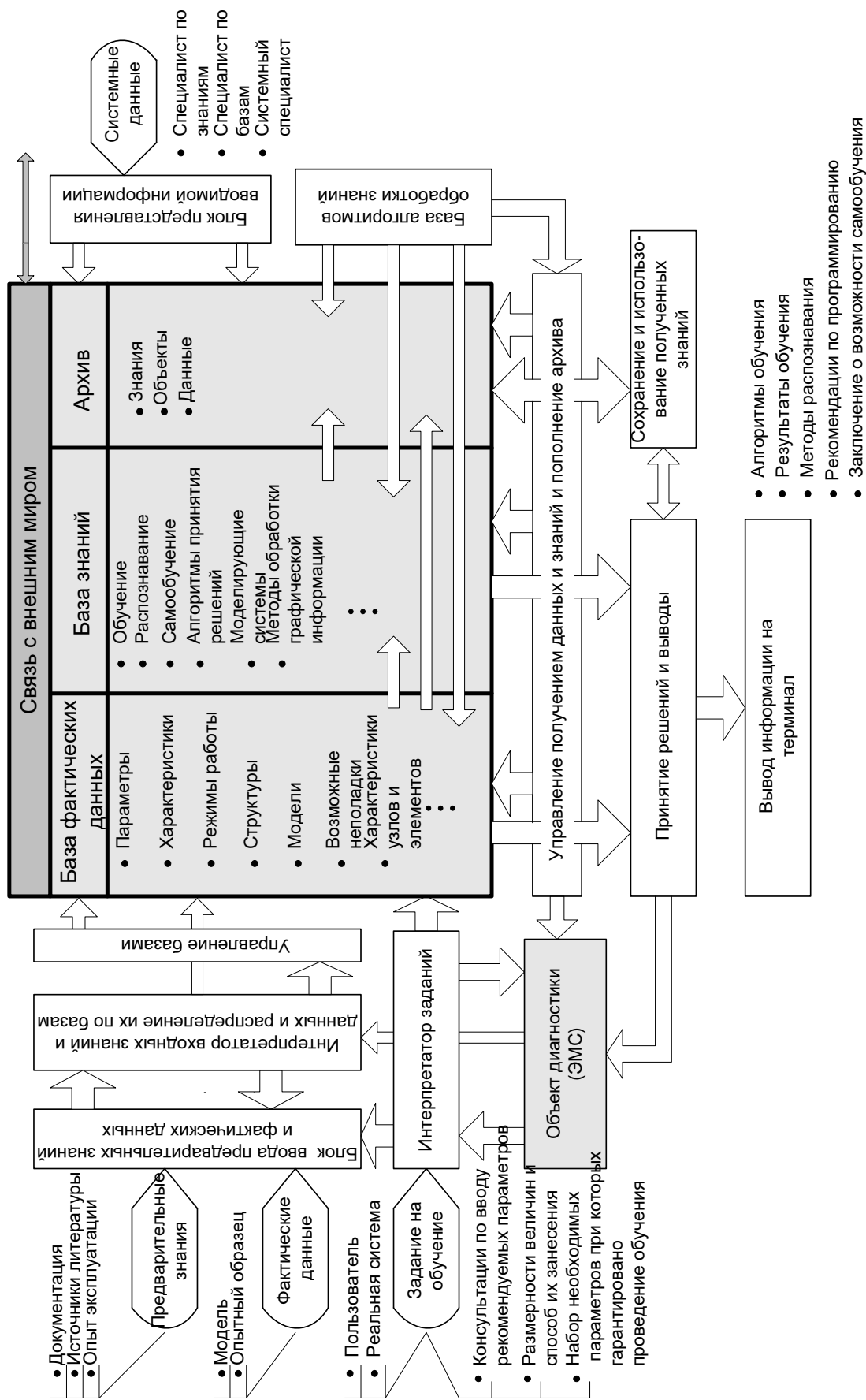


Рис. 2.20. Структура ПО получения и обработки диагностических знаний при обучении

Все полученные фактические данные прямо или косвенно используются в базе знаний. Вводимые данные классифицируются, преобразуются в соответствующий формат и распределяются по соответствующим базам. В этом помогают программы интерпретации и распределения вводимых данных и знаний, а также программы управления базами.

База знаний включает в себя набор алгоритмов и программ, связанных с методами обучения и самообучения, распознавания ситуации, принятия решений в процессе обучения, распознавания или самообучения, методов обработки получаемой диагностической информации, использования библиотек стандартных функции и т.д. Наивысший интеллект имеет база обработки знаний или управление обучением. На нее возложены функции обработки фактических данных и знаний, обработки знаний полученных в процессе обучения, распознавания фактических данных и знаний в различных ситуациях, выбора методов обучения и самообучения из имеющейся базы знаний, реализации выводов по результатам обучения и самообучения и т.д.

В процессе обучения можно применять различные стратегии структуризации информации и необходимо управлять этим процессом в ответ на входные данные. Существуют два классических метода: метод «снизу - вверх», при котором последовательно выбираются и структурируются отдельные сообщения и метод «сверху - вниз», при котором сначала выдвигается гипотеза, а затем она корректируется по мере поступления информации. На практике эти методы комбинируются, хотя управление обучением с максимальным эффектом не такая уж простая проблема.

Проведенный анализ позволяет систематизировать процедуру получения диагностической информации при обучении. Представим ее так:

*a. Получение информации без логических выводов.*

1. Инициализация программ получения фактических данных
2. Ввод фактических данных.

*b. Получение извне информации представленной в форме знаний.*

1. Получение готового набора знаний, представленных во внутреннем формате.

2. Получение знаний, представленных во внутреннем формате, в режиме диалога.

3. Получение знаний, представленных во внешнем формате, и их понимание.

*с. Обучение (в том числе с использованием моделей).*

1. Параметрическое обучение.

2. Обучение на основе выводов по аналогии.

3. Обучение на основе выводов по индукции- эвристическое обучение.

*d. Приобретение знаний на метауровне*

*e. Формирование базы знаний об объекте диагностики при обучении*

1. Накопление априорных знаний и их представление во внутреннем формате.

2. Накопление фактических данных и преобразование их в знания.

3. Методы пополнения базы данных и знаний.

4. Методы получения внешней информации и преобразование их в знания

*f. Создание базы обработки знаний.*

1. Методы обработки фактических данных и знаний полученных в п.п. *a, b*.

2. Алгоритмы, принципы обработки знаний полученных в процессе обучения.

3. Алгоритмы распознавания фактических данных и знаний.

4. Алгоритмы обучения и самообучения.

5. Механизм реализации выводов по результатам обучения и самообучения.

- Категорию *a* можно назвать обучением без выводов или механическим запоминанием. Это простой процесс получения информации, при котором необязательны функции выводов, а полученная информация в виде программ или данных используется для решения задач в неизменном виде. Другими словами, это способ получения информации, характерный для существующих компьютеров.

- Категория *b* – это получение информации извне, представленной в форме знаний, т.е. в форме, которую можно использовать для выводов. Обучающейся системе диагностики необходимо иметь

функцию преобразования входной информации в формат, удобный для дальнейшего использования и включения в базу знаний.

Приобретение знаний на этом этапе происходит в наиболее простой форме: это знания, предварительно подготовленные человеком во внутреннем формате, какими являются большинство специальных знаний, изначально заданных в диагностических системах. В рассматриваемом случае вводимые специальные знания необходимо преобразовать в машинный формат, но для этого нужен специалист, хорошо знающий как тонкости работы ЭМС, так и особенности работы диагностических комплексов. При обучении без преподавателя преобразование в машинный формат перепоручается самой системе. В общем случае для этого необходимо иметь функции выводов достаточно высокого уровня, но можно ограничиться и выводами на сравнительно низком уровне, а остальное доверить человеку – в этом и состоит приобретение знаний в диалоге.

Для категории *c* характерны следующие особенности.

- **Параметрическое обучение.** Наиболее простая форма обучения по наблюдениям состоит в определении реакции системы в ответ на входное воздействие, при последовательном изменении параметров системы и формировании общего правила, которое должно стать результатом вывода, с последующей корректировкой входящих в это правило параметров в зависимости от данных. При этом для обучения используют модели систем, реальные системы управления или иные методы обучения.

- **Обучение на основе выводов по аналогии.** Приобретение понятий новых состояний возможно путем преобразования существующих знаний, похожих на те, которые собираются получить. Это важная функция, которую называют обучением на основе выводов по аналогии или просто обучением по аналогии.

Выводы по аналогии - один из важных объектов исследования ЭМС. Подобие двух ситуаций распознается путем обнаружения наилучших совпадений по наиболее важным признакам.

- **Обучение на основе выводов по индукции – эвристическое обучение.** Среди всех форм обучения особо выделим обучение на основе выводов по индукции – это обучение с использованием выводов высокого уровня, как и при обучении по аналогии. В процессе этого обучения путем обобщения совокупности имеющихся данных выво-

дятся общие правила. Возможно обучение с преподавателем, когда входные данные задает человек, наблюдающий за состоянием обучаемой системы, и обучение без преподавателя, когда данные поступают в систему случайно. И в том и в другом случае выводы могут быть различными. Они имеют и различную степень сложности в зависимости от того, задаются ли только корректные данные или в том числе и некорректные данные и т. п. Так или иначе, обучение этой категории включает открытие новых правил, построение теорий, создание структур и другие действия, причем модель теории или структуры, которые следует создать, заранее не задаются. Поэтому их необходимо разработать так, чтобы можно было объяснить все правильные данные и контрпримеры. Исследование структурированных выводов активно ведется многими специалистами, но такие выводы еще не реализованы, это проблема будущего.

Индуктивные выводы возможны в случае, когда представление результата вывода частично определяется из представления входной информации. В последнее время обращают на себя внимание программы генерации программ по образцу с использованием индуктивных выводов.

Одна из существенных составляющих обучения - обучение по моделям. Естественно, что обучение по моделям включает все ранее перечисленные методы обучения. Однако необходимо пояснить некоторые моменты связанные с заданием модели, ориентированной на выполнение задач диагностики.

Параметрическое обучение основывается на использовании моделей различного типа (аналитические, заданные дифференциальными уравнениями, в виде структурной схемы и т.п.). В зависимости от того какие параметры необходимо получать, входные и выходные для всей системы в целом или (и) для промежуточных устройств, строится соответствующая модель, с необходимой глубиной детализации.

Для обучения неисправностям можно использовать не только перечисленные выше, но и логико-смысловые модели, построенные в терминах причинно-следственных связей и способных реализовать динамические процессы.

Обучение возможным дефектам производится с использованием имитационных моделей, выполненных в виде подобных исследуемо-

му. Меньшего размера, более простых по структуре, близкие системы и т.д.

Наиболее ценные результаты могут быть получены при обучении с использованием действующего образа. Однако при обучении дефектам, возможны такие ситуации, что введение дефекта в одном месте породит дефекты в других местах или вообще выведет систему из строя. Поэтому, прежде чем создавать неисправности, необходимо существенно разобраться в работе ЭМС, для чего можно применять модели различного типа.

- Выше было рассмотрено обучение на объектном уровне. Более сложная проблема – приобретение знаний на метауровне, т. е. знаний, основой которых является информация по управлению решением задач с использованием знаний на объектном уровне. Для знаний на метауровне пока не установлены ни формы представления и использования, ни связь со знаниями на объектном уровне, ни другая техника их систематизации. Поскольку не определена форма их представления с точки зрения использования, то трудно говорить о приобретении знаний на метауровне. Тем не менее с этой проблемой связаны многие надежды в диагностике.

- Создание баз данных, знаний и обработки знаний ведется по принципам присущих выбранному типу оболочки. Среди них можно указать следующие dBASE и ее модификации, Cliper, Acess, Paradox и т.п.

Основой наполнения баз является алгоритмическое обеспечение процессов обучения, распознавание ситуаций, самообучение, обработка информации, ввод и вывод данных, принятие решений, обработка вводимой информации и т.д.

Рассмотрим ряд примеров.

### ***Обучение с использованием моделей представленных структурной схемой***

В качестве примера возьмем электромеханический преобразователь(двигатель постоянного тока «Изофлюкс 444.2.20/150072»), который представлен следующей моделью (рис. 2.21а).

Выберем обучающий сигнал, при этом отдадим предпочтение сигналу в виде импульса прямоугольной формы. Использование сигнала такой формы позволяет получить, путем соответствующей обра-



ботки, переходный процесс, АЧХ и ФЧХ. Кроме того, сигнал такой формы просто реализуется в диагностической станции. Обучение будем производить относительно изменения таких параметров как постоянные времени (электрическая и электромеханическая) и сопротивления якорной цепи. Во всех экспериментах обучающий сигнал неизменен. В процессе обучения в память микропроцессорной системы записываются сигналы, вид которых представлен на рис. 2.21б. Набор таких данных представляет собой базу фактических данных.

Естественно, что приведенные параметры, взятые в качестве обучения, не исчерпывают всех особенностей функционирования ЭМП. К тому же в эксперименте эти параметры изменяют отдельно, но в реальном ЭМП они изменяются совместно и поэтому результаты при обучении с использованием реального объекта могут отличаться от эксперимента на модели.

Следующим этапом обучения является распознавание сигналов. предварительный анализ графиков (рис.2.21.) показывает, что при изменении величин диагностируемых параметров в сторону уменьшения или увеличения выходной сигнал изменяет свою амплитуду и длительность. дополнительно, при изменении постоянной времени якоря в сторону увеличения, увеличивается время затухания переходного процесса (увеличивается колебательность), а аналогичное изменение механической постоянной также приводит к увеличению времени переходного процесса, но без колебательности и даже без перерегулирования. Уменьшение сопротивления якорной цепи приводит к увеличению амплитуды и появлению осцилляции в переходном процессе, но значительно меньших по амплитуде, чем при уменьшения механической постоянной.

В общем случае оценку состояния ЭМС зададим на множестве  $M = \bigcup_{p=1}^l M_p$ . Будем считать, что подмножества  $M_1, M_2, M_3$  множества  $M$  заданы как результат обучения и  $M_1 = \{a_{1i}, t_{1i}, k_{1i}\}$  множество состояний при изменении сопротивления якоря,  $M_2 = \{a_{2i}, t_{2i}, k_{2i}\}$  - при изменении электрической постоянной времени и  $M_3 = \{a_{3i}, t_{3i}, k_{3i}\}$  - множество состояний при изменении электромеханической постоянной.  $a_{ji}, t_{ji}, k_{ji}$  - признаки этим множеств, для которых амплитуда сигнала обозначена символом  $a$ , длительность символом  $t$  и колебательность символом  $k$ . Для рассматриваемых подмножеств установим границы:

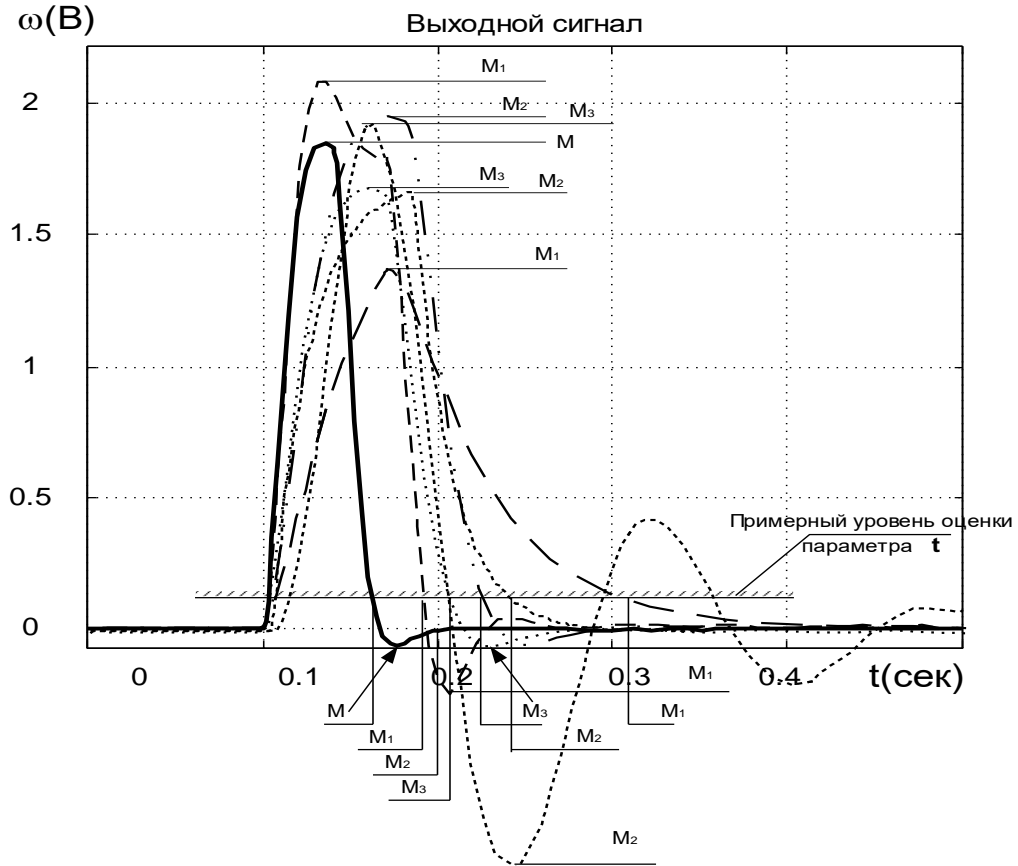
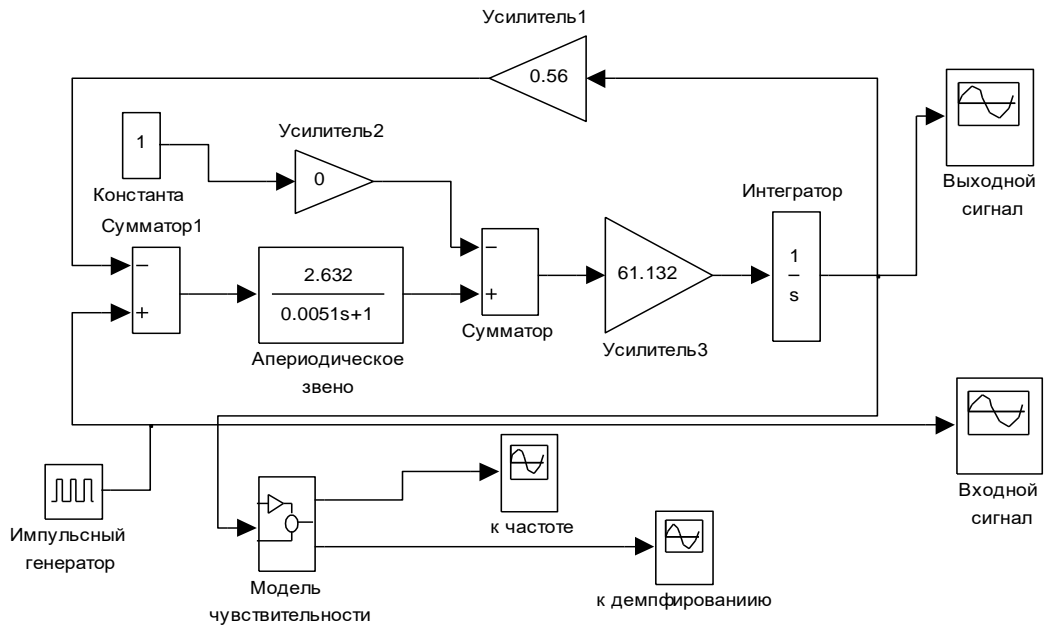


Рис.2.21. Модель электродвигателя постоянного тока и результаты обучения:  
а) структурная схема, б) результаты обучения

$$\begin{aligned}
M_1 &= \left( \max_{\omega, \tau} \sup \max(M) \& \min_{\omega, \tau} \inf \min(M) \right) \\
M_2 &= \left( \min_{\omega, \tau} \sup \max(M) \& \max_{\omega, \tau} \inf \min(M) \right) (2.86.) \\
M_3 &= \left( \min_{\omega, \tau} \sup \min(M) \& \max_{\omega, \tau} \inf \max(M) \right)
\end{aligned}$$

В пределах этих границ необходимо распознавать текущие состояния ЭМС, а за их пределами, даже если ЭМС и имеет такое состояние, диагностика не производится и выводится сообщение о необратимых нарушениях в работе системы.

Оценку состояния можно проводить, используя любую пару признаков. Однако, если функции толенарны, а именно существует не единственное отображение, то в рассмотрение вводится третий признак.

Элементы множеств  $M_1, M_2, M_3$  образованы парами  $\langle \omega, \tau \rangle$ . Возьмем разбиение  $\{M_1, M_2, M_3\}$  множества  $M$ , соответствующее отношению  $A$ . В силу конечности множества  $M$  это разбиение конечно и каждый класс конечен. Все элементы каждого класс пронумерованы, т.к. представляют собой упорядоченную последовательность двоичных чисел, полученных в процессе измерений. Тогда каждому элементу  $x$  можно сопоставить пару целых чисел:  $\omega \rightarrow \langle p, q \rangle$ , где  $p$ —номер признака в  $M_p$ , в который попал  $x$ , а  $q$ —номер элемента  $x$  для этого признака. Ясно, что если  $\omega \rightarrow \langle p_1, q_1 \rangle, \tau \rightarrow \langle p_2, q_2 \rangle$  и  $\omega \neq \tau$ , то  $\langle p_1, q_1 \rangle \neq \langle p_2, q_2 \rangle$ . Действительно, либо элементы  $\omega$  и  $\tau$  соответствуют разным признакам, тогда у них различные первые номера:  $p_1 \neq p_2$ ; либо они различаются номерами элементов—тогда  $q_1 \neq q_2$ .

Зададим отношения  $A$ : « $x$  есть состояние для  $y$ ». Припишем следующие свойства отношения  $A$  (иметь состояние):

- 1) Для всякого  $y$  существует состояние  $x$ :  $xAy$ .
- 2) Если  $xAy$ , то  $xAx$ , т. е. любое состояние есть состояние для самого себя.
- 3) Состояние единственно, т. е. из  $xAy$  и  $zAy$  следует  $x = z$ .

Эти три свойства объявим аксиомами отношения «иметь состояние». Покажем, что из них следует определение состояния с помощью разбиения. Для этого сначала по отношению  $A$  построим новое отношение  $\langle A \rangle$ , определяемое правилом:  $x \langle A \rangle y$ , если  $x$  и  $y$  имеют об-

щий эталон. Иначе говоря, если существует такое  $z$ , что  $z\langle A\rangle x$  и  $z\langle A\rangle y$ . Покажем, что  $\langle A\rangle$  есть отношение эквивалентности. Действительно, по свойству 1) у каждого  $x$  есть эталон и, стало быть,  $x\langle A\rangle x$ . Значит,  $\langle A\rangle$  рефлексивно. Симметричность отношения  $\langle A\rangle$  очевидна. Если  $x\langle A\rangle y$  и  $y\langle A\rangle z$ , то это значит, что  $x$  и  $y$  имеют общий эталон, а  $y$  не может иметь эталона, отличного от эталона для  $z$ . Значит,  $x\langle A\rangle z$ .  $\langle A\rangle$  есть отношение эквивалентности и существует разбиение  $\{M_1, M_2, M_3\}$  множества  $M$  на классы эквивалентных друг другу элементов.

Теперь пусть  $f: M \rightarrow S$  – отображение множества  $M$  на множество состояний  $S$ . Рассмотрим на множестве  $M$  отношение «иметь общие признаки» и обозначим это отношение  $A_f$ . Иначе говоря,  $x A_f y$ , если  $f(x) = f(y)$ . Обозначим через  $M_p$  множество всех элементов  $x \in M$ , имеющих данный образ  $p \in S$ , т. е. таких, что  $f(x) = p$ . Ясно, что,  $\bigcup_{p \in S} M_p = M$  так как любой элемент из  $M$  имеет образ. Далее, при разных  $p$  и  $q$ ,  $M_p \cap M_q = \emptyset$ , так как иначе элемент, попавший в пересечение  $M_p \cap M_q$ , имел бы два разных образа:  $p$  и  $q$ . Поскольку  $f$  сюръективно,  $M_p \neq \emptyset$  для любого  $p \in S$ . Итак, множества  $M_p$ , образуют разбиение множества  $M$ , а отношение  $A_f$  есть эквивалентность, соответствующая этому разбиению. Последнее следует из того, что  $x A_f y$  тогда и только тогда, когда  $x$  и  $y$  принадлежат общему множеству  $M_p$ .

Определим функцию  $f$  следующим образом:

$$f(x) = \begin{cases} p, & \text{если } (x \in M, \{x | p(a, t, k)\}) \\ 0, & \text{если } (x \notin M, \{x | p(a, t, k)\}) \end{cases}, \quad (2.87.)$$

тогда для оценки  $x$  (используя семантику логики высказываний) справедливы высказывания вида:

$$(\forall x)(x \in M) f(x) = p \exists (a \in M \& t \in M \& k \in M) \vee \dots \vee (\bar{a} \in M \& \bar{t} \in M \& \bar{k} \in M) \rightarrow S \subset M_p.$$

Последнее выражение при соответствующей подстановке переменных с учетом

$$a_{ji} = \begin{cases} a_{1i}, \text{Н}^- \text{Ц} (a_{1i} > a_{2i}) \& (a_{1i} > a_{3i}) \\ a_{2i}, \text{Н}^- \text{Ц} (a_{2i} < a_{1i}) \& (a_{1i} > a_{3i}), \\ a_{3i}, \text{Н}^- \text{Ц} (a_{3i} < a_{2i}) \& (a_{3i} < a_{1i}) \end{cases}, \quad t_{ji} = \begin{cases} t_{1i}, \text{Н}^- \text{Ц} (t_{1i} > t_{2i}) \& (t_{1i} > t_{3i}) \\ t_{2i}, \text{Н}^- \text{Ц} (t_{2i} < t_{1i}) \& (t_{1i} > t_{3i}), \\ t_{3i}, \text{Н}^- \text{Ц} (t_{3i} < t_{2i}) \& (t_{3i} < t_{1i}) \end{cases}$$

$$k_{ji} = \begin{cases} k_{1i}, \text{И} \neg \Pi(k_{1i} > k_{2i}) \& (k_{1i} > k_{3i}) \\ k_{2i}, \text{И} \neg \Pi(k_{2i} < k_{1i}) \& (k_{1i} > k_{3i}) \\ k_{3i}, \text{И} \neg \Pi(k_{3i} < a_{2i}) \& (k_{3i} < k_{1i}) \end{cases} \quad (2.88.)$$

приводит к следующим алгоритмам определения текущего состояния ЭМП:

$$\begin{aligned} & \{ \forall x(x \in M) f(x) = p \exists x (\neg(\neg a \& t \& k \vee a \& \neg t \& k \\ & \vee a \& t \& \neg k \vee \neg a \& \neg t \& k \vee \neg a \& t \& \neg k \vee a \& \neg t \& \neg k \\ & \vee \neg a \& \neg t \& \neg k)) \rightarrow S \notin M \} \vee \\ & \vee \{ \forall x(x \in M) f(x) = p \exists x (\vee_i (a_{1i} \& t_{1i} \& k_{1i})) \rightarrow S \subset M_1 \} \vee \\ & \vee \{ \forall x(x \in M) f(x) = p \exists x (\vee_i (a_{2i} \& t_{2i} \& k_{2i})) \rightarrow S \subset M_2 \} \vee \\ & \vee \{ \forall x(x \in M) f(x) = p \exists x (\vee_i (a_{3i} \& t_{3i} \& k_{3i})) \rightarrow S \subset M_3 \} \end{aligned} \quad (2.89.)$$

### ***Обучение с использованием моделей логического типа***

В этом случае для диагностики поступим следующим образом. Возьмем в качестве объекта электромеханический преобразователь электромагнитного типа, схема которого представлена на рис. 2.22. Представим ЭМП в виде диагностического графа причинно-следственных связей основываясь на описании физических процессов.

