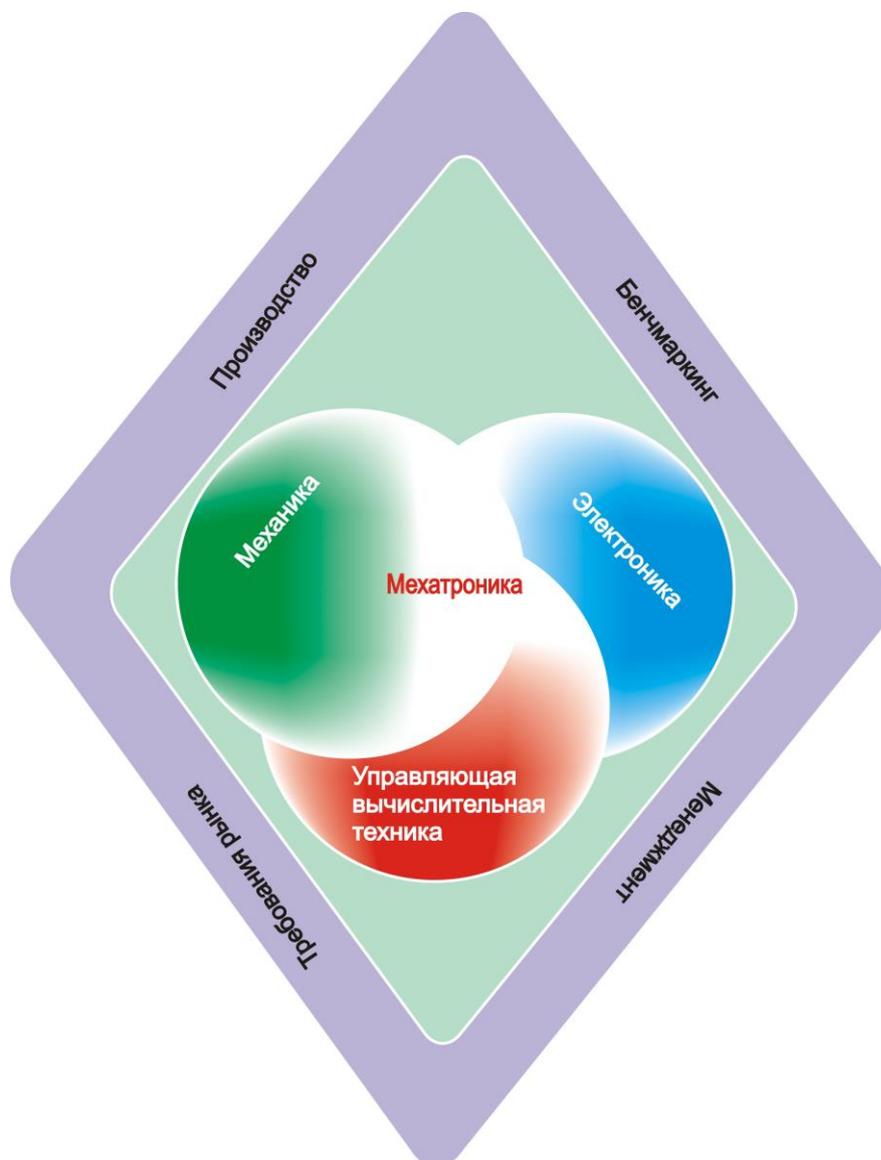


Институт Механики и сейсмостойкости сооружений  
Ташкентский автомобильно-дорожный институт



## **Мехатронные системы машин**

Ташкент – 2010

УДК 681.586.773

Печатается по постановлению Ученого Совета Института механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан.

Составители: академик Лебедев О.В.

мл. научн. сотр. Хакимзянов Р.Р.

Книга рассчитана на аспирантов, научных сотрудников и инженеров, специализирующихся в области мехатроники, а также на студентов механических факультетов ВУЗов и магистрантов.

Рецензенты:

д.т.н., проф. Шермухамедов А.А.

д.т.н., проф. Шарипов К.А.

д.т.н., проф. Хромова Г.А.

© Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз, 2010.  
ISBN 978 – 5 – 217 - 03388

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ	6
1. Введение, целевые задачи мехатроники.	8
1.1 Тенденции развития автомобильных мехатронных систем	10
2. Основные понятия и определения в мехатронике.	13
2.1. Основная терминология мехатроники.	13
2.2 Гомеостаз, самоорганизация и антропоморфность мехатронных объектов (МО).	15
3. Новые технологии в мехатронике.	17
4. Подход к проектированию интегрированных мехатронных модулей и систем.	21
5. Метод объединения элементов мехатронного модуля в едином корпусе.	24
6. Мехатронные модули движения.	28
6.1. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)	29
6.1.1. Принципы построения АЦП	29
6.1.2. Преобразователи напряжения в частоту (ПНЧ)	31
6.1.3. АЦП двойного интегрирования	34
6.1.4. АЦП последовательного приближения	37
6.1.5. Улучшение разрешающей способности систем сбора данных	38
7. Интеллектуальные мехатронные модули	40
8. Производственные машины с параллельной и гибридной кинематикой.	43
8.1 Мехатронные технологии обработки материалов резанием.	43
8.2. Мехатронный робот-станок "РОСТ 300"	46
9. Управление движением мехатронных систем на основе Интернет технологий	48
10. Сенсорные элементы, датчики, чувствительные элементы и устройства мехатронных систем.	51
10.1. Мехатронные модули микроперемещений	53
10.2 Датчики и чувствительные элементы мехатронных модулей.	54
10.3. Ультразвуковые датчики расстояний для мехатронных модулей движения автомобиля.	56
10.4. Радарные датчики в мехатронных модулях движения автомобилей.	57
10.5 Датчики, работающие на эффекте Холла.	61
10.6. Электронный блок управления (ЭБУ)	64
10.6.1. Датчик температуры охлаждающей жидкости	65
10.6.2 Датчик температуры воздуха во впускном коллекторе (трубопроводе) (ДТВ).	65
10.6.3. Датчик концентрации кислорода в отработавших газах (ДКК)	65
10.6.4. Датчик положения дроссельной заслонки (ДДЗ)	66
10.6.5. Датчик абсолютного давления во впускном трубопроводе (ДАД).	66
10.6.6. Датчик скорости автомобиля (ДСА)	66
10.6.7. Датчик включения системы кондиционирования воздуха	66
10.6.8. Автомобильные видеодатчики	66
11. Примеры интеллектуальных мехатронных модулей	69
12. Энергетический расчет универсального мехатронного модуля	73
12.1. Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при незначительных динамических нагрузках	73
12.2. Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при значительных динамических нагрузках	76
12.3. Передаточное отношение преобразователя движения	76

12.4. Оптимизация выбора силовых элементов	77
13. Преобразователи движения	79
13.1. Реечная передача	79
13.2. Кинематический расчет передачи.	80
13.3. Допускаемые контактные и изгибные напряжения.	81
13.4. Геометрический расчет передачи.	83
13.5. Проверочный расчет зубьев шестерни и рейки на выносливость по контактным напряжениям.	87
13.6. Проверочный расчет зубьев шестерни и рейки на выносливость по напряжениям изгиба.	89
14. Расчет параметров двигателя и редуктора скипового подъемника	92
14.1. Исходные данные для расчета	92
14.2. Расчетно-конструкторская часть	93
14.3. Расчет мощности двигателя скипового подъемника	94
14.4. Выбор двигателя	96
14.4 Выбор редуктора	100
15. Расчет широтно-импульсного преобразователя (ШИП)	101
15.1. Исходные данные для расчета	101
15.2 Выбор силовых полупроводниковых элементов	101
15.3. Определение оптимальной частоты коммутации ШИП	101
15.4 Определение постоянных и базовых величин, необходимых для расчета электромагнитных нагрузок энергетического канала	102
15.5. Среднее значение тока двигателя	103
15.6. Действующее значение тока двигателя	103
15.7. Значение среднего тока транзисторного ключа при максимальном токе двигателя	103
15.8. Значение действующего тока транзисторного ключа	103
15.9. Среднее значение тока шунтирующего диода	104
15.10. Значение действующего тока шунтирующего диода	104
15.11. Потери энергии в силовом транзисторном ключе	104
15.12. Определение потерь мощности в шунтирующем диоде	104
15.13. Максимальную температуру структуры диода	104
15.14. Расчет суммарных дополнительных потерь в системе ШИП-ДПТ	105
15.15. Абсолютные дополнительные потери	105
15.16. Основные потери в цепи якоря двигателя	105
15.17. Потери мощности в цепи якоря двигателя	105
16. Электромагнитные тормозные устройства	106
17. Расчет и выбор параметров сглаживающего фильтра	111
17.1. Расчет коэффициента сглаживания	111
17.2. Выбор схемы фильтра	111
17.3. Определение минимального значения индуктивности дросселя	111
17.4. Расчет емкости конденсатора фильтра	111
17.5. Рабочее напряжение конденсатора	111
18. Кинематическая погрешность цилиндрической зубчатой передачи	112
18.1. Мертвый ход цилиндрической зубчатой передачи.	114
19. Датчики информации	115
19.1. Датчики положения и перемещения	115
19.2. Аналоговые датчики положения	116
19.3. Цифровые датчики положения	118
20. Надежность мехатронных модулей	124
20.1. Надежность в период постепенных отказов.	125
20.2. Надежность сложных систем.	127