Построим граф, применяя обозначения, используемые для описания сетей Петри [184].

Для построения сети опишем ее набором расширенных входных и выходных функций, поставив в соответствие позициям конкретные физические характеристики:

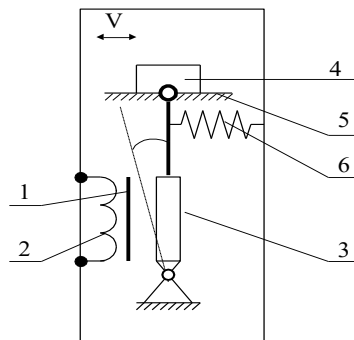


Рис. 2.22. Электромеханический преобразователь

|                           |          |                  |                         |
|---------------------------|----------|------------------|-------------------------|
| Напряжение                | $U$      | $I(p1)=\{t1\}$   | $O(p1)=\{t1\}$          |
| Частота                   | $f$      | $I(p2)=\{t1\}$   | $O(p2)=\{t1,t8\}$       |
| Ток в обмотке             | $I$      | $I(p3)=\{t1\}$   | $O(p3)=\{t2,t3,t4,t4\}$ |
| Магнитный поток           | $\Phi$   | $I(p4)=\{t2\}$   | $O(p4)=\{t3\}$          |
| Индуктивность             | $L$      | $I(p5)=\{t3\}$   | $O(p5)=\{t4,t8\}$       |
| Сила воздействия          | $F_{эм}$ | $I(p6)=\{t4\}$   | $O(p6)=\{t5\}$          |
| Перемещение               | $X$      | $I(p7)=\{t5\}$   | $O(p7)=\{t4,t6,t10\}$   |
| Сопротивление зазора      | $R_B$    | $I(p8)=\{t6\}$   | $O(p8)=\{t7\}$          |
| Магнитное сопротивление   | $R_M$    | $I(p9)=\{t7\}$   | $O(p9)=\{t2\}$          |
| Индуктивное сопротивление | $X_L$    | $I(p10)=\{t8\}$  | $O(p10)=\{t9,t9\}$      |
| Полное сопротивление      | $Z$      | $I(p11)=\{t9\}$  | $O(p11)=\{t1\}$         |
| Силы сопротивления        | $F_M$    | $I(p12)=\{t10\}$ | $O(p12)=\{t5\}$         |
| Ускорение                 | $a$      | $I(p13)=\{t6,t$  | $O(p13)=\{t10$          |
|                           |          | $6\}$            |                         |
| Скорость                  | $V$      | $I(p14)=\{t6\}$  | $O(p14)=\{t10\}$        |
| Число витков              | $w$      | $I(p15)=\{ \}$   | $O(p15)=\{t2,t3,t11\}$  |
| Сопротивление стали       | $R_{ст}$ | $I(p16)=\{ \}$   | $O(p16)=\{t7\}$         |
| Масса (приведенная)       | $m$      | $I(p17)=\{ \}$   | $O(p17)=\{t10\}$        |
| Жесткость (приведенная)   | $c$      | $I(p18)=\{ \}$   | $O(p18)=\{t10\}$        |
| Коэффициент трения        | $K_{тр}$ | $I(p19)=\{ \}$   | $O(p19)=\{t10\}$        |
| Активное сопротивление    | $R_a$    | $I(p20)=\{11\}$  | $O(p20)=\{t9,t9\}$ ,    |

и отображением переходов в позиции:

|                                  |                                |
|----------------------------------|--------------------------------|
| $I(t1)=\{p1,p2,p11\}$            | $O(t1)=\{p1,p2,p3\}$           |
| $I(t2)=\{p3,p9,p15\}$            | $O(t2)=\{p4\}$                 |
| $I(t3)=\{p4,p3,p15\}$            | $O(t3)=\{p5\}$                 |
| $I(t4)=\{p3,p3,p5,p7\}$          | $O(t4)=\{p6\}$                 |
| $I(t5)=\{p6,p12\}$               | $O(t5)=\{p7\}$                 |
| $I(t6)=\{p7\}$                   | $O(t6)=\{p8,p13,p13,p14\}$ (5) |
| $I(t7)=\{p8,p16\}$               | $O(t7)=\{p8\}$                 |
| $I(t8)=\{p2,p5\}$                | $O(t8)=\{p10\}$                |
| $I(t9)=\{p10,p10,p20,p20\}$      | $O(t9)=\{p11,p11\}$            |
| $I(t10)=\{p13,p14,p17,p18,p19\}$ | $O(t10)=\{p12\}$               |
| $I(t11)=\{p15\}$                 | $O(t11)=\{p20\}$ .             |

На основании таблиц построим исходную сеть, а затем преобразуем ее используя принцип дуальности, и произведем ее маркировку, т.е. отобразим множеством позиций  $P$  в множество неотрицательных чисел  $N$  (рис.2.23.а)  $\mu: P \rightarrow N$ .

Представим  $\mu$  в виде вектора  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ , где  $n = |P|$  и каждое,  $\mu_i \in N$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Состояние сети определяется ее маркировкой. Запуск переходов изменяет состояние сети, а пространство ее состояний, есть множество всех маркировок  $N$ . Изменение состояния, вызванное запуском перехода, определяется функцией изменений. Функция следующего состояния  $\delta: N^n \times T \rightarrow N^n$  будет определена, если  $(p_i) \succ \#(p_i, I(t_j))$  для всех  $p_i \in P$ .

Запуск разрешенного перехода  $t_j$  в начальной маркировке образует новую маркировку  $\mu^1 = \delta(\mu^0, t_j)$ . В новой маркировке можно запустить другой разрешенный переход и который образует новую маркировку  $\mu^2 = \delta(\mu^1, t_k)$ .

Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока в маркировке будет существовать хотя бы один разрешенный переход.

Каждая новая маркировка, если соответствующий переход  $t_j$  разрешен, будет определяться состояниями:

$$\mu^1(p_i) = \mu(p_i) - \#(p_i, I(t_j)) + \#(p_i, O(t_j)).$$

Устанавливая начальную маркировку сети можно проследить ее выполнение. Для уменьшения числа последовательно просматриваемых маркировок можно воспользоваться матричным представлением сети. В этом случае введем две матрицы  $D^-$  и  $D^+$ , представляющие соответственно входную и выходную функции. Каждая матрица имеет  $m$  строк (по одной на переход) и  $n$  столбцов (по одной на позицию) и определяются:

матрица входов

$$D^- [j, i] = \#(p_i, I(t_j)), \quad D^- = \begin{bmatrix} 100010 \\ 010001 \\ 001000 \\ 000100 \end{bmatrix},$$

матрица выходов  $D^+$

$$D^+ [j, i] = \#(p_i, O(t_j)). \quad D^+ = \begin{bmatrix} 110000 \\ 001000 \\ 000101 \\ 000010 \end{bmatrix}.$$

Переход  $t_j$  в маркировке  $\mu$  разрешен, если  $\mu \geq e[j]D^-$ , а результат запуска перехода записывается как:  $\delta(\mu, t_j) = \mu - e[j]D^- + e[j]D^+ = \mu + e[j](-D^- + D^+) = \mu + e[j]D$ , где  $D = D^- + D^+$  - составная матрица, которая имеет вид:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Введем вектор запусков последовательности  $t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k}$   $f(\sigma) = e[j_1] + e[j_2] + \dots + e[j_k]$ , где  $f(\sigma)_i$  - число запусков перехода  $t_i$  в последовательности  $t_{jk}$ .

Вектор начальной маркировки, согласно рис.2.23.b, имеет вид:  $\mu = (100010)$ .

Тогда для последовательности запусков можно записать  $\delta(\mu, \sigma) = \delta(\mu, t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k}) = \mu + e[j_1]D + e[j_2]D + \dots + e[j_k]D = \mu + f(\sigma)D$

Необходимо определить, будет ли достижима маркировка  $\mu^1 = (110000)$ .

Теперь, если предположить, что маркировка  $\mu^1$  достижима из  $\mu$ , то существует последовательность переходов  $\sigma$ , для которой  $f(\sigma)$  является неотрицательным целым решением следующего матричного уравнения для  $X$ :  $\mu^1 = \mu + xD$ . И, соответственно, если решений нет, то  $\mu^1$  недостижима из  $\mu$ .

Разрешим уравнение, тогда:  $x = (1000)D$ .

Решение этого уравнения дает положительный ответ о достижимости новой маркировки.

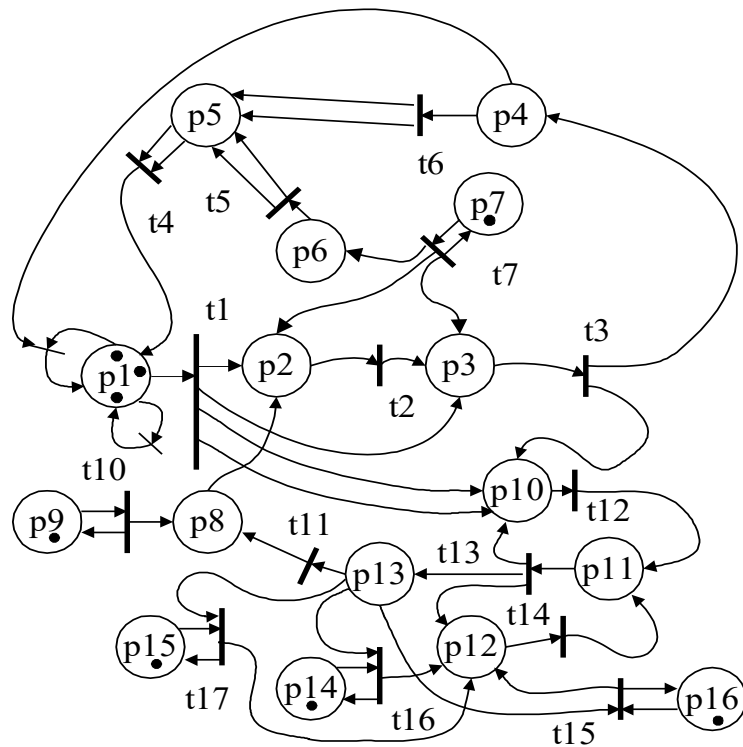
Рассмотрим упрощенную сеть ЭМП, в которой оставлены только те переменные, которые явно определяют работу ЭМП. (рис.2.23.b)

Исходя из физических процессов, зададим начальную маркировку  $\mu = (100010)$ . В этой маркировке переход  $t_1$  разрешен и тогда новая маркировка будет:

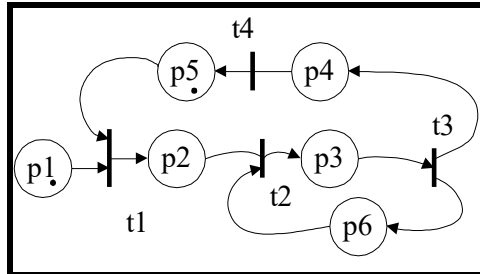
$$\mu^1 = (100010) + (1000)D = (110000)$$

Дальнейшие действия в сети заблокированы, т.к. нет перемещения, что определяется отсутствием информации о перемещении механической системы.





a)



b)

Рис.2.23. Модифицированный а) и упрощенный б) графы

Если теперь изменить начальную маркировку, придав ей значение  $\mu=(100011)$ , тогда очередная маркировка, так как переход  $t_1$  разрешен, будет иметь следующее значение:

$$\mu^1 = (100011) + (1000)[D] = (100011) + (0100 - 10) = (110001)$$

Теперь разрешен переход  $t_2$  и следующая маркировка равна:

$$\mu^2 = (110001) + (0100)[D] = (110001) + (0 - 1100 - 1) = (101000)$$

Остальные маркировки:

$$\mu^3 = (101000) + (1000)[D] = (100101),$$

...

$$\mu^7 = (101000) + (0010)[D] = (101001) \text{ и т.д.}$$

Предположим, что в системе произошел сбой и оказался разрешенным дополнительно переход  $t_4$ , тогда:

$$\mu^8 = (100101) + (0011)[D] = (100101) + (00-1101) + (000-110) = 10-1112$$

а из этого следует, что в ЭМП перестал перемещаться исполнительный механизм.

Задавая различные маркировки, проводят обучение с использованием сети моделирующей работу ЭМП. Результаты обучения образуют базу фактических данных. Кроме того, моделирование сети позволило выявить основной параметр, по которому необходимо проводить диагностику. Этим параметром является ток.

### ***Обучение с использованием реального объекта***

Проведем обучение на физическом объекте и с помощью диагностического комплекса запишем реализации тока. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.24.

В процессе обучения, на разной высоте по длине якоря, создавались механические нагрузки установкой препятствий между подвижным элементом и опорой. Кривым с нечетными номерами соответствует установка препятствий слева от подвижного элемента, а четным - справа. Кривая с номером 1 принадлежит свободному движению механизма. Весь набор фактических данных, полученных в процессе обучения, хранится в базе данных.

Поясним происхождение высокочастотных колебаний, наложенных на основную частоту. Якорь ЭМП представляет собой балку, закрепленную с одной стороны и уравновешенную пружиной. Если к балке приложено усилие, изменяющееся по гармоническому закону, то в ней возникают колебания. Амплитуда, частота и фаза этих колебаний различна и зависит от характера изменения внешних сил.

Подобные устройства имеют малый коэффициент демпфирования и поэтому колебания не успевают затухать, вызывая дополнительные колебания, модулирующие основной сигнал. Следовательно, внешние воздействия вызывают адекватное изменение тока, протекающего через обмотку электромагнита.

Для оценки множества состояний можно использовать такие параметры сигнала тока, как среднее и мгновенные значения и энергию сигнала. Для сравнения различных состояний вычислим мощность сигнала свободного движения и движения под воздействием внешней силы. Мощность сигнала равна:

$$\bar{i}^2(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{\infty} c_n^2 \|\varphi\|^2$$

В качестве базисных функций используем тригонометрические, тогда:

$$\|\varphi(t)\|^2 = \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} e^{in\omega t} e^{-in\omega t} dt = T, \text{ а } c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} i(t) e^{-in\omega t} dt$$

Таким образом, средняя мощность периодического колебания

$$i^2(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2 T = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2$$

Окончательно, учитывая, что  $i_0 = \frac{a}{2}$ ,  $|i_n| = \frac{A_n}{2}$  получаем:

$$\bar{i}^2(t) = \frac{a_0^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2$$

Для снятия неопределенности при определении текущего состояния ЭМП, дополнительно используем значение действующего тока.

Проведенный анализ формализован, преобразован во внутренний формат и сохранен в базе знаний.

В базе алгоритмов обработки знаний имеется алгоритм, выполняющий логический анализ, основанный на наборе правил, которые сформулированы в следующем виде.

- **Факты** F1- отсутствует ток, F2- изменение активного сопротивления обмотки, F3- изменение индуктивного сопротивления обмотки, F4 -изменение тока, F5 -исполнительный механизм неподвижен, F6- исполнительный механизм имеет ограниченное перемещение.

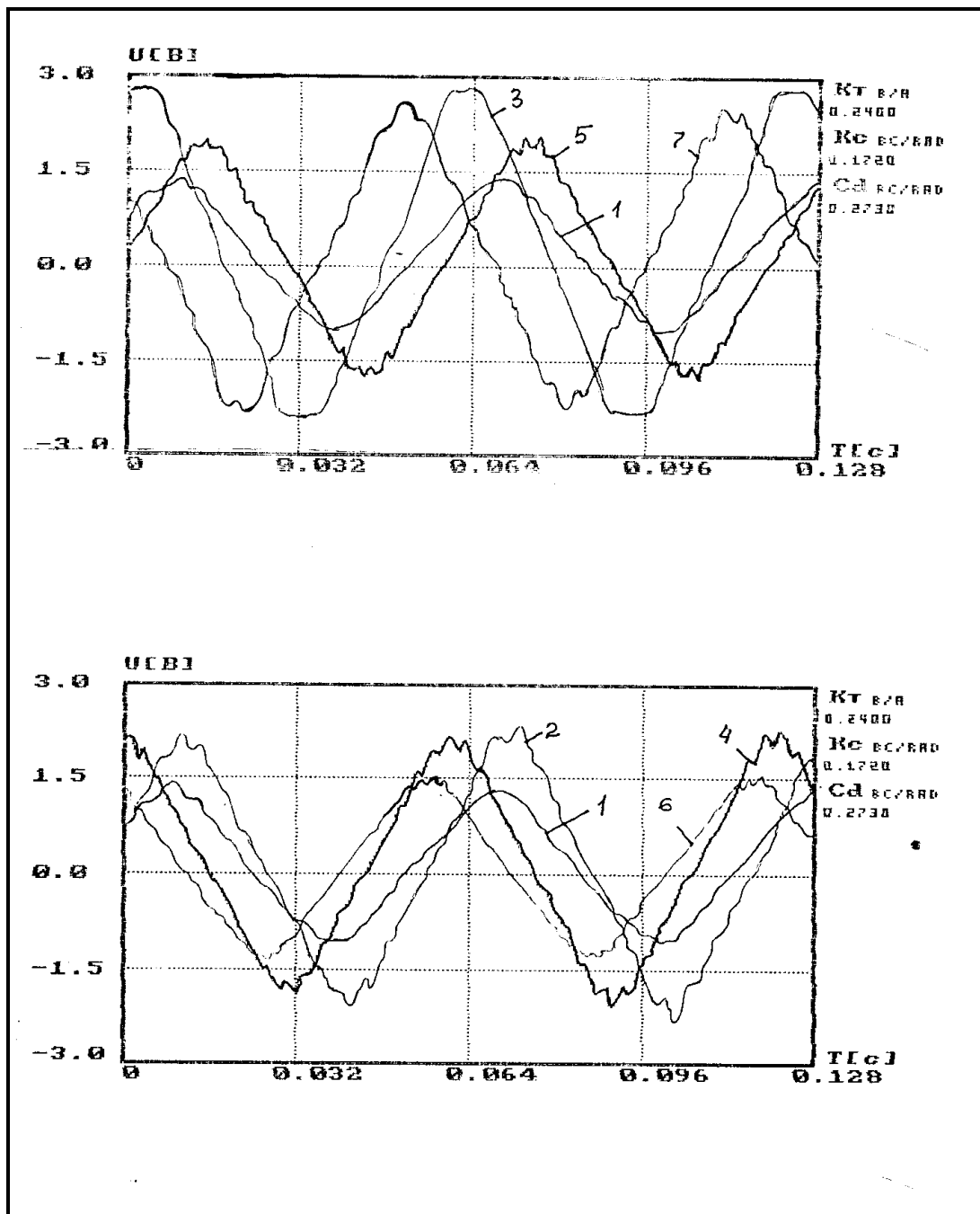


Рис.2.24. База фактических данных по результатам обучения

- **Симптомы** 1s1 отсутствует питание, 1s2 обрыв цепи питания, 1s3 обрыв в цепи обмотки.
- 2s1 переходное сопротивление, 2s2 витковое замыкание.
- 3s1 изменился ток, 3s2 изменилась частота сети, 3s3 изменилось магнитное сопротивление.

- 4s1 изменилась амплитуда питающей сети, 4s2 витковое замыкание, 4s3 изменилась частота сети. 4s4 изменилась нагрузка, 4s5 попадание постороннего предмета.

- 5s1 отсутствует ток в цепи, 5s2 разрыв кинематической цепи, 5s3 внешняя сила больше электромагнитной, 5s4 попадание постороннего предмета.

- 6s1 перекос в креплении, 6s2 увеличена сила трения, 6s3 попадание постороннего предмета, 6s4 велика жесткость пружины.

- **Правила**

- P1 Если: система находилась в рабочем состоянии и ток в обмотке протекал,

То: произошло отключение питания;

- P2 Если: система находилась в рабочем состоянии и ток в обмотке протекал, напряжение питания присутствует,

То: произошел обрыв в цепи обмотки катушки;

- P3 Если: система находилась в рабочем состоянии и ток в обмотке протекал и есть напряжение питания,

То: произошел обрыв в цепи питания;

- P4 Если: изменилось активное сопротивление и увеличился ток в обмотке,

То: произошло межвитковое замыкание;

- P5 Если: изменилось активное сопротивление и уменьшился ток в обмотке,

То: изменилось переходное сопротивление контактов;

- P6 Если: изменилось индуктивное сопротивление и увеличился ток, магнитное сопротивление цепи осталось без изменения,

То: изменилась частота напряжения питания;

- P7 Если: изменился ток, амплитуда питающего напряжения в норме, нагрузка неизменна, сопротивление неизменно,

То: попадание постороннего предмета,

Иначе: перекос в креплении исполнительного механизма;

- P8 Если: амплитуда и частота сети в норме, сопротивление неизменно, ток возрос,

То: изменилась внешняя нагрузка;

- P9 Если: исполнительный механизм неподвижен, ток в обмотке протекает,

То: кинематическая цепь разорвана,

Иначе: внешняя сила превышает электромагнитную;

- P10 Если: исполнительный механизм неподвижен, ток в обмотке не протекает,

То: обрыв электрической цепи;

- P11 Если: исполнительный механизм неподвижен, ток в обмотке протекает,

кинематическая цепь не разорвана и нет внешней силы,

То: попадание постороннего предмета;

- P12 Если: исполнительный механизм имеет малое перемещение,

То: попадание постороннего предмета

Иначе: перекос в креплении исполнительного механизма.

В базе обработки знаний эти правила представлены в виде логических уравнений вида:

*if*  $ls1 = a \ \& \ ls2 = b \ \& \ ls3 = c$  *then*  $f1 = p1$

*elseif*

$ls1 = a1 \ \& \ ls2 = b \ \& \ ls3 = c$  *then*  $f1 = p2$

*elseif*

*...end*

Переменные  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и т.д. в этих выражениях имеют конкретные числовые значения, определяемые по выражениям приведенным выше. Комбинации этих величин характеризуют вполне определенные состояния ЭМП.

## Глава 3. ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ

### 3.1. Анализ тестовых, управляющих и возмущающих сигналов

Для получения диагностической информации используются сигналы, получаемые от системы при функциональном диагностировании и формируемые в диагностическом комплексе при тестовых испытаниях.

Рассмотрим особенности построения микропроцессорных устройств формирования тестовых сигналов для выполнения процедур оценки фактического состояния электромеханических систем. Анализ электромеханического привода позволил установить, что наиболее распространенными сигналами являются: ступенчатый, импульсный, линейно нарастающий, синусоидальный. Эти сигналы можно охарактеризовать как простые.

Использование различных методов идентификации и диагностики ЭМС расширяет этот перечень. Дополнительно можно указать сигнал, являющийся случайной функцией времени и сигнал экспоненциальной формы. В практических ситуациях возникает необходимость использовать сигналы форма и параметры которого либо заданы дифференциальным уравнением, либо набором точек.

Сигналы можно разделить на управляющие, когда они приложены ко входу диагностируемой системы и возмущающие, когда подаваемые на нее сигналы вызывают нарушения в установившемся процессе движения. Чаще всего место приложения возмущающего сигнала - выход системы. Возмущающие сигналы, также как и сигналы управления, проанализируем с точки зрения микропроцессорных реализаций.

Для функционального диагностирования важны сведения о форме и параметрах сигналов формируемых системой управления. Анализ движений систем показывает, что управляющие сигналы претерпевают разрывы управления со сменой знаков входного воздействия, в приводах с позиционным управлением, в зависимости от диаграммы работы на вход задаются сигналы, длительность и амплитуда которых определяется величиной перемещения. Возможны и такие ситуации, что на вход привода задается сигнал, длительность которого определяется величиной перемещения на одну дискрету. В этом

случае имеет место импульсное входное воздействие. Этот сигнал по своим свойствам соответствует физическому представлению  $\delta$  - импульса, используемому в теории автоматического управления. При движении по окружности входное воздействие на привода задается в виде гармонического сигнала. При движении с постоянной скоростью подобное воздействие на привода представляет собой постоянную величину. Такой режим работы возможен в следящих системах или системах программного управления.

Эта группа сигналов представляет интерес при вводе измерительной информации и будет рассмотрена при построении подсистем ввода экспериментальных данных.

Вторая группа входных воздействий, как указывалось ранее, используется для контроля и идентификации параметров электромеханических систем. Эти сигналы имеют более сложную форму и характеризуются расширенным количеством параметров. В ряде случаев возникает необходимость синтеза формы сигнала, позволяющей проводить исследования ЭМС, с целью формирования оптимального вида движения. Некоторые из них могут быть заданы таблицей значений, так как не имеют аналитического описания или такое описание очень сложно.

Для анализа требований, предъявляемых к генератору типовых моделей сигналов, сведем сведения о них в таблицу и проанализируем управляемые переменные (табл.3.1). Из приведенной таблицы следует, что для построения генератора нужны устройства, позволяющие регулировать величину амплитуды сигнала, частоту, длительность, фазу, время и т.д.

Процесс формирования сигнала связан с представлением его параметров в цифровом виде и последующим преобразованием в непрерывную форму. Для сигнала представленного на рис.3.1 необходимо задавать амплитуду и период повторения. При этом выполняется квантование по уровню и дискретизация по времени. С точки зрения микропроцессорной реализации, целесообразно использовать равномерный шаг квантования, но при этом величина погрешности  $\varepsilon$  аппроксимации сигнала зависит от его периода.



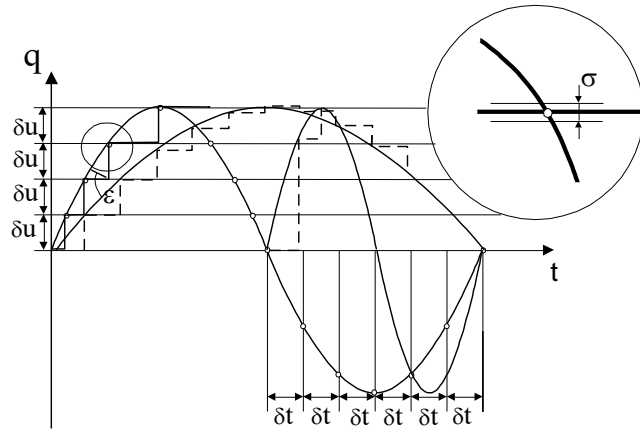


Рис. 3.1. К представлению непрерывного сигнала в дискретной форме

В этом случае, для сохранения равноточной аппроксимации необходимо изменять число дискрет. Конкретное число дискрет или величина шага квантования рассчитывается для каждого из сигналов, исходя из минимума погрешности представления, и будет рассмотрена ниже. Для преобразования сигнала из цифровой формы в непрерывную используются ЦАП.

Таблица 3.1

Сигналы, формируемые микропроцессорным генератором

| №  | Модель сигнала  | График сигнала | Регулируемые параметры |
|----|---|----------------|------------------------|
| S1 | $q(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ U, & t > 0 \end{cases}$               |                | U                      |
| S2 | $q(t) = \begin{cases} 0, &  t  > \tau/2 \\ U, &  t  < \tau/2 \end{cases}$ |                | U, tau                 |
| S3 | $q(t) = U \sin(\omega t + \varphi)$                                       |                | U, omega, phi, T       |

|    |   |  |              |
|----|---|--|--------------|
| S4 | $q(t)=k U ( t - \tau)$  |  | U, k, t, tau |
| S5 | $q(t) = \begin{cases} U, & t < 0 \\ Ue^{-\beta t}, & t > 0 \end{cases}$ |  | U, t, beta   |
| S6 | $q(t) = U[1 - 2/\pi (\omega t - \psi)]$                                 |  | U, t, Psi    |
| S7 | $q(t) = U(1 - \omega t/Q)$  |  | U, t, Q      |

Эти элементы необходимы как для задания амплитуды сигнала, так и для задания формы сигнала. Учитывая это обстоятельство, представим формируемый сигнал в следующем виде:

$$q(n) = \frac{mU}{2^\alpha - 1} \varphi(t)$$

Амплитуда сигнала задается в виде кода, величина которой равна:

$$U = \frac{U_{ref}}{2^{n-1}} \sum_{i=0}^{m-1} m_i 2^i,$$

где  $U_{ref}$  - опорное напряжения,  $n$  - число разрядов преобразователя,  $m$  - двоичные веса, задающие величину амплитуды.

Следующий параметр – форма сигнала, получаемая табулированием единичной функции (в данном случае синусоидального сигнала) с представлением в двоичном коде по соотношению:

$$y_i = \sum_{i=0}^{ent(\log_2(\text{Sin} \alpha_{\max}) + 0.5)} \gamma_i 2^i.$$

Число разрядов для представления аргумента табулируемой функции вычисляют, исходя из максимального значения и приведения его к формату шины данных микропроцессора:

$$\alpha_i = \text{ent}[\log_2(k \cdot y_{\max}) + 0.5].$$

В этом выражении  $k$ - коэффициент преобразования функции, определяющий разрядность представления чисел,  $\alpha_i$ - число двоичных разрядов для представления функции.

Последнее позволяет установить разрядность адресного пространства запоминающего устройства:

$$m_i = 2^{\alpha} - 1.$$

Задание единичной амплитуды определяется соотношением аналогичным (4.1), т.е.

$$A = \frac{U}{2^{n-1}} \sum_{i=0}^{m-1} m_i 2^i,$$

где  $\alpha$ - число разрядов преобразователя,  $m$  - двоичные веса определяющие величину амплитуды, при задании формы сигнала.

Формирование временного интервала требует использование счетчика с емкостью определяемой минимальной и максимальной частотами развертки периодического сигнала.

Частота сигнала опорного генератора должна быть в  $k$ -раз больше, т.к. получение одного периода требует  $N$  импульсов.

Обобщенная структура генератора при таком подходе представлена на рис.3.2. Основными элементами генератора являются: устройство памяти, объем которого определяется рядом факторов, которые будут рассмотрены ниже; генератор переменной, регулируемой частоты; регулятор амплитуды; устройство, формирующее набор сигналов под управлением микроЭВМ, обеспечивающее взаимодействие всех элементов схемы генератора. Принцип работы генератора заключается в загрузке устройства памяти сигналом нужной формы. Если это периодический сигнал, то значение частоты задается генератором переменной частоты. Амплитуда сигнала устанавливается регулятором амплитуды. Затем разрешается считывание значений, хранимых в запоминающем устройстве и выдача их на привода. В зависимости от схемной реализации выходной сигнал представляется в цифровой или в аналоговой форме. Если необходимо контролировать выходные параметры сигнала генератора, то в схеме предусмотрен

блок аналоговой информации с выходной шины генератора, т.е. осуществляется обратная связь.

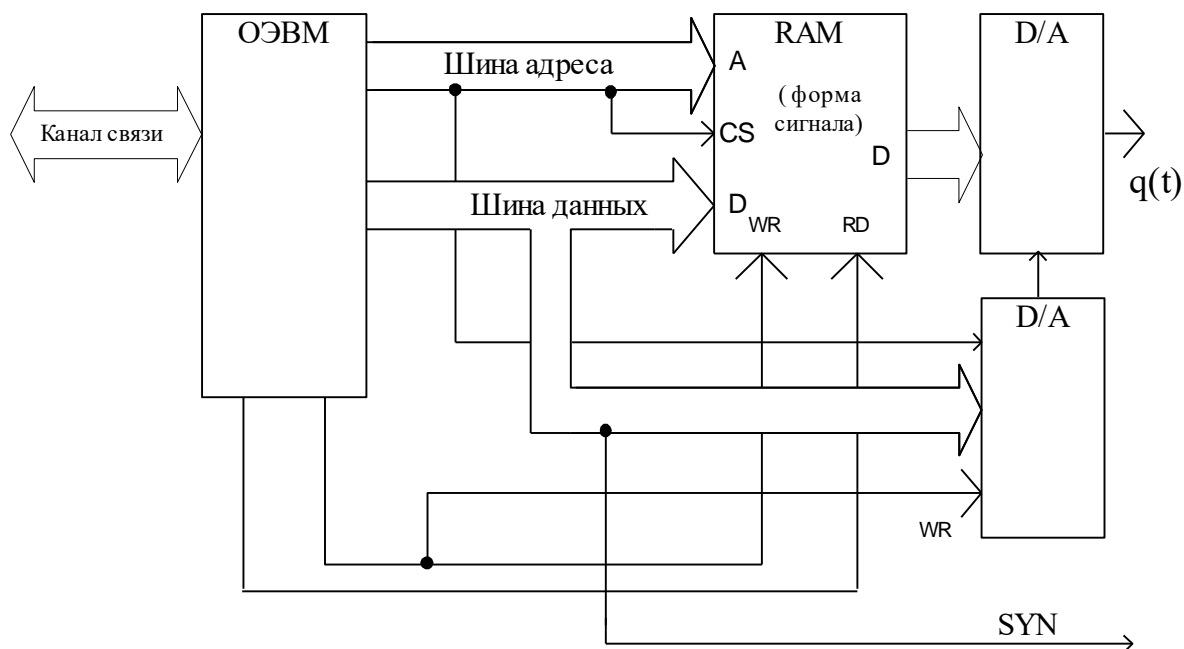


Рис.3.2. Обобщенная структурная схема микропроцессорного Генератора

Алгоритм работы генератора определяется особенностями его аппаратной реализации. Последнее также определяется требованиями, предъявляемыми к параметрам формируемого сигнала, а также способом представления информации.

Приведенные в табл. 3.1 сигналы в равной степени могут быть использованы для идентификации и диагностики ЭМС по возмущению.

### 3.2. Формирование сигнала со случайными характеристиками

Для определения параметров электромеханических систем используются сигналы со спектром частот  $+\infty$  до  $-\infty$  и одинаковой спектральной плоскостью:  $S(\omega) = N$ .

Для реализации реального процесса необходимо ограничить спектральную плотность. Таким образом, мы будем иметь дело с сиг-

налом по свойствам, приближающимся к белому шуму. Для него характерна спектральная плотность:

$$\begin{cases} S(\omega) = N, & \text{при } |\omega| < \omega_{\Pi} \\ S(\omega) = 0, & \text{при } |\omega| > \omega_{\Pi} \end{cases},$$

где  $\omega = \pi \Delta f$ .

Для аппроксимации этой зависимости воспользуемся следующим выражением:

$$S(\omega) = \frac{N}{1 + \omega^2 T^2},$$

и введя в рассмотрение коэффициент, определяющий ширину полосы частот последнее выражение примет вид:

$$S(\omega) = \frac{\gamma^2 N}{\gamma^2 + \omega^2}. \quad (3.1)$$

Проинтегрируем (4.9) по всем частотам, в результате чего получим значения дисперсии:

$$D = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} N(1 + \omega^2 T^2)^{-1} d\omega = \frac{N}{2T}, \quad (3.2)$$

и значение корреляционной функции для этого процесса:

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2\gamma D}{\gamma^2 + \omega^2} e^{j\omega\tau} d\omega = D e^{-\gamma|\tau|}. \quad (3.3)$$

Величину выходного сигнала, в нашем случае, представим напряжением, амплитуда которого определяется программой, генерирующей случайные числа. В свою очередь, выработанные генератором случайных чисел значения нормируются, что позволяет сформировать максимальный уровень выходного сигнала в пределах  $\pm 5\text{В}$ .

Полученные значения случайных чисел загружаются в память генератора. Частота выдачи сигналов изменяется программно в нужном диапазоне. Далее рассчитываем спектральную плотность, дисперсию и корреляционную функцию по выражениям (3.1), (3.2), (3.3). Полученные таким образом количественные характеристики процесса могут быть использованы в задачах идентификации без дополнительного измерения входного сигнала. Более того, свойства этого сигнала можно изменить по желанию на этапе подготовки к исследованиям.

Построение генератора случайного процесса сопряжено с множеством трудностей. Для получения более достоверной формы сигнала с учетом ограниченной полосы частот можно рекомендовать следующий подход.

Формирование случайного процесса основывается на записи реального процесса с источника теплового шума, в качестве которого используется датчик тока электропривода (рис.3.3).

Схема включает в себя электропривод с датчика тока которого снимается сигнал. Через усилитель А сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя. АЦП работает непрерывно, т.к. его выходной сигнал "Готов" через элемент задержки  $DL$ , соединен с входом "Пуск". Использование элемента задержки позволяет осуществить запись преобразованной информации в блок памяти  $RAM$ .

Процедура записи осуществляется с использованием сигнала готовности формируемого АЦП и загрузки счетчика новым значением кода. Увеличение адреса происходит каждый раз, как только АЦП завершит цикл преобразования и сформирует сигнал "Пуск". Для получения параметров сигнала, приближающегося по своим свойствам к "белому шуму" необходимо, чтобы время преобразования АЦП было минимальным. Если использовать монолитные АЦП, то для поставленной задачи наиболее подходящим является АЦП серии 1107. Для него время преобразования составляет примерно 20 наносекунд, что позволяет реализовать частотный спектр в пределах до 5-10 МГц.

Определение параметров сигнала, в данном случае, производится следующим образом. По записанным в памяти ЭВМ значениям, рассчитываем корреляционную функцию с использованием следующего выражения

$$R(\tau) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} x_n x_{n-m}, \quad (3.4)$$

где  $N$ —число интервалов равномерно отстоящих друг от друга на величину  $\Delta t$ ,

$$\Delta t = TN^{-1}, \tau = m\Delta t.$$

Определить дисперсию, также как и корреляционную функцию, можно и по введенному в микропроцессор массиву экспериментальных данных

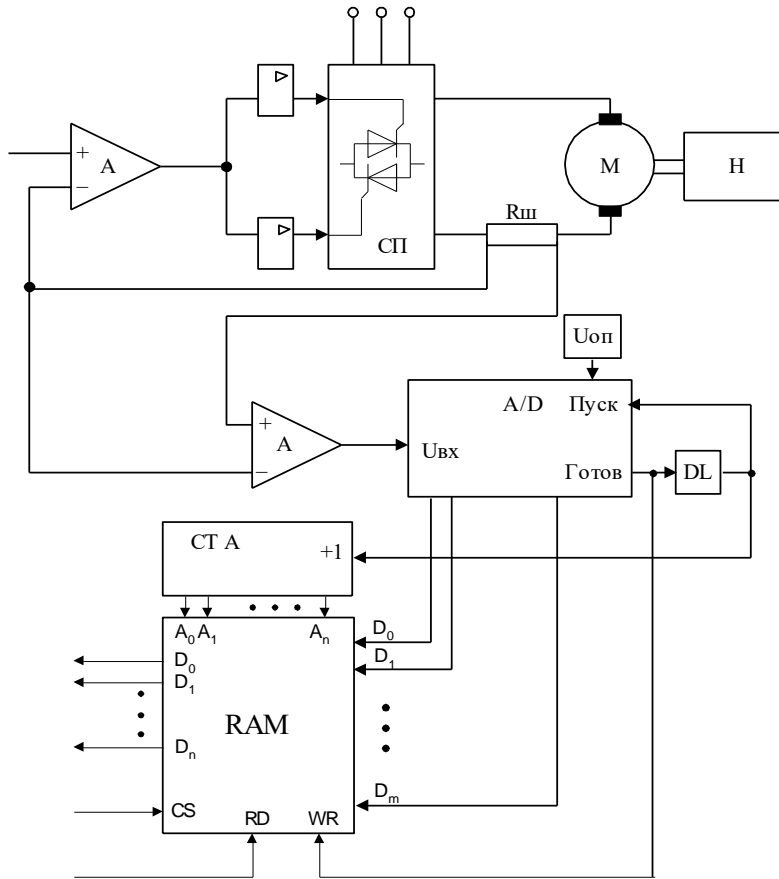


Рис.3.3. Структурная схема формирования случайного сигнала

$$\check{D} = \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=1}^N x_n - \check{m}_0 \right]^2, \quad (3.5)$$

где  $\check{m}_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n$ .

По вычисленным значениям корреляционной функции и дисперсии определяют спектральную плотность  $S$ . Параметры случайного сигнала в дальнейшем используются при диагностике и в задачах идентификации параметров ЭМС.

Расчет параметров микропроцессорной системы в этом случае следует проводить следующим образом.

С точки зрения применения МП, при диагностике необходимы алгоритмы вычисления оценок статистических характеристик экспериментальных данных методами, которые обеспечивают решение задач в реальном масштабе времени и требуют для своей реализации аппаратуру, оперирующую с малоразрядными числами. При этом

сигналы представляются в виде последовательности числовых значений  $\{x(t)\}, i = (\overline{1, n})$ . Соседние точки разделены интервалом, равным шагу квантования по времени  $\Delta t$ . Размер выборки должен быть определен по возможности в соответствии с заданной точностью оценок корреляционных функций.

Для реализации алгоритмов (3.4), (3.5) прежде всего требуется определить необходимый объем памяти, разрядность и быстродействие МПС. Очевидно, что при одновременном вычислении нескольких корреляционных функций для нескольких входных–выходных сигналов исследуемого объекта в реальном масштабе времени необходимо запоминание  $q_{\max}+1$  цифровых значений каждого сигнала и столько же промежуточных значений для каждой корреляционной функции. Следовательно, для этих целей необходимо располагать объемом памяти, бит:

$$O_{\text{вх}} = k_c L_{\text{вх}} (q_{\max} + 1),$$

$$O_{\text{п}} = k_k L_{\text{п}} (q_{\max} + 1),$$

где  $L_{\text{вх}}$  – разрядность цифровых значений случайных процессов,  $L_{\text{п}}$  – разрядность, необходимая для запоминания промежуточных и окончательных результатов вычислений.

Максимальное число разрядов для отображения промежуточных и окончательных результатов в двоичной системе счисления  $L_{\text{п}}$  при обработке информации, представленной в виде целых чисел, можно определить по условию

$$L_{\text{п}} = \max \left| \log_2 \left( \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} x_n x_{n-m} \right) \right|$$

Если исходить из того, что максимальное число разрядов для отображения произведений двух  $L_{\text{вх}}$  разрядных чисел можно принять равным  $2L_{\text{вх}}$ , то для накопления таких произведений потребуется разрядность, определяемая по условию:

$$L_{\text{п}} = \left| \log_2 n + 2L_{\text{вх}} \right|$$

Условие определения общего объема памяти примет вид, бит:

$$O_{\text{п}} = \left| (q_{\max} + 1) \left[ k_c L + k_k (\log_2 n + 2L_{\text{вх}}) \right] \right|$$

Таким образом, при вычислении корреляционных функций по выражениям (3.4, 3.5) число разрядов для осуществления обработки информации в двоичной системе счисления, а также для запоминания



промежуточных результатов зависит от объема выборок случайных процессов. При этом надо учесть, что в наиболее простых МП обработка упрощается, если все числа рассматриваются как целые.

Для предупреждения переполнения разрядной сетки широко применяются масштабные коэффициенты, изменяющиеся в зависимости от значения числа. Однако с увеличением длины слова для аппаратуры обработки все труднее становится выбор этих масштабных коэффициентов, а при обработке сигналов многомерных объектов в реальном масштабе времени, когда требуется одновременное определение большого числа статистических характеристик, необходимость использования процедуры масштабирования приводит к серьезным трудностям. При выборе алгоритмов вычисления, кроме описанного выше, также необходимо учесть, что для экономии средств в состав основных команд большинства МП и недорогих микро-ЭВМ не включены операции умножения и деления, последние выполняются по подпрограммам, что приводит к определенным сложностям реализации алгоритмов.

Анализ алгоритмов определения оценок статистических характеристик, а также многочисленные эксперименты показывают, что точность полученных результатов, а также требования к длине разрядной сетки, объему памяти и быстродействию МП значительно различаются в зависимости от алгоритмов обработки, положенных в основу определения искомых оценок.

### 3.3. Формирование сигналов произвольной формы

Рассмотрим построение микропроцессорного генератора формирующего сигналы произвольной формы. в этом случае желаемая форма сигнала может быть задана аналитически или таблицей значений. в общем виде описание сигналов формируемых мпг представим матрично–векторными уравнениями вида:

$$\dot{g} = Ag + Bu, \quad (3.6)$$

$$q = Cg, \quad (3.7)$$

где  $g$ - вектор состояния размерности  $l(g \in R^l)$ ,  $A, B, C$  - матрицы постоянных коэффициентов.

Если для заданного аналитически сигнала решение не может быть получено в классе линейных уравнений, то необходимо воспользоваться разложением на сумму элементарных, обладающих известными свойствами:

$$g(t) = \sum_{k=1}^n b_k g_k(t). \quad (3.8)$$

В выражении (3.8)  $b_k$ - матричные коэффициенты аппроксимации,  $g_k(t)$  - базисные вектор функции, являющиеся решением известных линейных дифференциальных уравнений, т.е. выходных переменных МПГ аналогичных (3.6) и (3.7).

$$\dot{g}_k = A_k g_k, \quad (3.9)$$

$$q_k = C_k g_k. \quad (3.10)$$

Функции  $g_k(t)$  находят таким образом, чтобы получить минимальную норму вектора ошибки

$$\Delta(t) = g(t) - \sum_{k=1}^n b_k g_k(t)$$

или при заданной норме ошибки получить минимальное число членов разложения.

В качестве нормы вектора принимается квадратичная, для которой матричные коэффициенты находятся методом наименьших квадратов.

Из (3.8, 3.9, 3.10) получим описание МПГ в виде (3.6, 3.7)

$$g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & A_n \end{bmatrix}, \quad C = [c_1 c_2 \dots c_n]$$

Микропроцессорный генератор способен формировать сигналы имеющие случайную составляющую. Для этого случая описание вида сигнала можно задать аналогично (3.6, 3.7), но с учетом составляющей шума, т.е.

$$\begin{aligned} \dot{g}(t) &= Ag(t) + Bu(t) + D\xi(t), \\ q(t) &= Cg(t). \end{aligned}$$

Положив в (4.24)  $B=0$ , получим

$$\begin{aligned}\dot{g}(t) &= Ag(t) + D\xi(t), \\ q(t) &= Cg(t).\end{aligned}$$

В этих уравнениях  $A, D, C$  матрицы определяющие процесс  $q(t)$ ,  $g(t)$  - вектор состояния,  $\xi(t)$  - белый шум.

Матрицы дифференциальных уравнений могут быть получены [175] если известна, например спектральная плотность  $S_g(\omega)$  процесса  $g(t)$  определяемая

$$S_g(\omega) = |W_g(j\omega)|^2 S_\xi(\omega),$$

где  $W_g(j\omega)$  - АФЧХ производящей системы,  $S_\xi(\omega)$  - спектральная плотность входного сигнала.

Положив, что  $S_g(\omega)$  аппроксимирована дробно-рациональной функцией, допускающей факторизацию

$$S_g(\omega) = S(j\omega)S(-j\omega). \quad (3.11)$$

Учитывая также, что для белого шума интенсивности  $N$  спектральная плотность  $S_\xi(\omega) = N$  из (3.11) получим:

$$W_g(j\omega) = \frac{S(j\omega)}{\sqrt{N}}$$

и искомая передаточная функция

$$W_g(p) = \frac{S(p)}{\sqrt{N}}.$$

Представив  $W_g(p)$  в виде отношения двух полиномов

$$W_g(p) = \frac{d_1 p^{n-1} + \dots + d_{n-1} p + d_n}{p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n},$$

определим параметры сигнала формируемого МПГ

$$g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_n & -a_{n-1} & \dots & -a_1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = [c_1 c_2 \dots c_n].$$

Для описания случайных процессов удобно использовать в качестве конкретных моделей процессы Баттерворта и Леви. Первые

представляют спектральную плотность мощности в виде полинома Баттерворта вида:

$$S_g(\omega) = \frac{\mu(k)\sigma^2 g}{1 + \left(\frac{\omega}{\Omega_c}\right)^{2k}},$$

где  $\omega \geq 0$ ,  $k=1,2,\dots,\infty$ ,  $\mu(k) = \frac{4k}{\Omega_c} \text{Sin} \frac{\pi}{2k}$ .

Второй процесс описывает спектральную плотность мощности в виде полинома

$$S_g(\omega) = \frac{4\Omega_c^{2k-1}(2k-2)!\sigma^2}{(2k-3)!(\Omega_c^2 + \omega^2)^k},$$

где  $\omega \geq 0$ ,  $k=1,2,\dots,\infty$ .

В литературе приведены таблицы, описывающие характеристики процессов Баттерворта и Леви, которые могут быть использованы для построения алгоритмов работы МПГ при формировании случайных процессов.

Рассмотрим в качестве примера реализацию МПГ на основе решения дифференциального уравнения вида:

$$a_0\ddot{x} + a_1\dot{x} + a_2 = f(q).$$

Задавая различные значения коэффициентов  $a_i$  и меняя правую часть уравнения, получим различные виды сигналов (процессов). Сведения о некоторых из них приведены в табл.3.2.

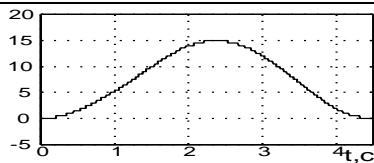
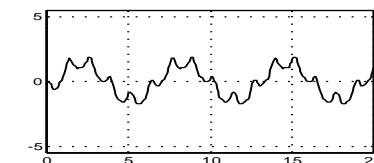
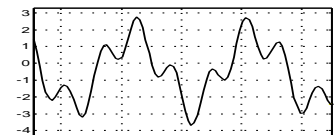
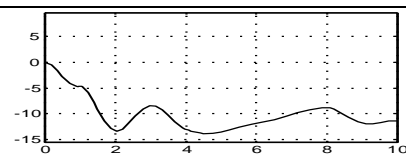
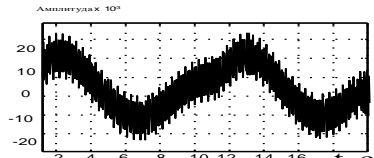
### 3.4. Определение параметров сигналов

Формирование сигналов осуществляется в ЭВМ, а затем для получения аналогового сигнала используется цифроаналоговый преобразователь. В этом случае, по имеющемуся ряду чисел восстанавливается непрерывный сигнал. Этот процесс можно рассматривать как

процесс аппроксимации, так как непрерывный сигнал может быть восстановлен только по предшествующим значениям выборок.

Таблица 3.2

Пример реализации сигналов, заданных дифференциальным уравнением

| Значение коэффициентов  | Вид сигнала  |
|---|--|
| $a_0 = 0.45$ $f(q)$ =сумма сигналов<br>$a_1 = 0.0025$ синусоидальный,<br>$a_2 = 1$ пилообразный, скачек |    |
| $a_0 = 0.1$ $f(q)$ =сумма сигналов<br>$a_1 = 0.5$ синусоидальный,<br>$a_2 = 1$ с разными частотами      |    |
| $a_0 = 0.45$ $f(q)$ =сумма сигналов<br>$a_1 = 0.0025$ синусоидальный<br>$a_2 = 1$ пилообразный          |   |
| $a_0 = 0.11$ $f(q)$ =сумма сигналов<br>$a_1 = 0.1$ синусоидальный,<br>$a_2 = 1$ пилообразный, скачек    |  |
| $a_0 = 0.11$ $f(q)$ =сумма сигналов<br>$a_1 = 0.1$ синусоидальный,<br>$a_2 = 1$ пилообразный            |  |

Известный метод получения требуемой аппроксимации основан на разложении функции  $q(t)$  в ряд на интервале между моментами выборки  $nT$ ,  $(n+1)T$ , т.е.

$$q_n(t) = q(nT) + \frac{\dot{q}(nT)}{1!}(t-nT) + \frac{\ddot{q}(nT)}{2!}(t-nT)^2 + \dots, \quad (3.12)$$

где  $q_n(t) = q(t)$ ,  $\dot{q}_n(t) = \frac{dq(t)}{dt}$ ,  $\ddot{q}_n(t) = \frac{d^2q(t)}{dt^2}$ ,  $nT \leq t < (n+1)T$ .

Для того, чтобы вычислить производную  $q(t)$  необходимо воспользоваться дискретными значениями  $q(nT)$ . Поэтому:

$$\dot{q}_n(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{1}{T} [q(nT) - q(n-1)T],$$

- значение первой производной.

Аппроксимированное значение второй производной  $q(t)$  при  $t=nT$  равно:

$$\ddot{q}_n(t) = \frac{d^2q(t)}{dt^2} = \frac{1}{T} [\dot{q}(nT) - \dot{q}(n-1)T],$$

или

$$\ddot{q}_n(nT) = \frac{1}{T^2} [q(nT) - 2q(n-1)T + q(n-2)T].$$

На практике используются чаще всего устройства, которые в основе построения используют только первый член разложения (3.12). Использование производных более высокого порядка наталкивается на серьезные трудности, связанные со сложными схемотехническими решениями.

Поскольку формирование параметров сигнала осуществляется на этапе предварительной подготовки, то в качестве критерия оценки точности можно использовать показатель равномерного приближения. При этом погрешность восстановления определяется:

$$\varepsilon_n = \max_n |q(t) - q^*(t)|.$$

Этот показатель позволяет учесть все изменения в восстановленном сигнале, включая и короткие выбросы. Однако в каждом конкретном случае вид показателя качества может быть использован любой, в наибольшей мере соответствующий заданным характеристикам процесса преобразования.

С точки зрения программно-аппаратной реализации генератора сигналов, целесообразно использовать постоянный шаг квантования по времени, однако, при достижении приемлемой точности, переменный шаг квантования может сократить объем памяти для запоминания формы сигнала.

Рассмотрим выбор периода дискретизации для сигналов, приведенных в таблице, при условии, что используется экстраполятор нулевого порядка, а шаг дискретизации равномерный.

Выбор интервала дискретизации по времени свяжем с теоремой Котельникова -Шеннона <sup>2</sup>. В соответствии с этой теоремой, если непрерывная функция  $q(t)$  удовлетворяет условиям Дирихле (ограничена, кусочно - непрерывна и имеет конечное число экстремумов) и ее спектр ограничен некоторой частотой  $f_m$  то существует такой максимальный интервал  $\Delta_T$  между отсчетами, при котором имеется возможность безошибочно восстановить дискретизируемую функцию  $q(t)$  по дискретным отсчетам. Этот максимальный интервал:

$$\Delta_T = \frac{\pi}{\omega_m} = \frac{1}{2f_m}.$$

Действительно, для непрерывной функции  $q(t)$  можно записать прямое и обратное преобразование Фурье:

$$\begin{aligned} S(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} q(t) e^{-j\omega t} dt, \\ q(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \end{aligned} \quad (3.13)$$

По условиям теоремы спектр функции  $q(t)$  ограничен частотой  $\omega_m$ , т.е.

$$\begin{aligned} S(j\omega) &\neq 0 && \text{при} && -\omega_m \leq \omega \leq \omega_m \\ S(j\omega) &= 0 && \text{при} && |\omega| > \omega_m. \end{aligned}$$

Тогда выражение (3.13) можно представить в виде

$$q(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} S(j\omega) e^{-j\omega t} d\omega. \quad (3.14)$$

Спектр  $S(j\omega)$  функции  $q(t)$  с учетом соотношений (3.14) можно рассматривать как функцию, заданную на интервале  $(-\omega_m, \omega_m)$ . Разложим функцию на этом интервале в ряд Фурье:

$$S(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j \frac{\pi n \omega}{\omega_m}}, \quad (3.15)$$

где

$$C_n = \frac{1}{2\omega_m} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} S(j\omega) e^{-j \frac{\pi n \omega}{\omega_m}} d\omega \quad (3.16)$$

---

<sup>2</sup> Дядюнов А.Н., Онищенко Ю.А., Сенин А.И. Адаптивные системы сбора и передачи аналоговой информации – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.

Далее обратимся к выражению (3.14) и положим  $t = -n\Delta_T$ , где  $\Delta_T = \pi/m$ . Тогда

$$q(-nT) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} S(j\omega) e^{-j\frac{\pi n\omega}{\omega_m}} d\omega \quad (3.17)$$

Умножим обе части выражения (3.17) на  $\pi/m$

$$\frac{\pi}{\omega} q(-nT) = \frac{1}{2\omega_m} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} S(j\omega) e^{-j\frac{\pi n\omega}{\omega_m}} d\omega$$

Сравнивая это выражение с соотношением (3.16), получим

$$C_n = \frac{\pi}{\omega} q(-n\Delta_T) \quad (3.18)$$

Подставляя вместо  $C_n$  полученное выражение (3.18) в формулу (3.15), имеем:

$$S(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\pi}{\omega_m} q(-n\Delta_T) e^{j\frac{\pi n\omega}{\omega_m}} \quad (3.19)$$

Подставим вместо  $S(j\omega)$  правую часть соотношения (3.19)

$$q(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} e^{j\omega t} d\omega \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\pi}{\omega_m} q(-n\Delta_T) e^{j\frac{\pi n\omega}{\omega_m}} =$$

$$\frac{1}{2\omega_m} \sum_{n=-\infty}^{\infty} q(n\Delta_T) \int_{-\omega_m}^{\omega_m} e^{j\omega(t-n\Delta_T)} d\omega$$

Но

$$\int_{-\omega_m}^{\omega_m} e^{j\omega(t-n\Delta_T)} d\omega = \frac{1}{j(t-n\Delta_T)} e^{j\omega(t-n\Delta_T)} \Big|_{-\omega_m}^{\omega_m} = \frac{2\text{Sin}[\omega_m(t-n\Delta_T)]}{t-n\Delta_T}$$

Окончательно получим:

$$q(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} q(n\Delta_T) \frac{\text{Sin}[\omega_m(t-n\Delta_T)]}{\omega_m(t-n\Delta_T)} \quad (3.20)$$

Из этого выражения следует, что непрерывная функция  $q(t)$ , имеющая спектр, ограниченный частотой  $\omega_m$ , может быть представлен в виде суммы, каждое слагаемое которой выражается функцией

$$y(t) = \frac{\text{Sin}[\omega_m(t-n\Delta_T)]}{\omega_m(t-n\Delta_T)}$$

Эта функция называется функцией отсчета. Рассмотрим следующие свойства функции отсчета:



- в момент времени  $t=n\Delta_T$  функция отсчетов достигает своего наибольшего значения, равного единице;

- в моменты времени, кратные  $\Delta_T$  ( $t=(n\pm l)\Delta_T$ , где  $l$ -любое число), функция отсчетов обращается в нуль.

Из формулы (3.20) следует, что сумма в каждый  $n$ -й момент времени определяется только одним  $n$ -ым слагаемым, так как все остальные слагаемые в этот момент времени обращаются в нуль. Другими словами, функция  $q(t)$  в дискретные моменты времени может быть представлена своими дискретами  $x(n\Delta_T)$ . Внутри же промежутка  $\Delta_T$  функция  $q(t)$  определяется всеми слагаемыми. С другой стороны, если заданы дискреты  $x(n\Delta_T)$ , то функция  $q(t)$  может быть полностью восстановлена суммированием функций  $x(n\Delta_T)y(t)$ . Для восстановления функции  $q(t)$  необходимо подать на вход фильтра с верхней границей пропускания  $\omega_m$  импульсов типа  $\delta$ -функции с амплитудой, соответствующей значениям непрерывной функции в точках отсчета и следующих друг за другом с периодом  $\Delta_T$ .

На практике использования теоремы В.А. Котельникова наталкиваемся на ряд трудностей. Во-первых, представление непрерывной функции в виде дискрет через промежуток времени  $\Delta_T$  не позволяет воспроизводить процесс, развивающийся по времени. Действительно, каждая новая дискрета  $q(n\Delta_T)$  при восстановлении меняет всю непрерывную функцию на всем предшествующем интервале за исключением отсчетных значений. Во-вторых, реальный процесс, который описывается функцией  $q(t)$ , имеет, как правило, начало и конец. Но ограниченная во времени функция не может иметь ограниченный спектр и, следовательно, теорема В.А. Котельникова для такого сигнала не применима. Поэтому теорему В.А. Котельникова можно рассматривать как приближенную для реальных сигналов в том смысле, что можно ввести разумные допущения на ширину реального спектра. Эту ширину реального спектра можно определить как интервал частот, вне которого спектральная плотность меньше некоторой заданной величины.

Если в выражении (3.20) ограничиться конечным числом членов, то это приводит к появлению ошибки:

$$\varepsilon = \left| q(t) - \sum_{-k}^k q(n\Delta_T) \frac{\text{Sin}[\omega_m(t-n\Delta_T)]}{\omega_m(t-n\Delta_T)} \right|$$

Не приводя здесь подробных рассуждений, отметим, что для  $\varepsilon$  справедливо следующее соотношение:

$$\varepsilon \leq \frac{\sqrt{2}}{\pi} P |\sin \pi f_m t| \sqrt{\frac{1}{f_m} \frac{T}{T^2 - t^2}} = \varepsilon^* P,$$

где  $P$  - полная энергия, которую имеет сигнал  $q(t)$ ;  $(-T, T)$ -интервал, квантования сигнала  $q(t)$ ;  $\varepsilon^* = \frac{\sqrt{2}}{\pi} |\sin \pi f_m t| \sqrt{\frac{1}{f_m} \frac{T}{T^2 - t^2}}$  - коэффициент ошибки;  $f_m = \frac{1}{2\pi} \omega_m$ .

Для определения граничной частоты  $f_m$  можно поступить следующим образом. Для рассматриваемого сигнала  $q(t)$  ограничим его спектр значением  $f_m$ , которое определим из условия, что энергия суммы отброшенных гармоник не превышает энергии ошибки. Тогда полную энергию  $P_\varepsilon$  сигнала  $q(t)$  можно представить следующим образом:

$$P_\varepsilon = P_m + P_0 \quad (3.21)$$

где  $P_m$  - энергия сигнала, ограниченного частотой  $f_m$ ;  $P_0$  - энергия отброшенных гармоник.

Полную энергию  $P_\varepsilon$  сигнала  $q(t)$  можно найти по его спектральной плотности:

$$P_\varepsilon = \int_0^\infty [q(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S(\omega) S^*(\omega) d\omega, \quad (3.22)$$

где  $S^*(\omega)$ -функция, комплексно сопряженная с функцией  $S(\omega)$ .

Аналогично, энергия  $P_m$  сигнала  $q(t)$ , ограниченного частотой  $f_m$ .

$$P_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_m} S(\omega) S^*(\omega) d\omega \quad (3.23)$$

Пусть ошибка восстановления сигнала по его квантованным значениям не превышает величины  $(\pm n\Delta P)$  (где  $n$ - коэффициент, а  $\Delta P$  - шаг шкалы уровней). Если допустить, что любое значение ошибки в пределах заданной величины  $(\pm n\Delta P)$  равновероятно, то среднее значение энергии ошибки можно представить в виде:

$$P_0 = \frac{1}{2n\Delta P} \int_{-n\Delta P}^{n\Delta P} q^2 dq = \frac{(n\Delta P)^2}{3}$$

Аналогично, если положить, что любое значение сигнала  $q(t)$  в пределах от 0 до  $k$  (где  $k$  - максимальное число шагов шкалы уровней) равновероятно, то среднее значение полной энергии

$$P_s = \frac{1}{k\Delta P} \int_0^{k\Delta P} q^2 dq = \frac{(k\Delta P)^2}{3}$$

Из выражений (3.22), (3.23) следует, что

$$P_0 = \frac{n^2}{k^2} P_s \quad (3.24)$$

где  $\Delta = \frac{n}{k}$  относительная ошибка.

Подставляя выражение (3.24) в формулу (3.21), получим:

$$(1 - \Delta^2) P_s = P_m \quad (3.25)$$

Если в уравнение (3.25) заменить  $P_s$ ,  $P_m$  их значениями, вычисленными для заданного сигнала  $q(t)$  соответственно по формулам (3.22), (3.23) то полученные соотношения будут определять связь между относительной ошибкой  $\Delta$  и частотой  $f_m$ , которая и используется для выбора граничной частоты  $f_m$ .

Рассмотрим конкретный пример. Пусть генератор формирует сигнал вида  $\varepsilon(t) = Ae^{-\beta t}$ , где  $A$  - амплитуда,  $\beta = \frac{1}{\tau}$  ( $\tau$  - постоянная времени). Требуется определить частоту квантования непрерывно изменяющегося экспоненциального сигнала при заданной ошибке воспроизведения  $k\Delta P$  и заданной относительной ошибке  $\Delta = n/k$ .

Граничную частоту квантования  $f_m$  определим из условия, при котором энергия суммы отброшенных гармоник не превышала бы энергии ошибки.

Спектральная плотность для сигнала

$$S(\omega) = \frac{A}{\sqrt{\beta^2 + \alpha^2}} e^{-j\arctan \frac{\omega}{\beta}}$$

Тогда

$$P_s = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \left[ \frac{A}{\sqrt{\beta^2 + \alpha^2}} e^{-j \arctg \frac{\omega}{\beta}} \frac{A}{\sqrt{\beta^2 + \alpha^2}} e^{j \arctg \frac{\omega}{\beta}} \right] d\omega =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{A^2}{\beta^2 + \alpha^2} d\omega = \frac{A^2}{4\beta}$$

Аналогично, энергия  $P_m$  сигнала  $\varepsilon(t)$ , ограниченного частотой  $f_m$ ,

$$P_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_m} \frac{A^2}{\beta^2 + \alpha^2} d\omega.$$

Подставим полученные выражения для  $P_s$ ,  $P_m$  в уравнение (3.25)

$$(1 - \Delta^2) \frac{A^2}{4\beta^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_m} \frac{A^2}{\beta^2 + \alpha^2} d\omega.$$

После интегрирования получим

$$(1 - \Delta^2) \frac{A^2}{4\beta^2} = \frac{A^2}{2\pi \beta} \arctg \frac{\omega_m}{\beta}.$$

Из этого выражения следует, что

$$\frac{\omega_m}{\beta} = \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} (1 - \Delta^2) \quad (3.26)$$

Подставим в соотношение (3.26) вместо  $\beta = \frac{1}{\tau}$ ,  $\omega_m = 2\pi f_m$  и, разрешая полученное уравнение относительно  $f_m$ , окончательно имеем

$$f_m = \frac{1}{\tau} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} (1 - \Delta^2).$$

В соответствии с теоремой В.А. Котельникова, заключаем, что частота квантования непрерывного сигнала должна удовлетворять выражению

$$f_k = 2f_m = \frac{1}{\pi \tau} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} (1 - \Delta^2).$$

При  $\tau = 1\text{с}$  и допустимой погрешности в 0,5% частота квантования должна быть не менее 8,1 кГц.

Учитывая особенности рассмотренной выше важнейшей теоремы можно рекомендовать иные оценки выбора периода дискретизации.

Для выбора периода дискретизации чаще всего используется полиномиальная аппроксимация [131].

Если задать погрешность аппроксимации в виде

$$\varepsilon = \left| q(t) - \sum_{n=-k}^k q(nT_0) \frac{\text{Sin}[\omega_m(t-nT_0)]}{\omega_m(t-nT_0)} \right| = |q(t) - q_k(t)|$$

и воспользоваться интерполяционной формулой ньютона для равномерно отстоящих друг от друга узлов:

$$q_n = q_0 + \frac{\Delta q}{T_0}(t-t_0) + \frac{\Delta^2 q}{2!T_0^2}(t-t_0)(t-t_1) + \dots \\ + \frac{\Delta^k q}{K!T_0^k}(t-t_0) \cdot \dots \cdot (t-t_k) + R(t)$$

где  $R(t)$ - остаточный член ряда, определяемый как:

$$R(t) = \frac{q^{k+1}}{(K+1)!T_0^{k+1}} \left| \prod_{i=0}^k k-n \right|,$$

то максимальное значение абсолютной погрешности не должно превышать заданное, т.е.:

$$R(t) = \varepsilon_3$$

Для многочлена нулевой степени интервал квантования равен:

$$T_0 = \frac{\varepsilon_3}{q'}$$

где  $q'$  - первая производная на участке аппроксимации.

Для многочлена первой степени  $T_0 \leq \sqrt{8\varepsilon_3 / q''}$ , а для второй степени  $T_0 \leq \sqrt{15,6\varepsilon_3 / q'''}$ .

При вычислении интервала дискретизации, в приведенных формулах, учитывалась взаимосвязь двух соседних значений исходных функций. Поэтому вычисление  $T_0$  таким образом целесообразно вести для монотонных функций. Этот подход применим для сигнала S2, представленном в табл.3.1.

Для экспоненциального сигнала и сигнала синусоидальной формы необходимо использовать следующий подход. Разбивают исходный сигнал на  $m_i$ -отсчетов и определяют  $m_i+1$  коэффициентов по формулам Бесселя. Затем определяют среднеквадратическую ошибку

аппроксимации, которая должна быть  $\varepsilon_i \leq \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{i+1}$ . При этом величину ошибки рассчитываем по формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n+1}^m (a_i^2 + b_i^2)},$$

где  $a_0 = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} q(t)$ ,  $a_i = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} q(t) \cos 2\pi \frac{k_i}{m}$ ,  $b_i = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} q(t) \sin 2\pi \frac{k_i}{m}$ ,

$$m=12k,$$

$$k=1,2,3,\dots, i=1,2,3,\dots,m/2.$$

Окончательно, число интервалов выбирают равным  $2n$ , а затем определяют период дискретизации по формуле

$$T_0 = \frac{t}{2n}$$

Квантование по уровню осуществляется исходя из максимальной амплитуды и допустимой погрешности. При этом формула для определения числа разрядов, при представлении амплитуды сигнала с заданной погрешностью, имеет вид:

$$a = ent \left[ \frac{1}{\log 2} \log \left( \frac{q_{\max} - q_{\min}}{2\sqrt{3}\rho\sigma} \right) \right], \quad (3.27)$$

где  $\rho$ - постоянная, характеризующая способ квантования,  $\sigma$  - погрешность квантования.

По выше приведенным формулам можно определить параметры элементов схемы. Так исходя из периода дискретизации определим число ячеек памяти для хранения заданной формы сигнала:

$$N = \frac{T_0}{T_{\text{сиг}}},$$

а разрядность ячейки памяти соответствует формуле (3.27) число разрядов адресной части устройства памяти равно:

$$n_{\text{адрес}} = ent \left[ \frac{1}{\log 2} \log N \right]$$

Таким образом, устройство памяти характеризуется: разрядностью ячеек памяти  $n$ , числом ячеек памяти  $N$  и числом адресных входов  $n_{\text{адрес}}$

Разрядность цифроаналогового преобразователя стоит в полной зависимости от разрядности слова ячеек памяти и равна  $n_{\text{АЦП}}$

Для расчета параметров устройств, определяющих частоту следования сигналов, получим выражения исходя из диапазона частот сигналов  $f_{\text{max}} \leq f \leq f_{\text{min}}$ , и приращения частоты  $\Delta f$ . Перекрытие частотного диапазона задается отношением частот и равно:

$$m = \text{ent} \left[ \frac{1}{\log 2} \log K \frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{min}}} \right].$$

Отсюда следует, что число разрядов счетчика должно быть равно  $m$ . Однако необходимо учитывать, что устройство памяти имеет  $n_{\text{адрес}}$  разрядов адресной части для полной развертки сигнала. В связи с этим при расчете частоты задающего генератора необходимо использовать соотношения  $f_T = f_{\text{min}} n_{\text{адрес}}$ , и с учетом разрядности счетчика

$$f_T = f_{\text{min}} n_{\text{адрес}} m$$

Тогда, устройство формирования периода следования импульсов должно содержать управляемый делитель частоты разрядности  $m$  и задающий генератор частот с периодом следования сигналов  $T_T$ .

### 3.5. Структурные схемы микропроцессорных генераторов сигналов

Рассмотрим варианты построения микропроцессорных генераторов для различных применений. Можно указать на ряд конструктивных схем построения генераторов в зависимости от целевого назначения комплекса, способа встраивания в технологический процесс и функциональных возможностей.

Варианты структурных схем генераторов приведены на Рис.3.4. В схеме представленной на Рис.3.4а) память формы сигналов является стационарной, т.е. после предварительных расчетов формы сигнала, по методике описанной выше, она заносится в постоянное запоминающее устройство (ROM). При этом объем памяти будет определяться числом тестовых сигналов и заданными техническими характеристиками. Практически для хранения сигнала синусоидальной формы, линейно нарастающего и сигнала прямоугольной формы достаточно 2К восьми разрядных слов.

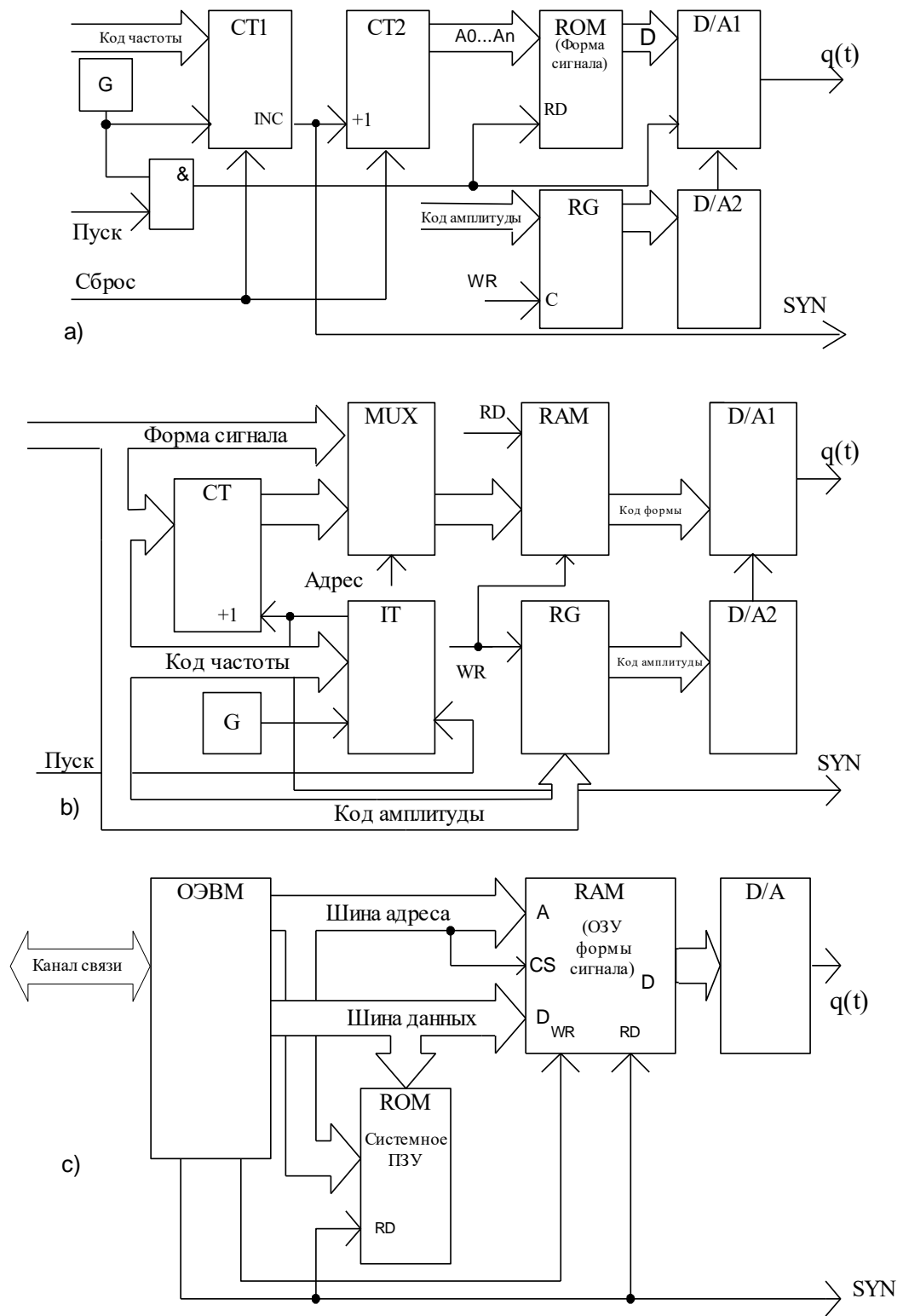


Рис.3.4. Структурные схемы микропроцессорных генераторов:  
 а) на основе ПЗУ, в) на основе ОЗУ, с) с использованием локального МП



Выход ПЗУ подключается ко входным шинам аналого-цифрового преобразователя (DA1). Число входов ЦАП совпадает с числом выходов ПЗУ. ЦАП включается так, что формирует двух полярный выходной сигнал. Если не использовать второй АЦП, то сигнал  $q(t)$  будет иметь постоянную нерегулируемую амплитуду. При использовании ЦАП (DA2) возможна регулировка амплитуды в широких пределах. Для этого выход второго ЦАП подключается на вход опорного напряжения первого ЦАП. Задание кода амплитуды осуществляется с помощью микроЭВМ, которая заносит его в регистр RG. Задание частоты периодических сигналов осуществляется с помощью двух счетчиков включенных по схеме со сквозным переносом. Причем первый счетчик используется для задания такта вывода непрерывного сигнала, а второй осуществляет динамическую развертку кодов соответствующих сигналов, хранящихся в ПЗУ. Кроме того, первый счетчик СТ1 может быть запрограммирован на различный коэффициент деления опорной частоты.

Частота опорного генератора G должна быть больше чем самая максимальная частота выходного сигнала в  $k$  раз. Такие устройства, как регулятор амплитуды и частоты будут иметь параметры, рассчитанные по выше приведенным формулам. Синхронизация процессов в системе достигается использованием сигнала переполнения первого счетчика, а начало периода устанавливается по сигналу «Сброс» формируемым системой управления или микро-ЭВМ. Это сигнал используется и для запуска процессов в схеме аналогового ввода информации. Связь генератора с микро-ЭВМ носит односторонний характер и определяется исключительно выводом параметров формируемого сигнала в интерфейс. Такие генераторы целесообразно использовать в неизменяемых процессах, когда процедура диагностики и/или идентификации строго определена характеристиками объекта исследований и неизменна. На них накладываются требования, связанные с ограниченными функциональными возможностями, ограниченным объемом памяти и как следствие, пониженной точностью.

Практическая схема генератора, рассчитанная по методике, приведенной в предыдущем параграфе на основании структурной схемы (рис.3.4.а) представлена на рис.3.5.

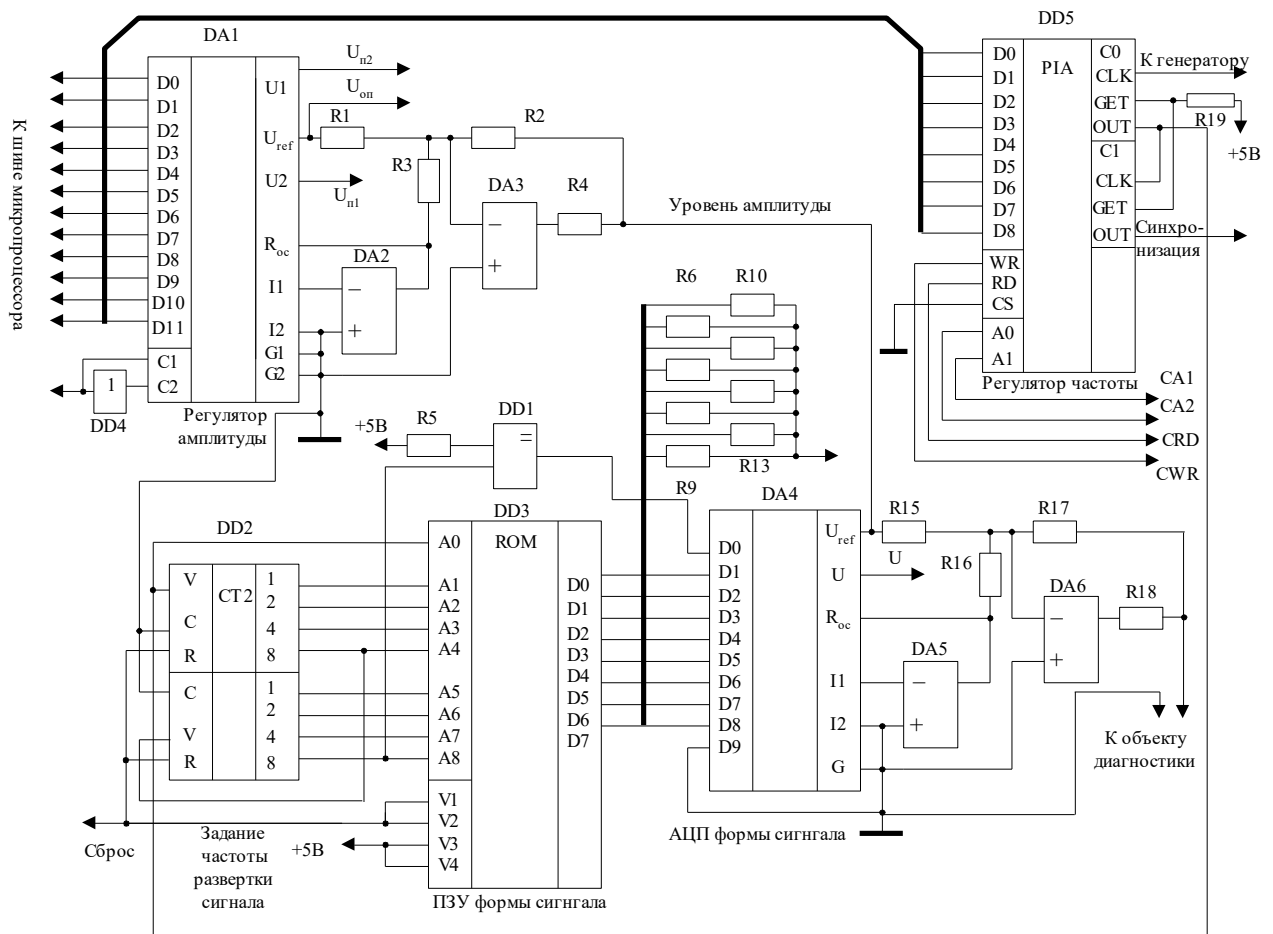


Рис.3.5. Электрическая принципиальная схема микропроцессорного генератора

Схема состоит из двенадцати разрядного ЦАП DA1, имеющего встроенный регистр для запоминания входного кода. Для преобразования выходного тока ЦАП в напряжение используются операционные усилители DA2 и DA3. С их помощью также осуществляет формирование сигнала двух полярной формы. Входное опорное напряжение величиной 10,24В преобразуется в выходной сигнал изменяющийся в диапазоне от 0,00В до  $\pm 10$ В с шагом 0,005В. Это напряжение поступает на вход второго ЦАП (DA4), который используется для преобразования цифрового кода формы сигнала в напряжение и имеет десять цифровых входов. Также как и в первом случае, на выходе ЦАП установлены операционные усилители DA5 и DA6, выполняющие аналогичные функции. Форма воспроизводимого сигнала хранится в постоянном запоминающем устройстве DD3. Объем памяти этой микросхемы равен 2К восьмиразрядных слов. Это позволяет запоминать сигналы представленные 2048 дискретами. Формирование

динамической развертки сигнала основано на использовании восьмиразрядного счетчика DD2 и задатчика временной развертки, построенного с использованием многорежимного интервального таймера DD4.

Микросхема позволяет формировать отсчеты времени с дискретностью  $5 \cdot 10^{-6}$  секунды. Столь малый интервал времени необходим для обеспечения развертки сигнала с частотой от 0,01 Гц до 300 Гц. Рассматриваемая схема способна формировать сигналы трех видов: скачек напряжения, импульс прямоугольной формы и синусоидальный сигнал. Эти сигналы позволяют получать характеристики ЭМС во временной и частотной областях.

Недостатком данной схемы можно считать зависимость параметров от представления их в двоичной форме и, следовательно, получение, например, частот выходных сигналов кратных степени два. Этот недостаток частично устраняется использованием интервального таймера имеющего внутренние счетчики с коэффициентом пересчета более 65000.

Более совершенной является схема генератора, представленного на рис.3.4.в. Отличие этой схемы в том, что в ней используют не постоянное запоминающее устройство, а оперативное ЗУ. При этом объем памяти сокращается и определяется формой самого сложного сигнала. Однако, такой подход влечет усложнение процесса обмена информацией с микро-ЭВМ. В протокол обслуживания входит загрузка формы сигнала и его параметров и воспроизведение его. При этом усложняется и аппаратная часть. Появляются дополнительные устройства для формирования сигналов записи информации и организации разделения потоков информации между микро-ЭВМ и интерфейсом и интерфейсом и объектом исследований.

Структура такого генератора может быть рекомендована для наладки электромеханических систем станков, а также встраиваться в станки, для которых свойственны какие-либо изменения в структуре механизмов (например, загрузка нового инструментального магазина, палет и т.п.).

В целях построения наиболее совершенных генераторов тестовых сигналов и уменьшения времени затрачиваемого микро-ЭВМ на их формирование, он выполняется на однокристалльной микро-ЭВМ, т.е. строится в виде контроллера (Рис.3.4.с)

При этом микро-ЭВМ передает на контроллер желаемые параметры сигнала, а контроллер производит обработку информации и формирует вид и параметры сигнала. Такой подход рекомендуется при построении систем для научных исследований сложными техническими системами.

В каждой из структур генераторов формируются синхросигналы, управляющие работой модуля ввода информации в микро-ЭВМ.

Универсальная схема генератора представлена на рис.3.6. Она предназначена для построения сложных систем исследования приводов. В ее составе учтены все возможные режимы работы. Она способна формировать сигналы произвольной формы в широком диапазоне амплитуд и частот. Сигнал на выходе генератора может смещаться по уровню, накладываться на постоянную составляющую, суммироваться с другими сигналами и т.д. На его выходе может присутствовать до нескольких сигналов различной формы и параметров. Наличие двух каналов позволяет управлять двумя объектами или одним объектом по двум входам. Все процессы в генераторе могут быть либо синхронизированы, либо выполняться в асинхронном режиме. В процессе работы свойства сигналов могут изменяться без остановки работы схемы. Структура выполнена таким образом, что может интегрироваться либо в канал ЭВМ, либо использовать автономную микро-ЭВМ. Такое устройство эффективно использовать в задачах стабилизации характеристик привода, при условии, что в приводе предусмотрена возможность подключения генератора к элементам схемы.

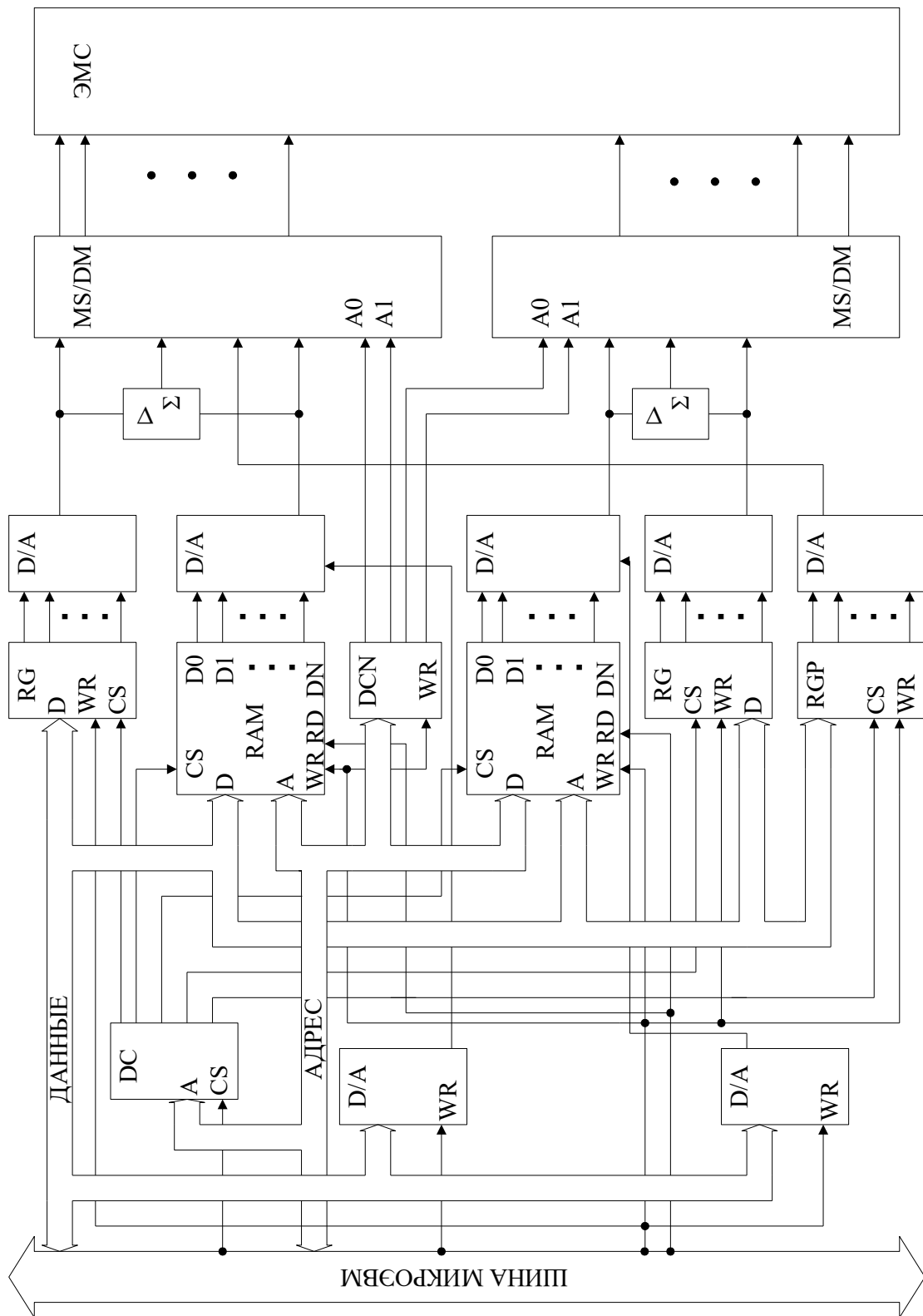


Рис.3.6 Схема универсального генератора

# Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ ВВОДА АНАЛОГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

## 4.1. Выбор частоты квантования

Выбор интервала дискретизации по времени свяжем с теоремой Котельникова -Шенона <sup>3</sup> В соответствии с этой теоремой, если непрерывная функция  $q(t)$  удовлетворяет условиям Дирихле (ограничена, кусочно - непрерывна и имеет конечное число экстремумов) и ее спектр ограничен некоторой частотой  $f_m$ , то существует такой максимальный интервал  $\Delta_T$  между отсчетами, при котором имеется возможность безошибочно восстановить дискретизируемую функцию  $q(t)$  по дискретным отсчетам. Этот максимальный интервал:

$$\Delta_T = \frac{\pi}{\omega_m} = \frac{1}{2f_m}.$$

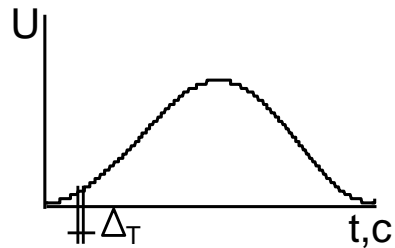


Рис. 4.1. Интервал квантования

Действительно, для непрерывной функции  $q(t)$  можно записать прямое и обратное преобразование Фурье:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} q(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (4.1)$$

$$q(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega)e^{-j\omega t} d\omega. \quad (4.2)$$

По условиям теоремы спектр функции  $q(t)$  ограничен частотой  $\omega_m$ , т.е.

$$S(j\omega) \neq 0 \quad \text{при} \quad -\omega_m \leq \omega \leq \omega_m \quad (4.3)$$

$$S(j\omega) = 0 \quad \text{при} \quad |\omega| > \omega_m.$$

Тогда выражение (4.3) можно представить в виде

$$q(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} S(j\omega)e^{-j\omega t} d\omega. \quad (4.4)$$

<sup>3</sup> Дядюнов А.Н., Онищенко Ю.А., Сенин А.И. Адаптивные системы сбора и передачи аналоговой информации – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.

Спектр  $S(j\omega)$  функции  $q(t)$  с учетом соотношений (4.3) можно рассматривать как функцию, заданную на интервале  $(-\omega_m, \omega_m)$ . Разложим функцию на этом интервале в ряд Фурье:

$$S(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j \frac{\pi n \omega}{\omega_m}}, \quad (4.5)$$

где

$$C_n = \frac{1}{2\omega_m} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} S(j\omega) e^{-j \frac{\pi n \omega}{\omega_m}} d\omega \quad (4.6)$$

Далее обратимся к выражению (4.4) и положим  $t = -n\Delta_T$ , где  $\Delta_T = \pi/m$ . Тогда

$$q(-nT) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} S(j\omega) e^{-j \frac{\pi n \omega}{\omega_m}} d\omega \quad (4.7)$$

Умножим обе части выражения (4.7) на  $\pi/m$

$$\frac{\pi}{\omega} q(-nT) = \frac{1}{2\omega_m} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} S(j\omega) e^{-j \frac{\pi n \omega}{\omega_m}} d\omega$$

Сравнивая это выражение с соотношением (4.6), получим

$$C_n = \frac{\pi}{\omega} q(-n\Delta_T) \quad (4.8)$$

Подставляя вместо  $C_n$  полученное выражение (4.8) в формулу (4.5), имеем:

$$S(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\pi}{\omega_m} q(-n\Delta_T) e^{j \frac{\pi n \omega}{\omega_m}} \quad (4.9)$$

Подставим в выражение (4.5) вместо  $S(j\omega)$  правую часть соотношения (4.9)

$$q(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} e^{j\omega t} d\omega \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\pi}{\omega_m} q(-n\Delta_T) e^{j \frac{\pi n \omega}{\omega_m}} =$$

$$\frac{1}{2\omega_m} \sum_{n=-\infty}^{\infty} q(n\Delta_T) \int_{-\omega_m}^{\omega_m} e^{j\omega(t-n\Delta_T)} d\omega,$$

Но

$$\int_{-\omega_m}^{\omega_m} e^{j\omega(t-n\Delta_T)} d\omega = \frac{1}{j(t-n\Delta_T)} e^{j\omega(t-n\Delta_T)} \Big|_{-\omega_m}^{\omega_m} = \frac{2 \text{Sin}[\omega_m(t-n\Delta_T)]}{t-n\Delta_T}$$

Окончательно получим:

$$q(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} q(n\Delta_T) \frac{\text{Sin}[\omega_m(t-n\Delta_T)]}{\omega_m(t-n\Delta_T)}. \quad (4.10)$$

Из этого выражения следует, что непрерывная функция  $q(t)$ , имеющая спектр, ограниченный частотой  $\omega_m$ , может быть представлен в виде суммы, каждое слагаемое которой выражается функцией

$$y(t) = \frac{\text{Sin}[\omega_m(t-n\Delta_T)]}{\omega_m(t-n\Delta_T)}$$

Эта функция называется функцией отсчета. Рассмотрим следующие свойства функции отсчета:

- в момент времени  $t=n\Delta_T$  функция отсчетов достигает своего наибольшего значения, равного единице;
- в моменты времени, кратные  $\Delta_T$  ( $t=(n\pm l)\Delta_T$ , где  $l$ -любое число), функция отсчетов обращается в нуль.

Из формулы (4.10) следует, что сумма в каждый  $n$ -й момент времени определяется только одним  $n$ -ым слагаемым, так как все остальные слагаемые в этот момент времени обращаются в нуль. Другими словами, функция  $q(t)$  в дискретные моменты времени может быть представлена своими дискретами  $x(n\Delta_T)$ . Внутри же промежутка  $\Delta_T$  функция  $q(t)$  определяется всеми слагаемыми. С другой стороны, если заданы дискреты  $x(n\Delta_T)$ , то функция  $q(t)$  может быть полностью восстановлена суммированием функций  $x(n\Delta_T)y(t)$ . Для восстановления функции  $q(t)$  необходимо подать на вход фильтра с верхней границей пропускания  $\omega_m$  импульсов типа  $\delta$ -функции с амплитудой, соответствующей значениям непрерывной функции в точках отсчета и следующих друг за другом с периодом  $\Delta_T$ .

На практике использования теоремы В.А. Котельникова наталкиваемся на ряд трудностей. Во-первых, представление непрерывной функции в виде дискрет через промежуток времени  $\Delta_T$  не позволяет воспроизводить процесс, развивающийся по времени. Действительно, каждая новая дискрета  $q(n\Delta_T)$  при восстановлении меняет всю непрерывную функцию на всем предшествующем интервале за исключением отсчетных значений. Во-вторых, реальный процесс, который описывается функцией  $q(t)$ , имеет, как правило, начало и конец. Но ограниченная во времени функция не может иметь ограниченный спектр



и, следовательно, теорема В.А. Котельникова для такого сигнала не применима. Поэтому теорему В.А. Котельникова можно рассматривать как приближенную для реальных сигналов в том смысле, что можно ввести разумные допущения на ширину реального спектра. Эту ширину реального спектра можно определить как интервал частот, вне которого спектральная плотность меньше некоторой заданной величины.

Если в выражении (4.10) ограничиться конечным числом членов, то это приводит к появлению ошибки:

$$\varepsilon = \left| q(t) - \sum_{-k}^k q(n\Delta_T) \frac{\text{Sin}[\omega_m(t-n\Delta_T)]}{\omega_m(t-n\Delta_T)} \right| \quad (4.11)$$

Не приводя здесь подробных рассуждений отметим, что для  $\varepsilon$  справедливо следующее соотношение:

$$\varepsilon \leq \frac{\sqrt{2}}{\pi} P |\text{Sin}\pi f_m t| \sqrt{\frac{1}{f_m} \frac{T}{T^2 - t^2}} = \varepsilon^* P, \quad (4.12)$$

где  $P$  - полная энергия, которую имеет сигнал  $q(t)$ ;  $(-T, T)$ -интервал квантования сигнала  $q(t)$ ;  $\varepsilon^* = \frac{\sqrt{2}}{\pi} |\text{Sin}\pi f_m t| \sqrt{\frac{1}{f_m} \frac{T}{T^2 - t^2}}$  - коэффициент ошибки;  $f_m = \frac{1}{2\pi} \omega_m$ .

Для определения граничной частоты  $f_m$  можно поступить следующим образом. Для рассматриваемого сигнала  $q(t)$  ограничим его спектр значением  $f_m$ , которое определим из условия, что энергия суммы отброшенных гармоник не превышает энергии ошибки. Тогда полную энергию  $P$  сигнала  $q(t)$  можно представить следующим образом:

$$P_s = P_m + P_o, \quad (4.13)$$

где  $P_m$  - энергия сигнала, ограниченного частотой  $f_m$ ;  $P_o$  - энергия отброшенных гармоник.

Полную энергию  $P_s$  сигнала  $q(t)$  можно найти по его спектральной плотности:

$$P_s = \int_0^{\infty} [q(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) S^*(\omega) d\omega, \quad (4.14)$$

где  $S^*(\omega)$ -функция, комплексно сопряженная с функцией  $S(\omega)$ .

Аналогично, энергия  $P_m$  сигнала  $q(t)$ , ограниченного частотой  $f_m$ .

$$P_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_m} S(\omega) S^*(\omega) d\omega \quad (4.15)$$

Пусть ошибка восстановления сигнала по его квантованным значениям не превышает величины  $(\pm n\Delta P)$  (где  $n$ - коэффициент, а  $\Delta P$  - шаг шкалы уровней). Если допустить, что любое значение ошибки в пределах заданной величины  $(\pm n\Delta P)$  равновероятно, то среднее значение энергии ошибки можно представить в виде:

$$P_0 = \frac{1}{2n\Delta_p} \int_{-n\Delta_p}^{n\Delta_p} q^2 dq = \frac{(n\Delta P)^2}{3} \quad (4.16)$$

Аналогично, если положить, что любое значение сигнала  $q(t)$  в пределах от 0 до  $k$  (где  $k$  - максимальное число шагов шкалы уровней) равновероятно, то среднее значение полной энергии

$$P_s = \frac{1}{k\Delta P} \int_0^{k\Delta P} q^2 dq = \frac{(k\Delta P)^2}{3} \quad (4.17)$$

Из выражений (4.16), (4.17) следует, что

$$P_0 = \frac{n^2}{k^2} P_s \quad (4.18)$$

где  $\Delta = \frac{n}{k}$  относительная ошибка.

Подставляя выражение (4.18) в формулу (4.13), получим:

$$(1 - \Delta^2) P_s = P_m \quad (4.19)$$

Если в уравнение (19) заменить  $P_s$ ,  $P_m$  их значениями, вычисленными для заданного сигнала  $q(t)$  соответственно по формулам (4.14), (4.15), то полученные соотношения будут определять связь между относительной ошибкой  $\Delta$  и частотой  $f_m$ , которая и используется для выбора граничной частоты  $f_m$ .

Рассмотрим конкретный пример. Пусть генератор формирует сигнал вида  $\varepsilon(t) = Ae^{-\beta t}$ , где  $A$  - амплитуда,  $\beta = \frac{1}{\tau}$  ( $\tau$  - постоянная времени). Требуется определить частоту квантования непрерывно изменяющегося экспоненциального сигнала при заданной ошибке воспроизведения  $k\Delta P$  и заданной относительной ошибке  $\Delta = n/k$ .

Граничную частоту квантования  $f_m$  определим из условия, при котором энергия суммы отброшенных гармоник не превышала бы энергии ошибки.

Спектральная плотность для сигнала

$$S(\omega) = \frac{A}{\sqrt{\beta^2 + \alpha^2}} e^{-j \arctg \frac{\omega}{\beta}}.$$

Тогда

$$P_s = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \left[ \frac{A}{\sqrt{\beta^2 + \alpha^2}} e^{-j \arctg \frac{\omega}{\beta}} \frac{A}{\sqrt{\beta^2 + \alpha^2}} e^{j \arctg \frac{\omega}{\beta}} \right] d\omega =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{A^2}{\beta^2 + \alpha^2} d\omega = \frac{A^2}{4\beta}$$

Аналогично, энергия  $P_m$  сигнала  $\varepsilon(t)$ , ограниченного частотой  $f_m$ ,

$$P_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_m} \frac{A^2}{\beta^2 + \alpha^2} d\omega.$$

Подставим полученные выражения для  $P_s$ ,  $P_m$  в уравнение (4.19)

$$(1 - \Delta^2) \frac{A^2}{4\beta^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_m} \frac{A^2}{\beta^2 + \alpha^2} d\omega.$$

После интегрирования получим

$$(1 - \Delta^2) \frac{A^2}{4\beta^2} = \frac{A^2}{2\pi \beta} \arctg \frac{\omega_m}{\beta}.$$

Из этого выражения следует, что

$$\frac{\omega_m}{\beta} = \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} (1 - \Delta^2) \quad (4.20)$$

Подставим в соотношение (4.20) вместо  $\beta = \frac{1}{\tau}$ ,  $\omega_m = 2\pi f_m$  и, разрешая полученное уравнение относительно  $f_m$ , окончательно имеем

$$f_m = \frac{1}{\tau} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} (1 - \Delta^2).$$

В соответствии с теоремой В.А. Котельникова, заключаем, что частота квантования непрерывного сигнала должна удовлетворять выражению

$$f_k = 2f_m = \frac{1}{\pi \tau} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} (1 - \Delta^2).$$

При  $\tau = 1 \text{ с}$  и допустимой погрешности в 0,5% частота квантования должна быть не менее 8,1 кГц.

## 4.2. Преобразование информации в подсистемах аналогового ввода

Рассмотрим процесс преобразования информации при аналого-цифровом преобразовании. Для этого воспользуемся схемой приведенной на рис.4.2. Установлено, что для построения АЦП могут быть использованы различные способы. АЦП могут строиться на основе ступенчатого, пилообразного напряжения, следящего типа, с время - импульсной модуляцией, с двухтактным интегрированием, с промежуточным преобразованием напряжения в частоту, на основе последовательных приближений и т.п.

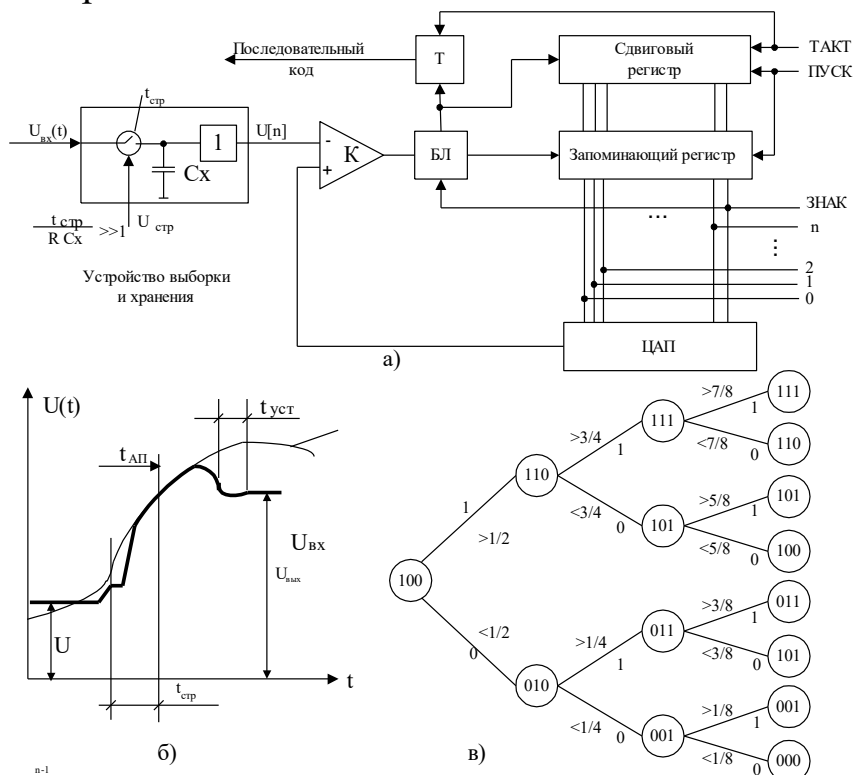


Рис. 4.2. Преобразование аналогового сигнала в цифровой код

Каждый из перечисленных способов обладает преимуществами и недостатками, а сами АЦП отличаются по быстродействию, точности преобразования, разрядности, величине апертуры и т.д.

Желание получить предельные характеристики, при оптимальном соотношении параметров, предполагает использование способа преобразования информации, основанного на поразрядном уравнивании.

Работа АЦП связана с выполнением последовательных сравнений входного напряжения с напряжением обратной связи., число которых определяется разрядностью. Этот процесс аналогичен процессу взвешивания, в котором неизвестная величина сравнивается с опорной. На первом шаге преобразования, производится сравнение входного напряжения с максимальным, равным половине предельного значения входного напряжения. Следующий шаг - определяется в какой четверти диапазона находится входное напряжение, а каждый последующий шаг сужает область измерений.

На Рис.4.2.б представлен процесс преобразования для трехразрядного двоичного кода равного  $101_2$ .

При входных сигналах, являющимися функциями времени, необходимо учитывать время преобразования АЦП. Это связано с тем, что при частоте входного сигнала, превышающего частоту преобразования, возможно возникновении погрешности. Для исключения подобных погрешностей в схеме преобразования информации используются специальные схемы запоминания аналоговой информации на время преобразования информации в АЦП. УВХ (устройства выборки и хранения) могут быть выполнены по различным схемам, но общей частью для них является ключ, запоминающая емкость и усилитель.

Перед началом преобразования АЦП, на вход УВХ подается сигнал стробирования, переводящий УВХ их режима слежения в режим хранения. Затем АЦП выполняет функции преобразования. Процессы, происходящие в УВХ поясняются графиком, приведенным на рис.4.2в.

Большое количество измеряемой информации в ЭВМ представляется периодическими сигналами. Поэтому рассмотрим процесс преобразо-

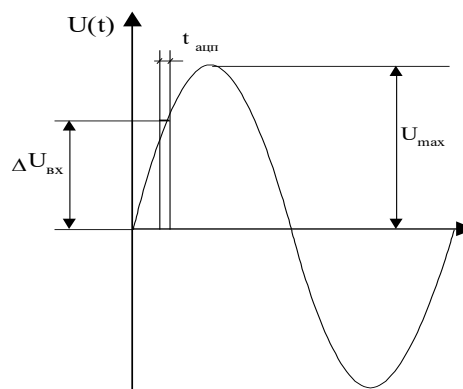


Рис. 4.3. Входной синусоидальный сигнал

вания при подаче на вход подсистемы аналогового ввода синусоидального сигнала (рис.4.3.).

При прохождении сигнала через УВХ сигнал претерпевает изменения и представляется дискретными отсчетами. Механизм образования отсчетов связан с использованием малой постоянной времени эквивалентной RC-цепи по сравнению с длительностью стробирующего импульса и отнесением отсчета к моменту окончания этого импульса.

Коэффициент передачи УВХ в режиме выборки можно представить в вид  $\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{1}{1 + j(f / f_0)}$ , а его зависимость от частоты приводит к

возникновению погрешности, равной  $1 - \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{-j(f / f_0)}{1 + j(f / f_0)}$

На Рис.4.4 показана зависимость погрешности передачи амплитуды в зависимости от частоты. Для заданной эквивалентной схемы относительная погрешность приблизительно может оцениваться соотношением  $\sigma = f / f_0$ . Для других видов сигнала эта зависимость представляется в иной форме. При построении схем УВХ принципиальным является выбор емкости, которая должна отвечать следующим требованиям: малые токи утечки в режиме хранения, максимальная скорость заряда, оптимальная величина емкости. Так как в современных системах электронной техники используются стандартные монокристалльные устройства с внешними навесными устройствами, в виде конденсатора, то выбор параметров емкости имеет решающее значение в точности преобразования информации.

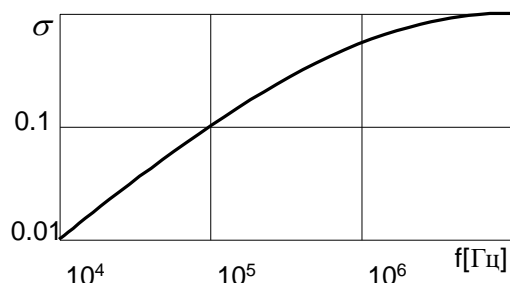


Рис. 4.4. Погрешность коэффициента передачи

Для обеспечения заданной точности соотношение частот входного сигнала и скорости преобразования АЦП, целесообразно оценивать по соотношению:

$$f_{c \max} = \frac{f_{АЦП}}{\pi 2^{n+1}} = \frac{1}{8\pi \Delta t}$$

Изменение сигнала на выходе АЦП за время  $\Delta t$  не должно превышать величины младшего разряда. Отметим, что наличие или отсутствие УВХ определяется возможностями АЦП, т.е. если  $f_{c \max} > f_{АЦП}$ ,

то выбирается более быстродействующий АЦП. Отсутствие нужного АЦП приводит к необходимости установки УВХ на входе АЦП. В этом случае следует оценивать время слежения или скорость изменения сигнала на входе АЦП по соотношениям:

$$t_{сл} = \frac{2^{-n} U_{nu}}{t_{sig}}, \text{ для АЦП без УВХ, и } t_{сл} = \frac{2^{-n} U_{nu}}{t_a}, \text{ для АЦП с УВХ.}$$

Выбрать нужный АЦП можно и по номограммам.

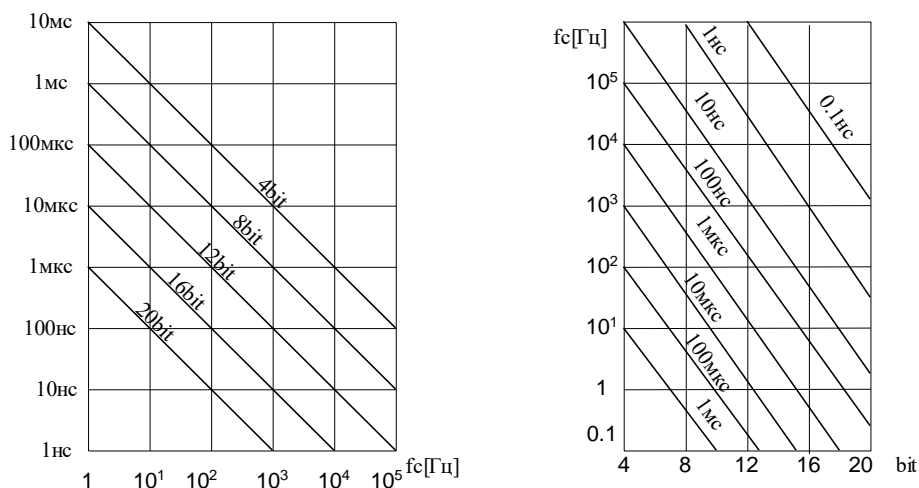


Рис. 4.5. Номограммы для выбора АЦП

Далее сигнал с выхода УВХ поступает на вход АЦП. При этом происходит квантование его по уровню. Максимальная погрешность, при синусоидальном входном сигнале определяется следующим образом (см.рис.4.3.). Пусть входной сигнал описывается следующим выражением:  $U = U_{max} \sin \omega t$ . Тогда скорость изменения сигнала может быть равна:  $dU / dt = U_{max} \omega \cos \omega t$ . Для точки пересечения с нулевым уровнем  $\Delta U / \Delta t = U_{max} 2\pi f$ . При времени преобразования АЦП, равном  $t_{АЦП}$  получим погрешность преобразования вблизи точки пересечения с нулевым уровнем  $\Delta U = U_{max} 2\pi f t_{АЦП}$ . Наличие же УВХ в системе устраняет этот эффект. С другой стороны, можно было бы уменьшить ап-ретурное время, тогда использование УВХ не обязательно.

Время преобразования  $t_{АЦП}$  определяется структурой АЦП. Если представить эквивалентную схему для определения влияния переходных процессов в АЦП так, как это показано на рис.4.5, то выходное значение напряжения достигнет установившегося значения за время  $t$ . При этом напряжение выхода равно:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

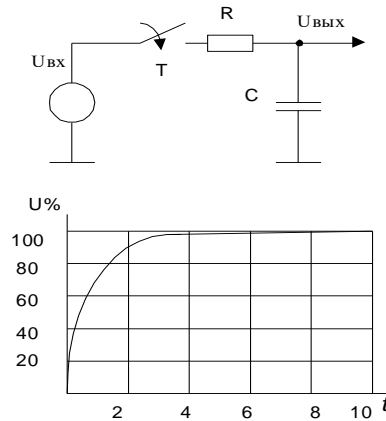


Рис. 4.6. Эквивалентная схема

Если величина входного напряжения достигнет уровня 90% от  $U_{\text{вх}}$ , то

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 0.9 = 1 - e^{-\frac{t}{RC}}$$

и отношение  $t/RC$  равно 2.3, то  $t = 2.3 RC$ .

Таким образом, чтобы достигнуть минимальной погрешности время переходного процесса, при установлении всех разрядов, должно быть выбрано  $10T$ , и тогда при  $t=1\text{мкс}$  полное время установления равно  $10\text{мкс}$ .

Рассмотренный АЦП, как и другие, характеризуется двумя основными параметрами  $t_{\text{пр}}$  и разрядностью. Они также являются основой для построения подсистемы аналогового ввода измерительной информации.

Определим разрядность преобразователя. Считаем, что на вход АЦП поступает сигнал  $U$  с некоторой погрешностью  $\sigma_U$ . В процессе квантования аналогового сигнала вносится дополнительная погрешность  $\sigma_k$ . В результате на выходе будет погрешность  $\sigma_z$ . Для оценки разрешающей способности примем соотношение:

$$m = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{\Delta U} = \frac{100}{\sigma_k},$$

где  $\Delta U$  - шаг квантования, которому соответствует погрешность  $\sigma_k$ . Между разрешающей способностью и разрядностью существует связь вида  $n = \log m$ .



Суммарная среднеквадратичная погрешность преобразования равна:

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_U^2 + \sigma_k^2} = \sqrt{\sigma_U^2 + \left(\frac{\Delta U}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

Величина  $\sigma_k$  характеризует сигнал, для которого в пределах шага квантования принят нормальный закон распределения. В нормированном виде суммарную погрешность можно представить, как

$$\sigma_k = \sqrt{1 + \frac{\Delta U^2}{12}},$$

откуда

$$\Delta U \leq \sigma_U \sqrt{12(\sigma_{zH} - 1)}.$$

После несложных преобразований, необходимую разрядность АЦП можно вычислить по следующей формуле:

$$n = \text{ent} \left[ \frac{1}{\log 2} \log \left\{ \left( U_H \sqrt{12(\sigma_{zH} - 1)} \right) + 1 \right\} \right]$$

### 4.3. Структурные схемы микропроцессорных систем аналогового ввода

Реализация подсистем ввода измерительной информации основывается на ряде подходов. В результате анализа проведенного в разделе 4.1. и принципах преобразования информации, рассмотренном в разделе 4.2., установлено, что можно выделить три основных принципа их построения с использованием микропроцессоров:

- \* ввод информации непосредственно с АЦП;
- \* ввод информации с использованием буферных устройств;
- \* ввод информации с использованием специализированных контроллеров.

Для каждого из приведенных методов получения аналоговой информации существуют особенности схемотехнической реализации. Как отмечалось ранее, существенным при реализации устройств ввода является число потоков информации, а отсюда следует необходимость использования коммутаторов на входе АЦП. В противном случае число используемых в схеме АЦП равно числу потоков информации. Заметим, что в каждом конкретном случае, способ реализации рассматриваемой подсистемы ввода связан с техническими характе-

ристиками объекта, типом системы диагностики и затратами на ее реализацию.

Рассмотрим структурные схемы аналогового ввода по мере их упоминания.

Структурная схема непосредственного ввода информации с АЦП представлена на рис.4.7. Схема работает следующим образом. Выходные цифровые сигналы АЦП подключаются на внутреннюю шину микропроцессора. Вывод сигнала пуска АЦП связан с линией запись, а линия сигнала готовности связана с одной из линий данных МП. Согласно принятого алгоритма, МП выдает сигнал «запись» и АЦП начинает цикл преобразования. МП в это время должен опрашивать наличие сигнала «Готов». С появлением этого сигнала МП производит фиксацию данных на внутренней шине, а затем перемещаем их во внутренние регистры хранения информации.

В зависимости от структурной схемы всего комплекса, сохраненные данные поступают на дальнейшую обработку на центральную ЭВМ. На схеме темным цветом выделен триггер, который используется для фиксации сигнала «Готовность». Это дает возможность МП «не отвлекаться» на опрос готовности данных, а выполнять некоторые задачи, например, обработку введенной информации, ее передачу и размещение.

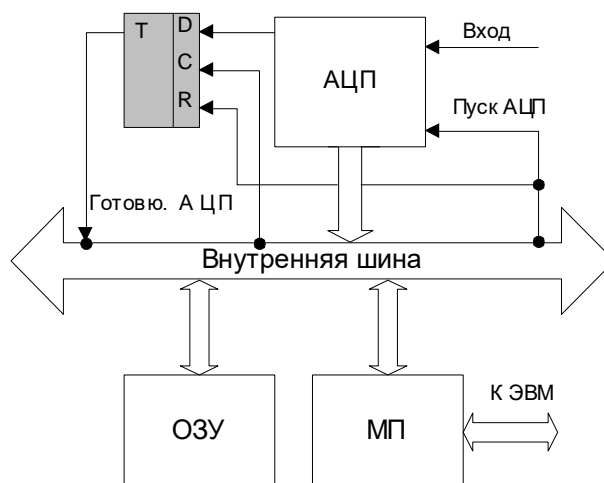


Рис. 4.7. Непосредственный ввод информации

Быстродействие схемы достаточно высокое и определяется двумя значениями: временем преобразования АЦП и временем приема информации МП. Так например, для АЦП 1108ПВ1 (в режиме 8 бит) время преобразования составляет 0,8мкс, а команда ввода данных однокристалльной микро-ЭВМ 1816ВЕ51, при тактовой частоте 12Мгц, 1мкс. Таким образом, МП «замедляет» процесс обработки информации и необходим МП с меньшим временем цикла или иная схемотехническая реализация, при которой МП не участвует в непосредственном преобразовании. Существенным ограничением по быстродействию становится использование нескольких каналов ввода информации.

Аналогичная схема ввода построена на использовании однокристалльной микро-ЭВМ и ЦАП(Рис.4.8.). В ней используется алгоритмический принцип построения АЦП. В этом случае МП выполняет функции преобразования аналогового сигнала в цифровой код на основе принципа поразрядного уравнивания.

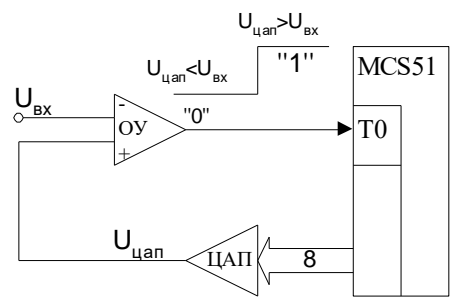


Рис. 4.8. АЦП последовательного приближения на основе микро-ЭВМ

Другие задачи МП может выполнять только при ухудшении характеристик аналогового преобразования. При восьмиразрядном коде время преобразования составляет примерно 100мкс. При увеличении числа каналов время преобразования значительно увеличивается и такая схема непригодна для быстро протекающих процессов и может использоваться только для регистрации медленно изменяющихся процессов.

Еще одна схема АЦП с использованием однокристалльной микро-ЭВМ представлена на рис.4.9.

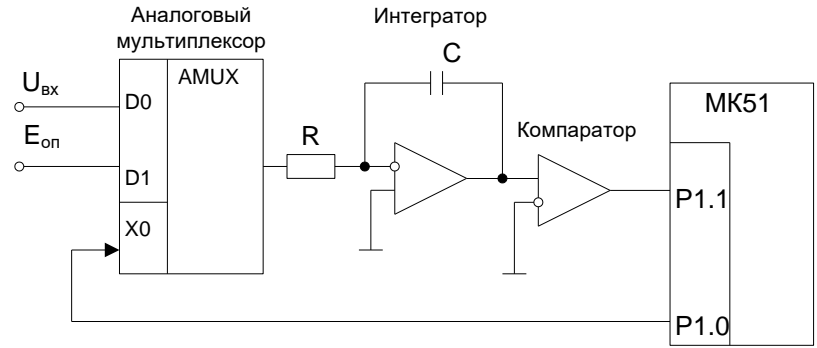


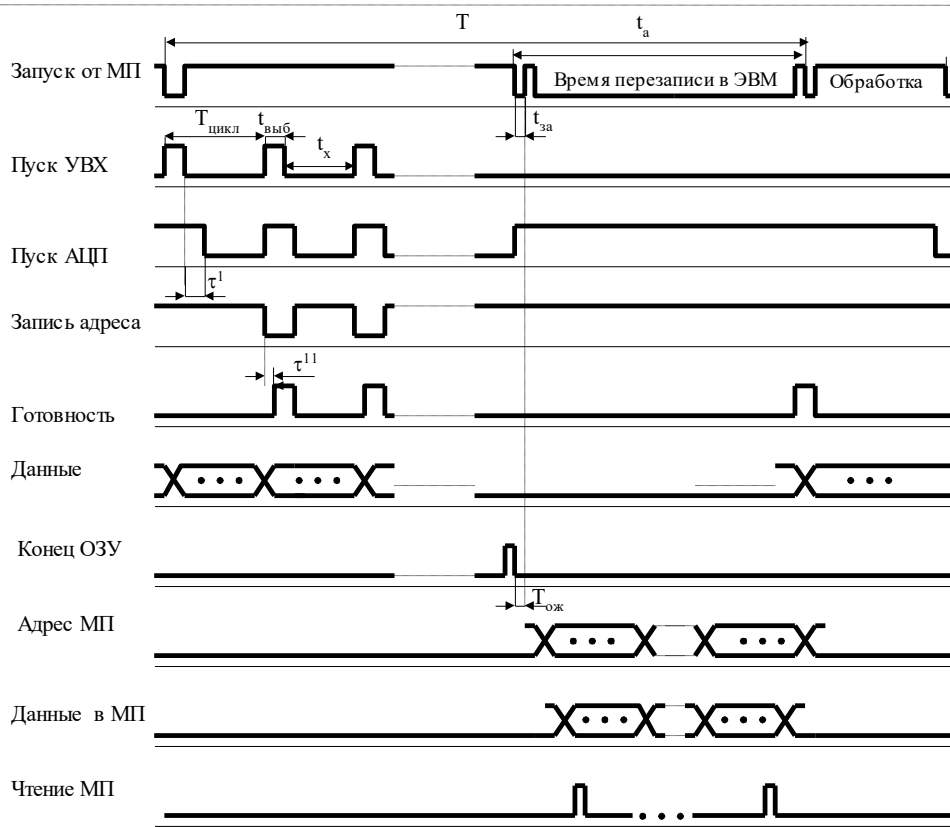
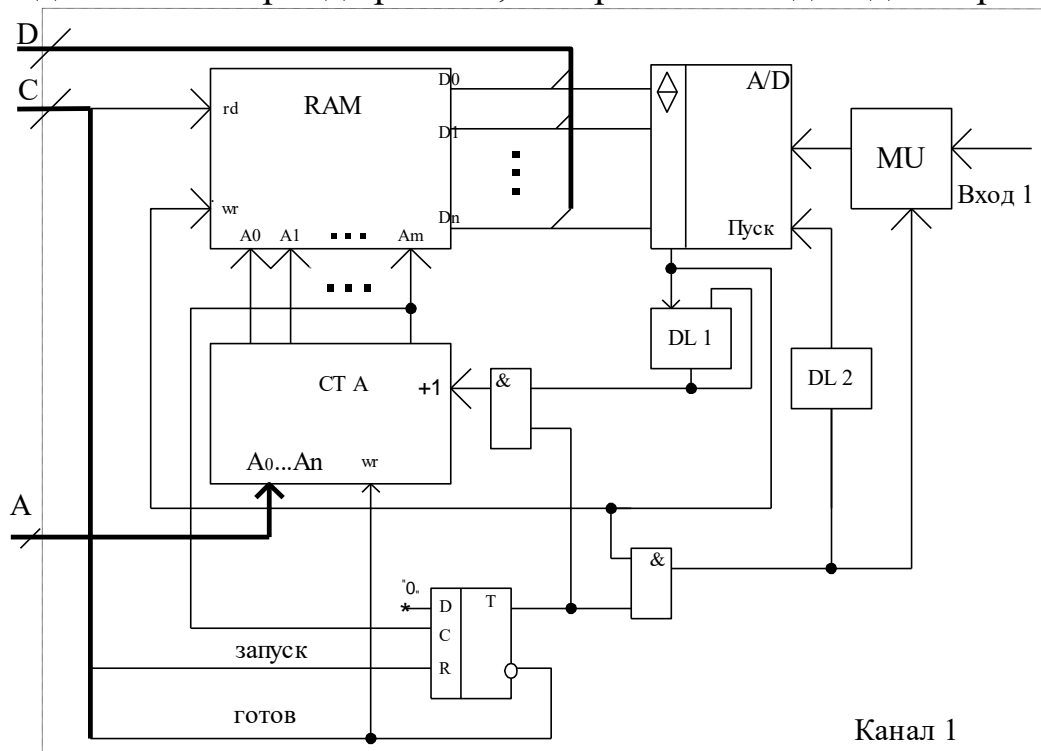
Рис. 4.9. АЦП однократного интегрирования на основе микро-ЭВМ

В этой схеме используется принцип однократного интегрирования. В задачу алгоритмического обеспечения входит анализ бита переполнения интегратора, формируемого компаратором. Одновременно в МП формируется код на основе подсчета импульсов внутреннего таймера. Обладая высокой точностью, схема имеет малое быстродействие и может быть рекомендована для прецизионных измерений медленно изменяющихся во времени процессов. В данной схеме высокие требования предъявляются к аналоговым элементам. В частности усилитель интегратора не должен иметь дрейфа нуля, температурной

нестабильности. Резистор и конденсатор должны быть прецизионными. В остальном схема аналогична ранее приведенной.

Второй принцип ввода аналоговой информации основан на использовании буферных запоминающих устройств. Этот принцип имеет ряд реализаций, отличающихся между собой по быстродействию, схемной реализации и стоимости. Прежде чем проанализируем все возможные реализации этого принципа рассмотрим схему представленную на рис.4.10. Схема работает автономно, осуществляя каждое новое преобразование на основе сигнала готовности, вырабатываемом АЦП. Этот сигнал используется и для запуска АЦП, который подается на вход запуска с некоторой задержкой, величина которой определяется временем установления процессов в схеме и для формирования адреса ячейки памяти в которой запоминается преобразованная информация. По сигналу «Готовность» вырабатываемого АЦП (А/Д) формируется сигнал на запись, и данные фиксируются в ячейке памяти, адрес которой установлен на выходе счетчика адресов СТА. Через время формируемого устройством задержки DL1 происходит увеличение содержимого счетчика СТА на единицу. Тем самым подготавливается новый адрес ячейки памяти. Величина задержки определяется временем записи информации в запоминающее устройство. Сигнал на увеличение содержимого счетчика поступает через элемент «И», второй вход которого связан с выходом триггера Т, формирующего сигнал «Конец ОЗУ». Сигнал «Готовность» через второй элемент «И» поступает на управляющий вход УВХ, переводя его в режим хранения. Через время равное  $\tau_3''$ , формируемого элементом задержки DL2, производится запуск АЦП на новый цикл преобразования. Величина задержки определяется параметрами установления сигнала на выходе УВХ. Цикл ввода информации заканчивается как только все ячейки памяти будут заполнены. Это состояние определяется сигналом переполнения возникающим на выходе СТА. По этому сигналу триггер Т защелкивается и формирует сигнал запрета на обоих элементах «И», переводя схему в режим ожидания обращения к МП. МП анализирует сигнал готовности и если он установлен, формирует последовательностей действий по обработки информации содержащейся в ОЗУ (RAM). Готовность схемы анализируется микро-ЭВМ. Как только процесс ввода заканчивается, схема установки триггера Т в нулевое состояние запрещает пуск АЦП. В запрещенном состоянии схема

находится весь период времени, который необходим для перезаписи



ИН

Рис. 4.10. Подсистема аналогового ввода с использованием буферного ЗУ

формации из ЗУ в память микро-ЭВМ. Перезапись информации осуществляется в следующей последовательности. Микро-ЭВМ циклически опрашивает триггер готовности Т. С появлением на его инверсном выходе сигнала логического нуля, микро-ЭВМ вызывает программу перезаписи информации. В счетчик заносится первый адрес, по которому с приходом сигнала RD, извлекаются данные и переписываются в память микро-ЭВМ. Затем устанавливается новый адрес и снова считываются данные. Этот процесс повторяется до тех пор, пока все данные не будут переписаны из буферного ЗУ в память микро-ЭВМ. Последовательность выполняемых действий представлена временными диаграммами на том же рисунке.

Оценим время, затрачиваемое на ввод одного слова информации. Это время складывается из времени установления адреса, в счетчике адресов  $t_{аун}$ , времени включения УВХ  $t_{уех}$ , времени включения начала преобразования АЦП  $t_{ацп}$ , времени фиксации данных в запоминающем устройстве  $t_{зу}$ , т.е.

$$t_0 = t_{АЦП} + t_{УВХ} + t_{ЗУ} + t_{СТА}$$

Полный цикл определяется емкостью ОЗУ и равен:

$$t'_0 = \sum_{n=0}^k (t_{АЦП} + t_{УВХ} + t_{ЗУ} + t_{СТА})_n$$

Если в подсистеме ввода используются несколько однотипных устройств, т.е. производится измерение информации от нескольких датчиков, то алгоритм работы несколько видоизменяется. При этом микро-ЭВМ опрашивает не триггер готовности, а регистр, в котором формируется слово готовности всех устройств..

В этом случае с использованием принципа маскирования определяется номер канала готового к обмену информации. Обслуживание соответствующего канала осуществляется по его готовности. Поскольку все каналы построены одинаково, то опрос осуществляется последовательно. Номер канала обслуженного устройства запоминается в памяти микро-ЭВМ. Это делается для того, чтобы избежать повторного ввода данных из этого канала.

Алгоритм работы этого устройства представлен на рис.4.11.

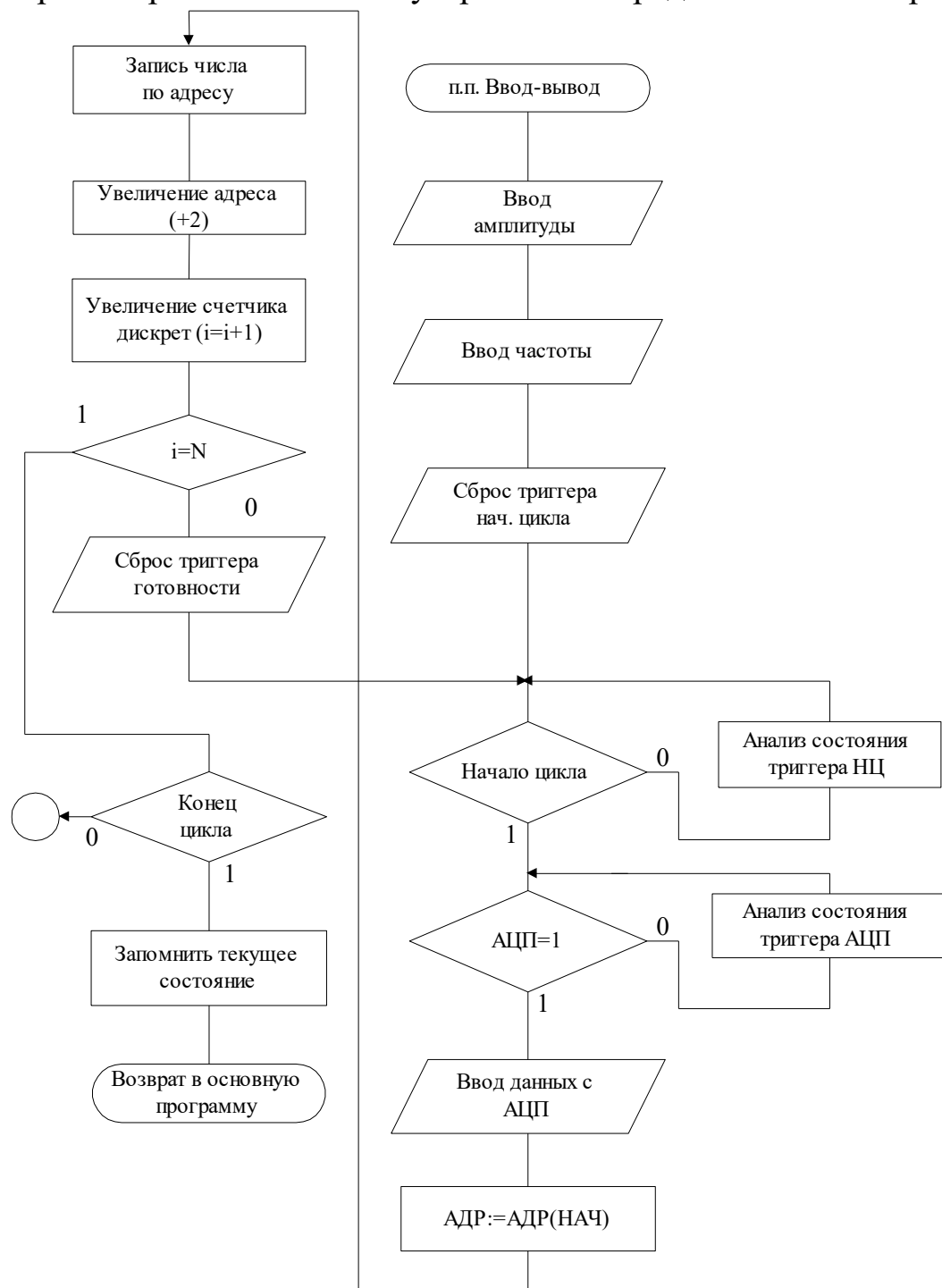


Рис. 4.11. Алгоритм ввода информации (к схеме рис.4.10)

Повторный запуск соответствующего канала осуществляется в зависимости от принятой программы проведения исследований объекта.

Отличительная черта рассмотренной схемы - ее высокое быстродействие, определяемое исключительно временем преобразования

АЦП. При таком режиме работы рационально используются вычислительные ресурсы микро-ЭВМ. Она выполняет текущие программы расчетов и при необходимости обращается за информацией к соответствующему каналу. Число точек дискретизации в этой схеме может быть изменено. Это позволяет в зависимости от частоты входного сигнала уменьшать или увеличивать длину выборки реализации. Для этого в схему вводится дополнительный счетчик с предварительной установкой коэффициента пересчета, определяющего число точек выборки. Счетчик устанавливается между входом и выходом задержки сигнала готовности АЦП (на схеме не показан). Это несколько усложняет схему, но дает возможность более эффективно оценивать сигнал измерения.

Параметры схемы можно определить исходя из следующих соотношений.

1. Определение разрядности АЦП осуществляется по формуле, приведенной выше.

2. Объем памяти можно рассчитать из простого соотношения.

$$O = \frac{t_{\text{сиг}}}{t_{\text{наб}}}$$

где  $t_{\text{наб}}$  время наблюдения сигнала,  $t_{\text{сиг}}$  время соответствующее максимальной частоте наблюдаемого сигнала.

3. Число разрядов регистра адреса находится исходя из объема памяти, т.е.

$$N_{CT_A} = \frac{1}{\log 2} \log O$$

4. Время задержки сигнала в схеме  $DL1$  определяется как сумма:

$$t_{DL1} = t_{3V} + t_{\&}$$

Значение  $t$  всех элементов определяется по данным, приведенным в справочниках по микросхемам.

5. Время задержки  $DL2$  определяется исходя из времени установления схемы выборки-хранения, т.е.

$$t_{DL2} = t_{VBX} + t_{3V} + t_{\&}$$

5. Для многоканальных устройств число разрядов регистра готовности равно числу каналов, используемых в процессе исследований.



$$N_{PEГ} = N_K$$

Рассмотренная схема имеет ряд модификаций. Подобные схемы могут строиться с использованием одного буферного запоминающего устройства и несколькими каналами, каждый из которых имеет свой АЦП. Однако возникает ряд трудностей, связанных, например, с идентификацией номера канала и соответствующей информации, занесенной в буферное ЗУ. В этих схемах необходимо устанавливать специальные схемы выделения приоритета или последовательности записи информации в ЗУ. При этом каждому из каналов должны соответствовать группы адресов. Так, если мы имеем три канала ввода, то номера адресов распределяются следующим образом. Первому каналу соответствует последовательность адресов

$$N_k = \sum_{i=0}^k N_i \text{ где } i = \overline{0, i+3}, \text{ второму } N_k = \sum_{i=1}^k N_i, \text{ где } i = \overline{1, i+3}, \text{ третьему}$$

$$N_k = \sum_{i=2}^k N_i, \text{ где } i = \overline{2, i+3} \text{ и т.д.}$$

Эту же проблему можно решить и несколько иным способом. Счетчик адресов можно построить таким образом, что при асинхронном обращении выбираются нужные адреса, т.е. их последовательность формируется логическими схемами. При анализе введенной информации в микроЭВМ не возникает проблемы отыскания нужной информации. Реализация одной из схем подобного типа представлена на рис.4.12. В этой схеме идентификатор работающего канала построен на элементах памяти. Для установления номера канала используется счетчик  $CT_A$ , который выполняя свою основную задачу, формирования адреса текущей ячейки памяти для хранения вводимых данных, одновременно фиксирует и номер АЦП. Иначе говоря, вводимые данные "привязываются" к конкретному каналу. Это в последствие значительно упрощает процедуру сортировки введенных данных.

Следует отметить также, что получаемые задержки на переключение АЦП снижают максимальную частоту дискретизации и поэтому эти схемы могут быть рекомендованы для сигналов, частота которых не выше одного, двух кГц.

Выделенная серым фоном часть схемы может быть реализована и во внутренней структуре микроконтроллера. Это позволяет сократить число элементов схемы, переводя ее в разряд перепрограммируемых. В данном случае быстроедействие по вводу информации не-

сколько снижается, но при этом схема получает функциональную гибкость.

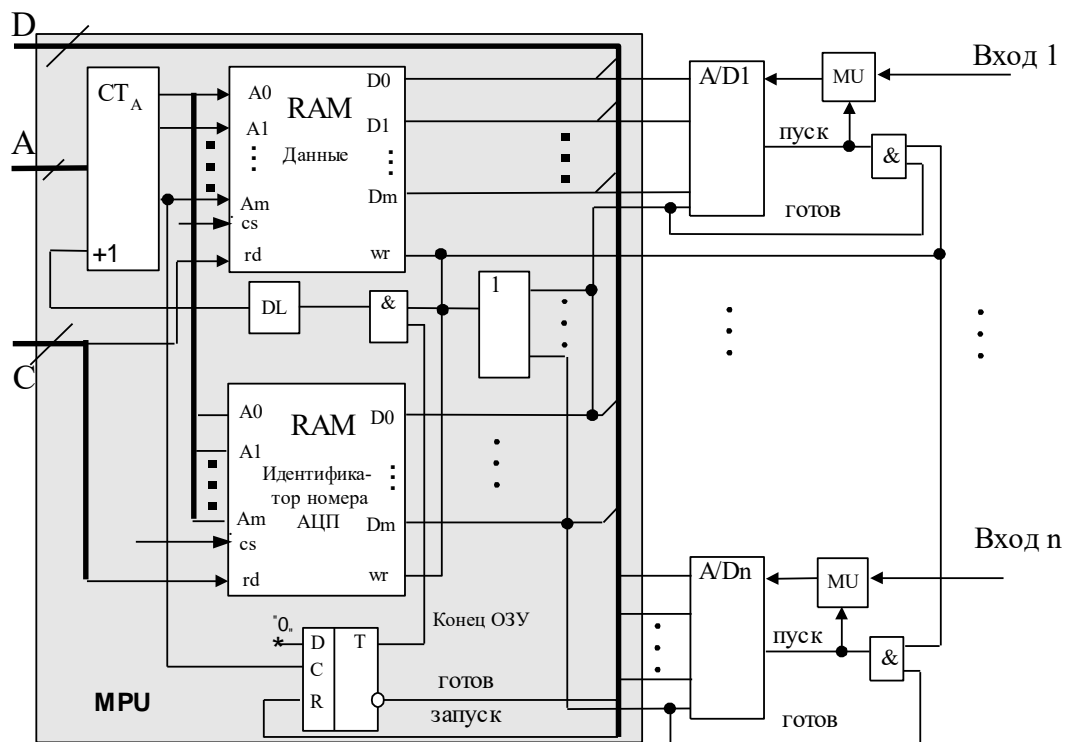


Рис. 4.12. Структурная схема многоканального ввода информации с буферным ОЗУ и идентификатором номера АЦП

Особый интерес представляет собой схемы, представленные на рис.4.13. Схему, представленную на рис.4.13а можно считать канонизированной. Она обеспечивает работу в синхронном и асинхронном режиме. Работая асинхронно, она может записывать измеряемую информацию последовательно с каждого источника информации. При этом все процессы в схеме происходят автоматически, а ее запуск осуществляется от микро-ЭВМ с использованием программной утилиты. Синхронный режим обеспечивает произвольный доступ к номеру канала и вводимым данным. Можно устанавливать последовательность съема информации, заранее программируя последовательность получения информации. Загрузка памяти данными, так и их извлечение, может осуществляться в произвольном порядке, что также программируется перед началом работы схемы. В составе устройства

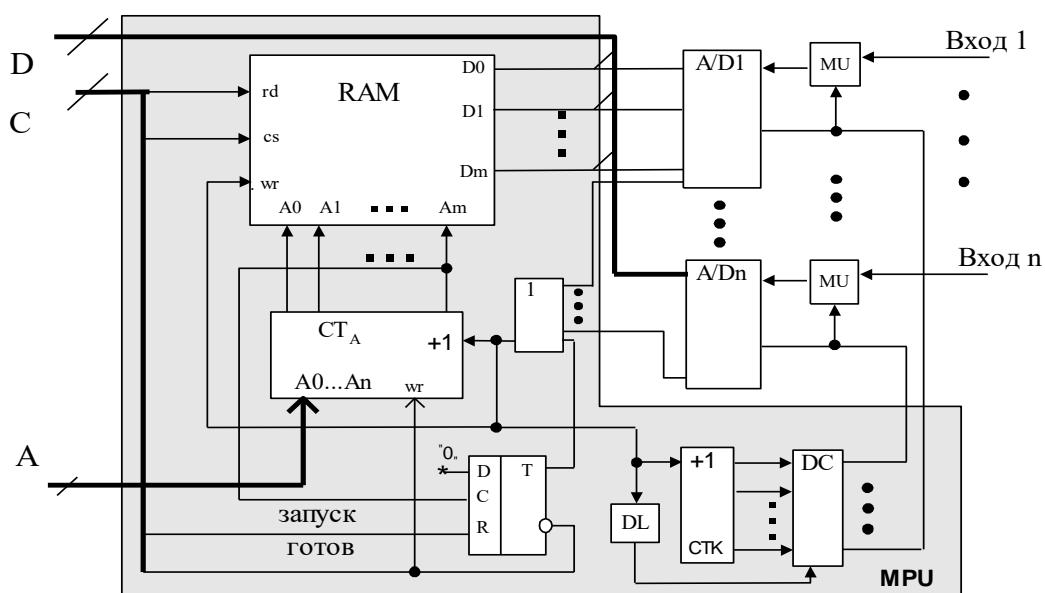
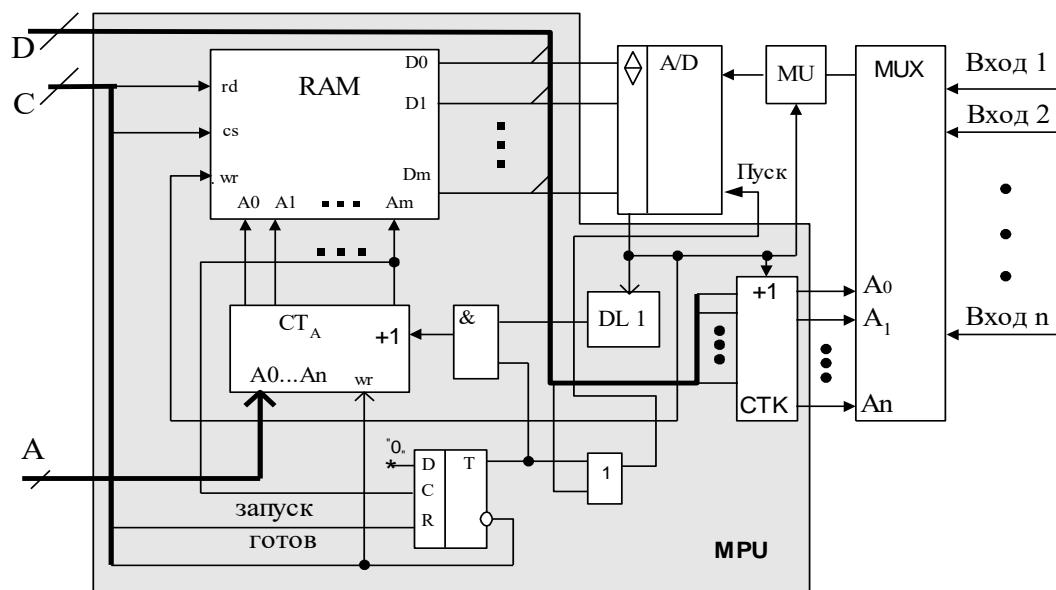


Рис. 4.13. Структурные схемы многоканального ввода диагностических данных: а) с коммутатором на входе, б) с отдельными каналами ввода

используется аналоговый коммутатор, число каналов которого, как и в предыдущих случаях, определяется числом источников информации. АЦП, используемый в схеме такого типа, должен иметь максимальную частоту установления разрядов, а устройство памяти должно иметь минимальное время доступа. Время установления разрядов счетчика адресов должно быть меньше времени преобразования дан-

ных в АЦП. Все процессы в схеме инициируются микро-ЭВМ с подачи сигнала на запуск АЦП. После чего микро-ЭВМ переходит в режим ожидания готовности АЦП, если используется синхронный режим, или ждет сигнала окончания заполнения ОЗУ, если схема работает в асинхронном режиме.

Режим задается управляющим словом, формируемым программным путем. Согласно запрограммированной процедуре устройство работает до тех пор пока не будет закончен прием данных.

После окончания ввода данных программа переходит на следующий этап, в котором производится обработка введенных данных. Фрагмент алгоритма работы представлен на рис.4.14. Схема позволяет производить  $10^6$  измерений в секунду.

Схема представленная на рис.4.13б обеспечивает ввод информации с использованием нескольких АЦП. В отличие от предыдущей схемы, работающей последовательно, рассматриваемая схема позволяет выполнять параллельный ввод данных по нескольким каналам одновременно. «Привязка» информации к измеряемому процессу осуществляется с использованием двух счетчиков установленных на адресных входах ОЗУ и на входах управления АЦП. В остальном обе схемы работают одинаково. Расчет параметров элементов схемы аналогичен ранее приведенным.

В диагностических системах, предназначенных для научных исследований, подсистема ввода аналоговой информации должна строиться с использованием микропроцессорных устройств. В этом случае микро-ЭВМ полностью ориентирована на прямые расчеты, связанные с обработкой информации, а обращение к подсистеме ввода осуществляется по мере необходимости.

Иными словами подсистема аналогового ввода выполняется в виде одноплатного контроллера. Идеология построения основывается на ранее рассмотренном материале, а микропроцессор выполняет функции управления и распределения информации.

Реализация выше приведенных схем на основе микро-ЭВМ (выделенное серым цветом на рис.4.10, 12, 13.) предполагает использование специальных режимов. При использовании внутреннего ЗУ

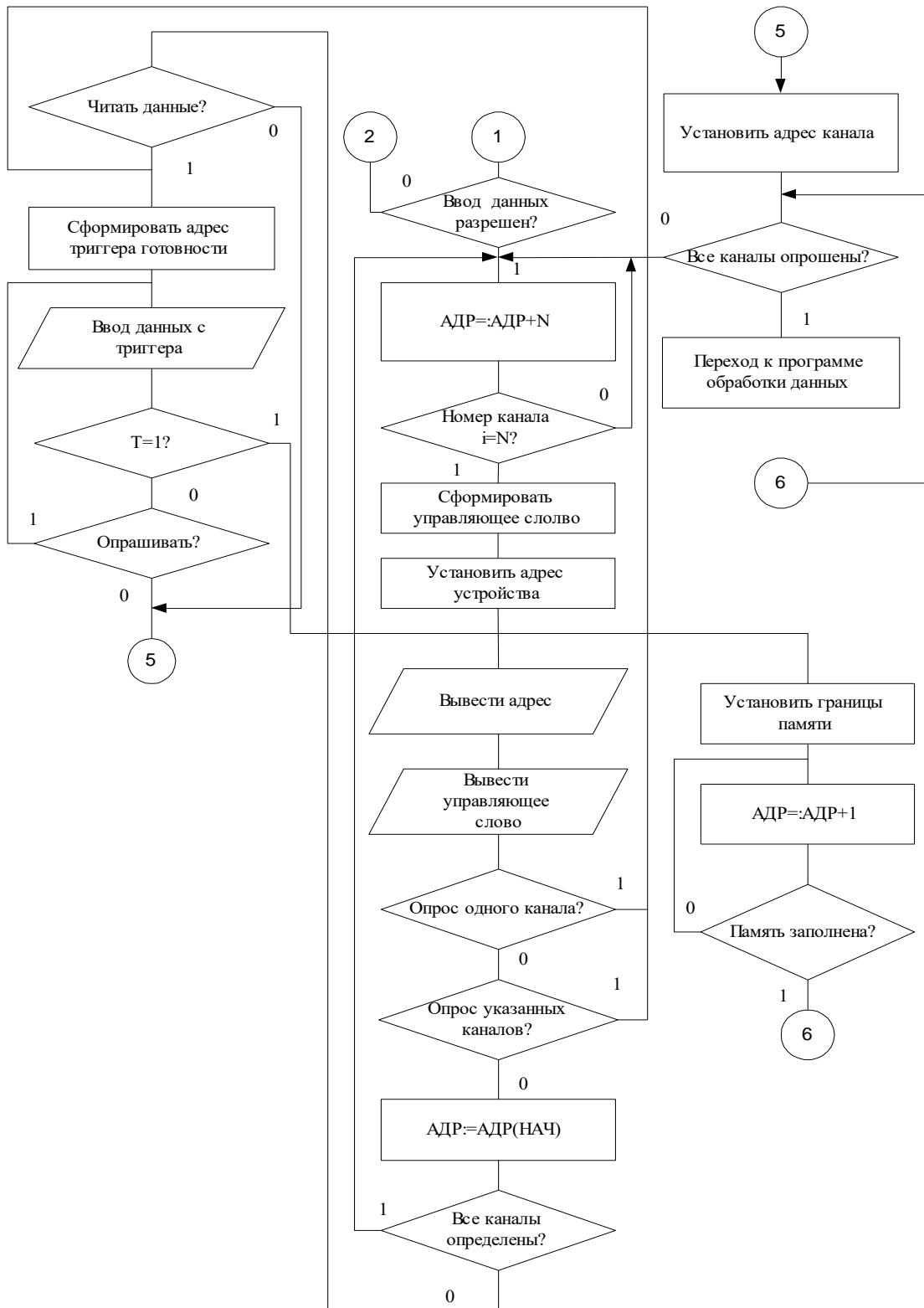


Рис. 4.14. Фрагмент алгоритма многоканального ввода диагностических данных

микро-ЭВМ эффективным становится режим прямого доступа к памяти.

Для построения схемы необходим контроллер прямого доступа к памяти. В этом режиме работы микро-ЭВМ, по сигналу запроса прямого доступа к памяти, осуществляет переключение шин, представляя возможность внешнему устройству, в качестве которого выступает АЦП, монополюсно использовать шины микро-ЭВМ для передачи информации в микро-ЭВМ. Здесь можно реализовать передачу информации побайтно, и тогда каждый раз необходимо инициировать сигналы прямого доступа к памяти, выполняя полностью всю процедуру от начала запроса до ввода данных, либо передавать поток информации массивом из  $K$ - слов. В последнем случае значительно увеличивается частота передачи данных в микро-ЭВМ. Рассматриваемый режим позволяет обслуживать один канал, однако при наличии специальных логических устройств можно передавать информации по нескольким каналам одновременно.

При многоканальном сборе информации возникает необходимость идентификации вводимых данных. Провести идентификацию можно двояко. В первом случае, в аппаратной части устанавливается жесткое соответствие номеров канала, а ввод данных производится в этой, строго установленной последовательности. Во втором случае программно передается номер канала, что приводит к необходимости иметь в памяти программный счетчик каналов, оформленный в виде стека. Тогда при использовании данных идет последовательная загрузка счетчика номеров каналов и извлекается соответствующая информация из устройства памяти. Адрес и данные передаются одним байтом, старшая часть которого несет информацию о номере канала. Схема такого устройства представлена на рис.4.15.

Следующим режимом работы является режим работы по прерыванию. Этот принцип получения диагностических данных характерен для схемы представленной, например, на рис.4.13б. Вообще говоря, рассматриваемые режимы характеризуют тот или иной способ обработки информации исходя из особенностей, связанных с объемами перерабатываемой информации, сложностью программного обеспечения, предназначенного для расчетов необходимых характеристик, загрузки вычислительной мощности ЭВМ, быстродействия проведения измерений и диагностики и т.д.

Особенностью данного режима является использование контроллера прерываний. Работа подсистемы основана на формировании

сигналов запроса прерывания на приостановку вычислений и обслуживания устройства, сформировавшего запрос. Каждый из каналов ввода имеет свой уровень в системе прерывания. В зависимости от быстродействия измерительного канала, т.е. измеряемого процесса, устанавливается последовательность обслуживания. Самые быстрые процессы обслуживаются вне очереди, что и определяется уровнем приоритета прерываний. В качестве сигнала запроса на прерывания используется сигнал готовности АЦП, который поступает в схему выделения приоритета. Затем контроллер формирует вектор прерывания и выставляет сигнал запроса прерывания.

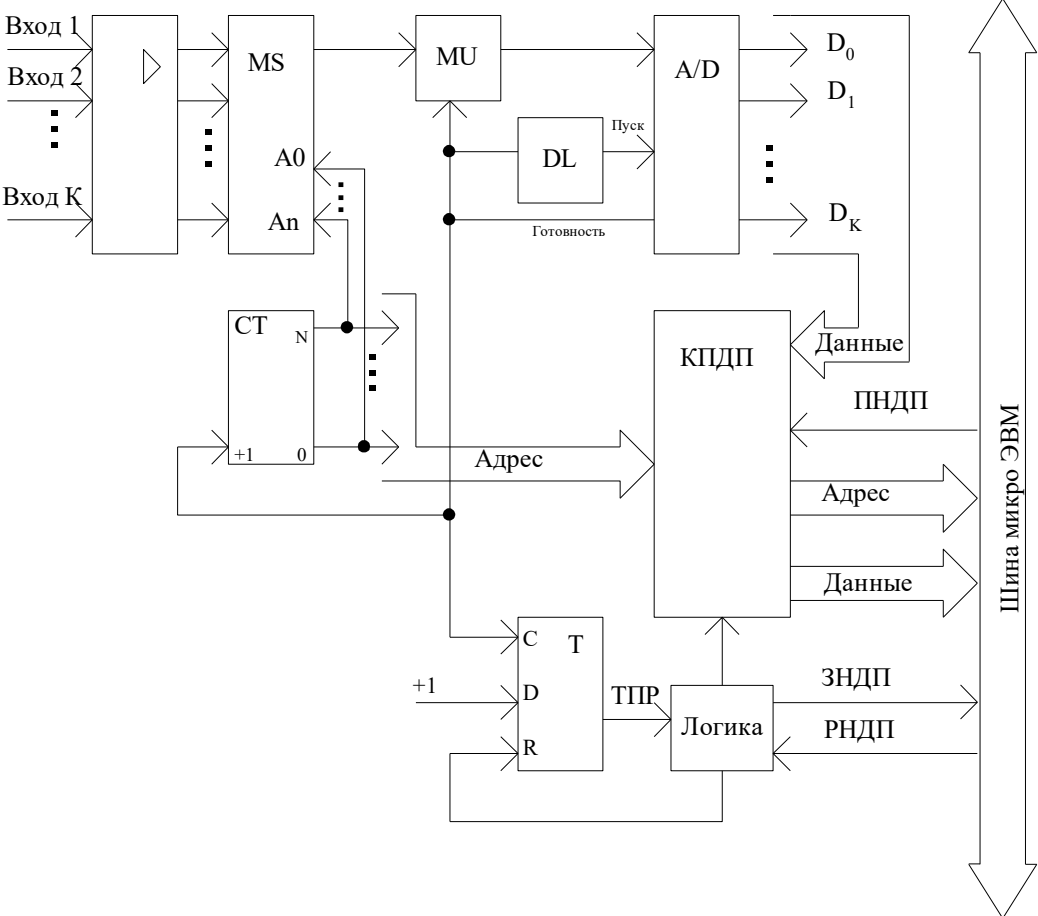


Рис. 4.15. Структурная схема ввода аналоговой информации в режиме ПДП

На основе этого сигнала микро-ЭВМ останавливает процесс вычислений и запоминает текущую информацию о состоянии регистров процессора в стеке. Затем микро-ЭВМ вырабатывает сигнал разрешения прерывания. На основе этого сигнала вырабатывается сигнал управления буферными схемами, установленными на выход шины данных АЦП. Информация поступает на шины микро-ЭВМ и при за-

несении в память принятой информации микро-ЭВМ формирует сигнал подтверждения прерывания и переходит к выполнению основной программы. Схема, реализующая этот режим работы, представлена на Рис.4.16. Одновременно с началом обслуживания прерванной программы микро-ЭВМ формирует сигнал на запуск соответствующего АЦП.

Рассмотренные режимы работы в равной степени касаются и обработки информации, при условии использования цифровых структур подсистем ввода. Естественно, что сами схемы в ином виде формируют те или иные сигналы сопровождения занесения измеренной информации.

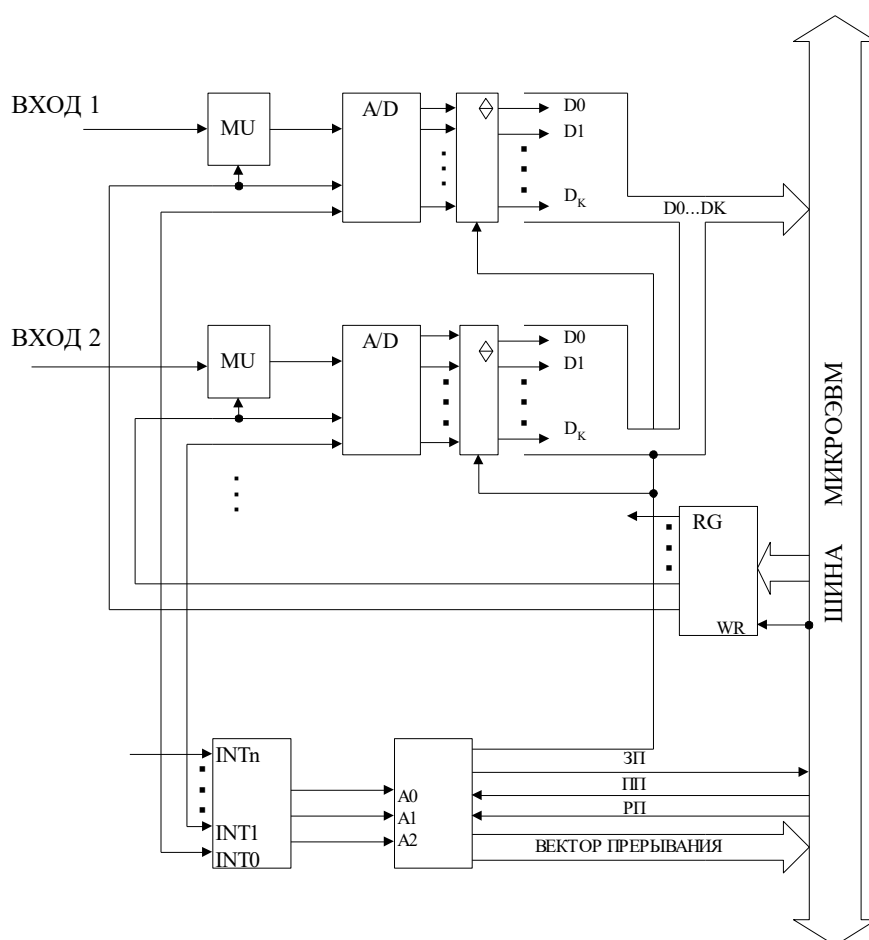


Рис. 4.16. Структурная схема ввода аналоговой информации в режиме прерываний

Поэтому подробно рассматривать такие структуры нет необходимости.



#### 4.4. Реализация схемы микропроцессорного ввода информации

Рассмотрим практическую схему подсистемы ввода аналоговой информации, представленную на рис.4.17.

Она состоит из аналогового мультиплексора DA6, регистра выбора канала ввода DD1, аналого-цифрового преобразователя, построенного по схеме АЦП последовательных приближений, на элементах DD2, регистр последовательных приближений, DA4, цифроаналоговый преобразователя, DA3, усилитель, DA1 источник опорного напряжения. Запоминание аналогового входного сигнала осуществляется с использованием устройства выборки-хранения (УВХ) DA5.

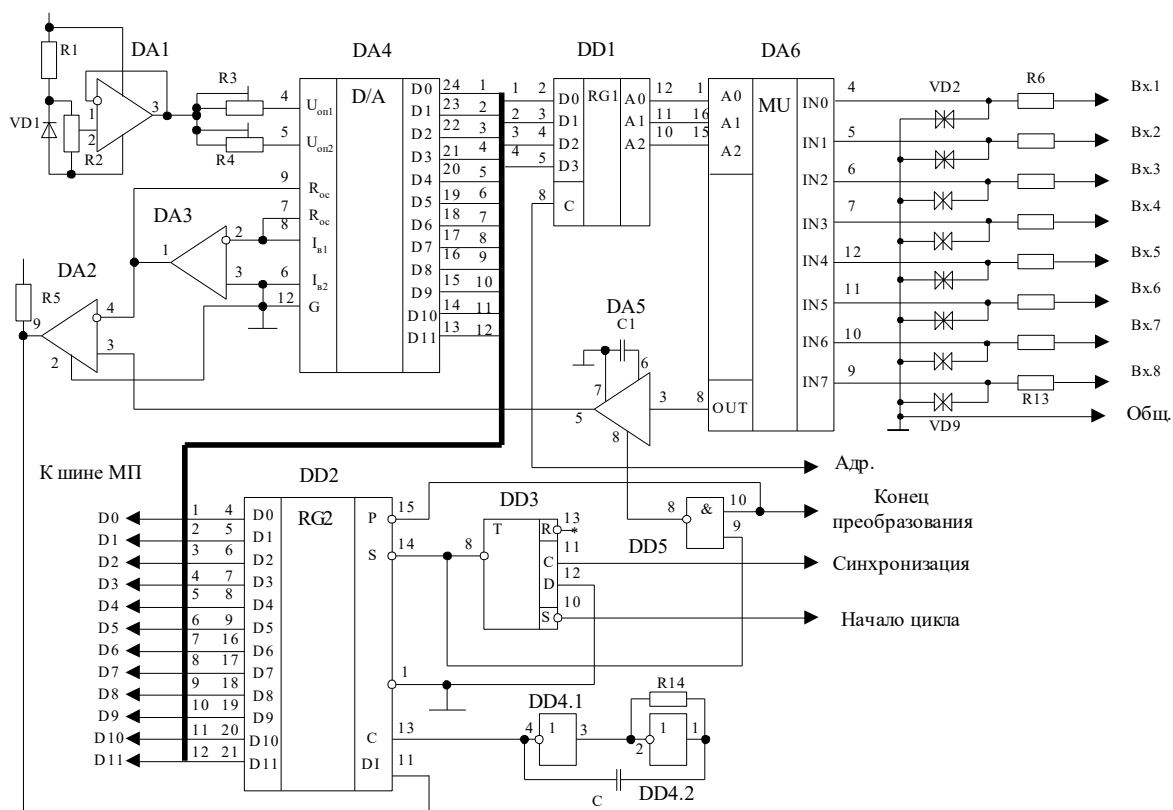


Рис. 4.17. Электрическая принципиальная схема ввода аналоговой информации

Управление работой схемы основано на сигналах формируемых от ЭВМ и сигнале, приходящем от задающего генератора, формируемого в начале каждого периода развертки. Схема работает следующим образом.

Сигнал, сформированный АЦП, вывод 15, анализируется ЭВМ. Этот процесс продолжается до тех пор, пока на этом выходе не сфор-

мируется уровень логической "1", что свидетельствует о конце преобразования текущего значения напряжения. По окончании анализа формируется сигнал "Начало цикла", устанавливающего триггер в единичное состояние и с приходом сигнала синхронизации запускается цикл преобразования. Цикл преобразований осуществляется за 12 тактов генератора, собранного на элементе DD4. Время преобразования АЦП, при частоте опорного генератора 2,5МГц, составляет 4,8мкс.

Как только этот процесс заканчивается, то компаратор запрещает дальнейшее прохождение импульсов и формируется сигнала конца преобразований. Процесс преобразований продолжается в течение времени определяемым управляющей ЭВМ.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Определение количества информации.
2. Квантование сигнала (амплитудно-временная дискретизация).
3. Алгоритм обработки информации (сглаживание.)
4. Диагностика на основе измерений информации: структура, общий принцип.
5. Принципы переработки аналоговых сигналов.
6. Алгоритм обработки информации (прореживание).
7. Расчетные соотношения для оценки количества информации при статистическом оценивании.
8. Ввод аналоговой информации (одноканальный).
9. Алгоритм обработки информации (аппроксимация, методом наименьших квадратов).
10. Расчет информации по соотношению сигнал/шум.
11. Ввод аналоговой информации (многоканальный).
12. Алгоритм обработки информации (цензурирование).
13. Достоинства и недостатки диагностики на основе измерения количества информации.
14. Определение количества информации по Шеннону.
15. Варианты структур аналогового ввода в зависимости от быстродействия.
16. Алгоритм обработки информации (численное интегрирование).
17. Понятие пространства состояний. Основные соотношения.
18. Варианты аналогового ввода на основе процессоров.
19. Алгоритм обработки информации (численное дифференцирование).
20. Матрично-векторная запись для описания систем в пространстве состояний. Вектор соотношения.
21. Устройство формирования управляющих сигналов, обобщенная структура.
22. Алгоритм обработки информации (сглаживание).
23. Диагностика в пространстве состояний. Структура диагностики.
24. Структура генераторов простых сигналов.
25. Алгоритм обработки информации (прореживание).

26.Методы принятия решений при диагностике в пространстве состояний. Алгоритм.

27.Генераторы, формирователи сложных сигналов.

28.Алгоритм обработки информации (аппроксимация, методом наименьших квадратов).

29.Матрица принятия решений в методе пространство состояний

30.Генераторы на основе ПЗУ.

31.Алгоритм обработки информации (цензурирование).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усложнение технических систем, повышенные требования к надежности, настройка, наладка и ремонт напрямую связаны с системами диагностирования. Рассматриваемая область применения систем диагностирования относится к робототехнике и станкостроению. Это касается как аппаратного воплощения, так и алгоритмов.

Приведенный материал основан на исследованиях автора и носит оригинальный характер. В пособии приведены сведения о алгоритмах диагностирования, основанных на современных методах обработки информации и методах их реализации с использованием микропроцессорной техники. По существу материал представляет собой научные исследования в области диагностики. Многие алгоритмы доведены до практического применения и использовались в различных технических устройствах. Приведенный материал является только частью большой работы.

В пособии представлены материалы, которые могут быть использованы непосредственно и не нуждаются в дополнительных проверках при применении. В любом случае, создание систем диагностики связано с глубоким изучением объекта, особенностям среды обитания, характеристиками. Сложность объектов предполагает обязательное использование диагностических моделей.

Особый интерес представляют алгоритмы, основанные на методах искусственного интеллекта. Этот материал, к сожалению, не вошел в данное пособие, что связано с издательскими ограничениями и является самостоятельным разделом.

Данное пособие расширяет объем знаний даваемый в пределах учебных курсов. Отдельные разделы оформлены в виде лабораторных работ и разделов практических занятий. Часть представлена в виде программных комплексов, а часть в виде диагностических моделей в среде Matlab.

Пособие может быть полезно магистрантам, аспирантам и практическим специалистам работающих в области создания электромеханических систем.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авдушев С.А., Пронин А.Е. Техническое диагностирование следящего электропривода металлорежущих станков /Тез. докл. к Всес. Научн.-техн. Совещ. Пробл. упр. пром. электромех. системами. Л., 1989. - С.67 - 69.
2. Автоматизированный электропривод /Под. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. - М.: Энергоиздат, 1990. - 544 с.
3. Акофф Р. Искусство решения проблем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 224 с.
4. Алиев Т.А. Экспериментальный анализ – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
5. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках - М.: Машиностроение, 1988. - 136 с.
6. Баранов Л.А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 304 с.
7. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. – 392 с.
8. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. - 768 с.
9. Бессонов А.А., Загашвили Ю.В., Маркелов А.С. Методы и средства идентификации динамических объектов – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. - 280 с.
10. Биргер И.А. Техническая диагностика - М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
11. Бондарь Б.Ю., Кравцов В.А., Постников Е.В. Система управления и диагностики многоканального транзисторного преобразователя //Автоматизир. электропривод. - 1990. - С.364 - 366.
12. Боровин Г.К., Гарипов В.К., Слепцов В.В Программный комплекс для исследования показателей качества электроприводов с

- использованием персональных ЭВМ //INFO-89: Междунар. симп., Минск,1989. т.2,Ч1-Минск,1989.-С.96-100.
13. Букреев В.Г., Чемерокой А.Г. Информационно-измерительный комплекс для испытания электроприводов //Тез. докл. к научн.-техн. совещ. Пробл. упр. пром. электромех. Системами, Ульяновск, сент. 1989. - Л., 1989- С.85 - 86.
  14. Вальков В.М. Микроэлектронные управляющие вычислительные комплексы: Системное проектирование и конструирование - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. - 224 с.
  15. Васин А.Н., Гаврилюк Я.Д., Иноземцев И.М. Исследование характеристик электродвигателя постоянного тока с использованием ЭВМ. Искра-1256 //Сб.научн.-метод. ст. по электротехн. (Москва) - 1989, 12 - С.137 - 142.
  16. Веселов О.В Микропроцессорные системы диагностики приводов станков и промышленных роботов //Проблемы интеграции образования и науки: Тез. докл. Науч. - техн. конф. - Москва, 1990.-С.
  17. Веселов О.В. Автоматизированная система параметрической идентификации электромеханических систем //Автоматизированные станочные системы и роботизация производства: сб. науч. труд. – Тула: ТлГТУ, 1994. С.120 - 131.
  18. Веселов О.В. Автоматизированный контроль динамических характеристик взаимосвязанных электромехатронных устройств станков //Тез. докл. Ленинград, 1989.- С.12.
  19. Веселов О.В. Выбор разрядности управляющего слова для микропроцессорных приводов с импульсно-фазовым управлением //Автоматич. манипул. и металлообраб. оборуд. с программным управл. – Тула: ТПИ,1986. - С.82-86.
  20. Веселов О.В. Графоаналитический подход к диагностике электромеханических систем //Системы управления- конверсия – проблемы: Тез. док. международной конференции, Ковров, КГТА.1996.- С.55 – 56.
  21. Веселов О.В. Децентрализованное управление микропроцессорными электроприводами гибких производственных модулей

- //Динам. и функционир. электромех. систем. - Тула, 1989. - С.56 - 62.
22. Веселов О.В. Диагностика и идентификация электромеханических систем станков и промышленных роботов //Управляемые электромеханические системы. Тез. докл. - Киров. - 1990. С.100.
  23. Веселов О.В. Диагностика неравномерности вращения электродвигателей приводов станков и промышленных роботов. //Состояние и перспективы развития электротехнологий: Тез. док. междунар. научн. техн. конф. (VI-е Бенардосовские чтения) - Иваново, 1992. - С.83.
  24. Веселов О.В. Диагностика работоспособности электромеханических преобразователей электромагнитного типа. //Автоматизированные станочные системы и роботизация производства: Сб. научн. труд. Тула, 1996.- С.101 - 114.
  25. Веселов О.В. Диагностика регулируемых приводов станков с использованием персональных компьютеров //Измер.и контр. при автоматиз. производств. проц.: Тез. докл. 2-ой Всес. конф. - Барнаул, 1991.
  26. Веселов О.В. Диагностика следящих приводов станков и промышленных роботов с использованием ПЭВМ. //Перспект. развит.и применен. средств выч. техн. для модел. и автоматиз. исследований.: Тез. докл. VIII-Всес. научн. техн. конф. - Москва, 1991г. - С.201.
  27. Веселов О.В. Диагностика электромеханических систем в пространстве состояний //Автоматизированные станочные системы и роботизация производства: Сб. научн. труд. – Тула, 1997. - С.147 - 157.
  28. Веселов О.В. Диагностика электромеханических систем на основе измерения информации. //Системы управления, конверсия, проблемы: Тез. док. междунар. научн.- техн. конф. – Ковров: КГТА, 1996 -С.288 – 290.
  29. Веселов О.В. Идентификация параметров взаимосвязанных электромеханических систем станков с использованием ЭВМ



- //Автоматизация контроля качества в ГПС.: Сб. научн. труд. Москва,1989. - С.57 - 59.
30. Веселов О.В. Идентификация параметров электромеханических систем гибких производственных модулей //Изв. вузов. сер. Электромеханика. –1998.- N1, - С.80 – 82.
  31. Веселов О.В. Информационно-измерительный комплекс на основе ЭВМ для исследования электромеханических систем //Повышение эффективности приборных устройств: Тез. докл. всес. научн.- техн. семинар. г.Суздаль, 1989. Москва, 1989. - С.89 - 100.
  32. Веселов О.В. Использование диагностических станций в управлении техническим состоянием электромеханических систем. //Тез. док. 1У международный конгресс, КТИ-2000,,: Москва, МГТУ Станкин, 2000, С.115 – 118.
  33. Веселов О.В. Компьютерные системы в управлении и разработке электроприводов //I-ая междунар. (XII всероссийская) конф. по автоматиз. электроприв.: Тез. докл. - СПб., 1995. - С.69.
  34. Веселов О.В. Микропроцессорные системы автоматизированного управления приводами ГПМ //Автоматизированное создание машин и технологий Тез. докл. Всесоюзная конференция Конструкторско-технологическая информатика. КТИ-89. - Москва, 1989. С. 44.
  35. Веселов О.В. Микропроцессорные системы диагностики приводов станков и промышленных роботов //Проблемы интеграции образования и науки: Тез. докл. науч. техн. конф. - Москва, 1990. - С.135 - 136.
  36. Веселов О.В. Микропроцессорные системы диагностики приводов станков и промышленных роботов //Станки и инструмент, 1992, №11. - С.11-15.
  37. Веселов О.В. Микропроцессорные системы управления электроприводами ГПМ //Сис. упр. произв. проц.: межвуз. сб. науч. труд. - Новочеркасск, 1990. - С.16-24.

38. Веселов О.В. Модель датчика положения и скорости микропроцессорного привода //Использов. выч. техн. и САПР в научн. исслед. и опыт. разраб.: тез. докл. – Владимир, 1987. - С.92 - 93.
39. Веселов О.В. Проектирование диагностических комплексов на основе микропроцессоров и микроЭВМ //Проектирование технологических машин: сб. науч. труд. Вып. 1. Москва: МГТУ "Станкин", 1996 – С.40 - 49.
40. Веселов О.В. Параметрическая идентификация электроприводов //5-е Всес. совещание по робототехн. системам. 30 окт.-1нояб.1990г., Геленджик - Москва, 1990.- С.130 - 132.
41. Веселов О.В. Прямые оценки качества взаимосвязанного движения электромеханических систем ГПМ //Обеспечение точности механической обработки в автоматизированном производстве. Сб. научн. труд. - Пенза, 1990.- С.43 - 45.
42. Веселов О.В. Сетевая модель диагностики электромеханических систем //Проектир. технолог. машин: Сб. научн. трудов. Издательство "Станкин", 2000, Вып. 20 - С. 8 - 14.
43. Веселов О.В. Структура программного обеспечения диагностики электромеханических систем на основе методов обучения и самообучения. //Автоматизация и информатизация в машиностроении 2000., АИМ2000., Серия Машиностроение, Тула: ТулГУ, 2000. - С.66 - 71.
44. Веселов О.В. Экспертная система реального времени для электромехатронных устройств гибких автоматизированных производств //Динамика станоч. сис. гибких автоматиз. пр-в :Тез. докл. 4-ой научн.- техн. конф - Нижний Новгород, 1992г. - С.21.
45. Веселов О.В. Экспертные системы реального времени для диагностики электромеханических систем /Производство. Технология. Экология. Протек 2000. Труды международного конгресса - М.: Изд-во «Станкин», 2000г. - С.49 - 54.
46. Веселов О.В., Еремин А.В., Веселов А.О., Никашкин А.В Высококачественная микропроцессорная система измерения положения, скорости и ускорения для электроприводов //Измерительная техника - 1998. - N 5 .

47. Веселов О.В., Жинкин П.С. Измерительный комплекс на основе ЭВМ для экспериментальных исследований электромеханических систем // Микропроцессорные средства и системы - 1990 - №5 - С.81 - 83.
48. Веселов О.В., Жинкин П.С. Контроль динамических характеристик взаимосвязанных электромеханических систем станков //Повышение качества и надежности машиностроительной продукции. Тез. докл. научн.- техн. конф.- Луцк, 1989. - С.80 - 82.
49. Веселов О.В., Немонтов В.А, Мишулин Ю.Е. Система измерений углового положения, скорости и положения ротора для электроприводов ЭПБ-2. //Измерительная техника - 1993 - №5 –С.
50. Гибсон Г., Лю Ю-Ч. Аппаратные и программные средства микроЭВМ: Пер. с англ. В.Л. Григорьев; Под ред. В.В. Сташина. - М.: Финансы и статистика, 1983. - 255 с.
51. Глазунов Л.П., Смирнов А.Н. Проектирование технических систем диагностирования - Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние., 1982- 168 с.
52. Гольденберг О.Д., Абдулаев И.М., Абиев А.Н. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей: Под ред. О.Д. Гольденберга - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 160 с.
53. Гончаров Ю.М., Лежелеков В.П., Иванюк В.А. Диагностирование систем управления автоматизированных электроприводов // Электротехника – 1989 - №3 - С.59 - 62.
54. Гуревич Б.М. Устройство для автоматических испытаний электроприводов. В сб.: Электропривод и автоматизация в машиностроении.-1987, С.8-18.
55. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем - М.: Радио и связь, 1988. - 256 с.
56. Диагностирование вентильного электропривода внешними микропроцессорными средствами /Суворов Г.В., Осипов О.И., Бутаков С.М., Гербер С.В., Мацин В.П.// Исслед. автоматизир. электроприводов, электр. машин и вентил. преобразователей: Челяб. политехн. ин-т. Челябинск, 1990. - С.68 - 75.

57. Диагностический контроль качества электромеханических преобразователей /Михайлов Г.Б., Прозоров В.А., Путников В.В., Фарафокова Т.В., Явленский А.К. //Соверш. электр. маш. и преобр. на базе применения микропроцесс. и электрон. техн.: Материалы научн.- техн. семинара. Л., 1988. - С.69 - 71.
58. Дятлов В.А., Кабанов А.Н., Милов Л.Т. Контроль динамических систем. – Л.: Энергия, 1987. - 88 с.
59. Заплечников И.Д., Мельник Д.Н., Мельник С.Е. Универсальный микропроцессорный стенд для автоматизации исследования вентиляционных систем. //Вентильные электромех. системы с постоянн. магнитами.: Всес. научн. - техн.конф. Москва, 14-17 февр., 1989. Тез. докл. - М.: 1989. - С.119.
60. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 541 с.
61. Искусственный интеллект: Применение в интегрированных производственных системах/Под ред. Э. Кьюсиака; Пер. с англ. А.П. Фоминых; Под ред. А.И. Дащенко, Е.В. Левнера. - М.: Машиностроение, 1991. - 544 с.
62. Коваль М.И., Коробко А.В., Леврехо А.Г. Система технического диагностирования следящих приводов тяжелых станков с ЧПУ //Пробл. упр. электромех. системами: Тез. докл. к Всес. научн.-техн. совещ., Ульяновск, сент. 1989. - Л., 1989. - С.65 - 67.
63. Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытание электрических машин – М.,1990. - 32 с.
64. Коган И.М. Прикладная теория информации - М.: Советское радио, 1980 - 216 с.
65. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов. - М. Высшая школа, 1987. – 248 с.
66. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1986. - 448 с.
67. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 208 с.

68. Максютов С.Г. Модель эффективности непрерывного контроля состояния изоляции электроприводов //Сб. науч. тр. Моск. ин-т нефти и газа.- 1991.- 231. - С.67 - 70.
69. Марченко Н.М., Токмакова Л.И. Регистрация и исследование динамических механических характеристик электродвигателей //Дальневосточный политехн. ин-т. Владивосток, 1988 - 6с. Деп. в информэлектро 15.09.88, 277 – эт. 88.
70. Метод функционального диагностирования автоматизированного тиристорного электропривода /Мозгалев А.В., Калявин В.П., Воеводская М.Г., Палашкин Д.Н. //Научн.-техн. прогресс в машиностр. (Москва). - 1990, 24. - С.31 - 41, 81, 84.
71. Микропроцессорная система испытаний асинхронных электродвигателей в режиме холостого хода /Мельничук П.Л., Присяжнюк В.В., Гоменюк А.С., Трофимов А.В. //Всес. научн.-техн. совещ. "Автоматиз. проектир. и пр-ва в электромашиностр." Суздаль 9-18 окт., 1989: Тез. докл. - Владимир,1989. - С.117.
72. Микропроцессорное управление технологическим оборудованием микроэлектроники: Учебн. пособие / А.А. Сазонов, Р.В. Корнилов, Н.П. Кохан и др.; Под ред. А.А. Сазонова - М.: Радио и связь, 1988. - 264 с.
73. Михайлов О.П. Динамика электромеханического привода металлорежущих станков - М.: Машиностроение, 1989 – 204 с.
74. Михайлов О.П., Веселов О.В Микропроцессорное управление приводами металлорежущих станков – Москва: НИИМаш, 1982 – 56 с.
75. Михайлов О.П., Веселов О.В Экспериментальное определение параметров привода металлорежущих станков //Станки и инструмент – 1990 - №8, - С. 9 - 10.
76. Мозгалевский А.В., Гаспаров Д.В. Техническая диагностика (непрерывные объекты) - М.: Высшая школа, 1975 – 207 с.
77. Мозгалевский А.В., Калявин В.П., Костанди Г.Г. Диагностирование электронных схем /Под ред. А.В. Мозгалевского - Л.: Судостроение, 1984 – 224 с.

78. Мозгалеvский А.В., Койда А.Н. Вопросы проектирования систем диагностирования. - Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние., 1985 – 112 с.
79. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений: Пер. с нем. – М.: Мир, 1990 – 208 с.
80. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений /А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьев, Н.Н. Слядзь, В.И. Глушков - М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
81. Осипов О.Н., Усынин Ю.С. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов - М.: Энергоиздат, 1991 – 160 с.
82. Основы технической диагностики: Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза./ В 2-х книгах. //Под ред. П.П. Пархоменко. - М.: Энергия, 1976. - 464с.
83. Остром К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ: Пер. с англ. -М.: Мир, 1987. - 480 с.
84. Осуга С. Обработка знаний: Пер. с япон. - М.: Мир, 1989.- 293 с.
85. Павлов А.В., Комягин В.Б Стенд для АСНИ микроэлектропривода //Сб. научн. тр. /Моск. энерг. ин-т.- 1989,- 213. - С.179 - 184.
86. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирования систем. - М.: Мир, 1984 – 264 с.
87. Полещук В.И. Автоматизированное нагрузочное устройство для ускоренных испытаний электроприводов /Электропривод и автоматизация в машиностроении. - 1987, С.3-7.
88. Практическое введение в технологию искусственного интеллекта и экспертных систем с иллюстрациями на Бейсике /Р. Левин, Д. Дранг, Б. Эдельсон: Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика, 1990. - 239с.
89. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. /К. Асан, Д. Ватада, С. Иваи и др.: Под ред. Т. Тэрано, К. Асан, М. Сугено.- М.: Мир, 1993.- 368 с.
90. Приобретение знаний: Пер. с япон. /Под ред. С. Осуги, Ю. Саэки. - М.: Мир, 1990. - 304 с.

91. Пуш А.В., Искра Д.Е. Диагностика станков /Тез. док. 1У международный конгресс, КТИ-2000.: Москва, МГТУ Станкин, 2000, С.122 –1 25.
92. Розенвавассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем автоматического управления. - Л.: Энергия, 1969. – 208 с.
93. Сивкова А.П., Осипов О.И. Алгоритм диагностирования работоспособности электропривода. В сб: Исследование автоматиз. электроприв., электр. машин и вентиль. преобр.-1988, С.65 – 74.
94. Системы управления базами данных и знаний: Справочное издание/ А.Н. Наумов, А.М. Вендров, В.К. Иванов и др.; Под ред. А.Н. Наумова. - М.: Финансы и статистика, 1991. - 352 с.
95. Смит Джон М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров-исследователей: Пер. с англ. Н.П. Ильиной; Под ред. О.А. Чембровского - М.: Машиностроение, 1980. - 271 с.
96. Современные методы идентификации систем /Под ред. П. Эйкхоффа. - М.: Мир. 1983. - 400 с.
97. Справочник по автоматизированному электроприводу./ Под ред. В.А. Елисеева – М., Энергия, 1983 – 616 с.
98. Справочник по теории автоматического управления /Под ред. А. А. Красовского - М.: Наука, 1987. - 712с.
99. Суворов Г.В., Бутаков С.М. Многоканальное портативное устройство магнитной записи аналоговых сигналов. /Исследование электропривода, электрических машин и вентильных преобразователей - М., 1987. - С.79 - 82.
100. Таунсенд К., Фохт Д. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ: Пер. с англ. /Предисл. Г.С. Осипова - М.: Финансы и статистика, 1990. – 320 с.
101. Техническая диагностика гидравлических приводов /Т.В.Алексеева, В.Д.Бабанская, Т.М.Башта и др.; Под общ. ред. Т.М. Башты.- М.:Машиностроение, 1989.-264с.
102. Технические средства диагностирования: Справочник /В.В. Клюев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.; Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672с.

103. Ту Ю. Современная теория управления - М.: Машиностроение, 1971. - 472 с.
104. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам. Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. – 388 с.
105. Функционально-тестовое диагностирование электроприводов автоматизированного оборудования /Синичкин С.Г., Лобанов С.Н., Мелехов Ю.А., Серый В.В., Ондрин С.А. //Научн. - техн. прогресс в машиностр. (Москва). - 1990,24 - С.42 - 50, 81, 84.
106. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода - М.: Энергия, 1979. - 616 с.
107. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности - М.: Советское радио, 1962. – 552 с.
108. Экспертная система диагностики мехатронных систем/ Михайлов Г.Б., Путников В.В., Проворов В.А., Самодуров В.П., Сударикова Е.В., Явленски А.К. //2 Всес. науч.- техн. конф. по электромехатронике: Матер. науч.- техн. Ч2./ О-во «Знание» РСФСР. Ленингр. дом науч.- техн. проп.- СПб., 1991.- С.156 - 157.
109. Юэн Ч., Бичем К., Робинсон Дж. Микропроцессорные системы и их применение при обработке сигналов: Пер с англ. /Ч. Юэн, К. Бичем, Дж. Робинсон. - М.: Радио и связь, 1986. - 296 с.



*Учебное электронное издание*

ВЕСЕЛОВ Олег Вениаминович

ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие

*Издается в авторской редакции*

**Системные требования:** Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10;  
Adobe Reader; дисковод CD-ROM.

**Тираж 25 экз.**

Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
Изд-во ВлГУ  
rio.vlgu@yandex.ru

Кафедра автоматизации, мехатроники и робототехники  
010848\_j@mail.ru