21. Диагностика мехатронных систем автомобилей	129
22. Антиблокировочная мехатронная система тормозов (ABS) автомобиля	135
23. Нейронные сети в мехатронике	141
23.1 Рекуррентная хэммингова сеть.	143
23.2. Решение систем линейных уравнений.	143
23.3. Экстраполяция функций.	144
24. Математические основы измерения и анализа случайных динамических процессов мехатронных систем	148
25. Информационные контрольно-диагностические мехатронные системы	155
25.1. Состояние и тенденции развития систем	155
25.2. Автомобильные дисплеи	161
26. Мехатронное управление амортизатором автомобиля.	168
27. Экономические и социальные аспекты мехатроники	171
ЛИТЕРАТУРА	175
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ВИБРОДИАГНОСТИКА АГРЕГАТОВ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ МАШИН	176
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОКНА ВЗВЕШИВАНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ.	178
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ АНАЛИЗЕ, РАСЧЕТЕ И ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ МАШИН	181
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. АББРЕВИАТУРЫ, УПОТРЕБЛЯЕМЫЕ В МЕХАТРОНИКЕ	214
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ МАШИН»	217

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель авторов настоящего издания обратить внимание инженеров и магистрантов, занимающихся мехатроникой, на эту перспективную область науки, стимулировать их активную самостоятельную работу на изучении и освоении мехатронных модулей и систем, применяемых в автомобилестроении. Эти обстоятельства определили как название и построение материалов, так и характер их изложения. Мехатроника своеобразна синтезом многих фундаментальных и технических дисциплин и требует от инженера более широкой осведомленности, чем знание узконаправленных дисциплин, например, таких как теория механизмов и машин, САПР, основы электроники, которые имеют единую терминологию, понятийный аппарат и общую теоретическую базу. Изобретенный в 1948 году транзистор нашел широкое распространение сначала в транзисторных ключах (регуляторах напряжения, коммутаторах систем зажигания), а затем и в других электронных устройствах. Интегральные микросхемы на полупроводниковых элементах совершили революцию в автомобилестроении, особенно в управлении автомобильными агрегатами и автомобилем в целом. В 1980 году появились мехатронные системы управления подвеской, трансмиссией, тормозной системой, рулевым управлением, автоматические кондиционеры воздуха, многофункциональные информационные системы с дисплеями и т.п.

Основной акцент в книге делается на системных проблемах мехатроники, рассматриваются подходы и методы интеграции механических, электронных и компьютерных элементов в единые модули и системы, а также приводится конкретная методика расчетов. Объединение узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями позволяет при изучении настоящего издания воспринять современное синергетическое понимание мехатроники. Сегодня необходимо, чтобы наряду со специалистами в отдельных областях, готовились и специалисты интегрального восприятия науки и техники. Существующее разделение технических устройств на привод, исполнительные механизмы и системы управления не обеспечивает решение задачи проектирования машины или устройства как некоего целого и согласование характеристик его частей. Поэтому в книге изложены подходы, позволяющие проектировать объект и устройство в целом, используя мехатронные модули. Книга построена таким образом, чтобы можно было двигаться последовательно от основ теории к расчету мехатронных систем.

Приведены и оценены структура и принципы построения мехатронных модулей с пьезоэлектрическими приводами, имеющих несколько степеней свободы. Отражено, что в современном машиностроении достигнута высокая точность и производительность, благодаря применению электронных процессоров и компьютеров в производстве. Эти системы дали возможность резко сократить число бракованных деталей и узлов. Поэтому поставлена задача повышения эффективности мехатронных узлов и модулей в системах управления автомобиля, обеспечения активной и пассивной безопасности, зажигания, питания и т.д. Эффективность электронных систем управления во многом определяется их алгоритмическим и программным обеспечением, которые на своем уровне реализуют способы управления соответствующими агрегатами и узлами колесных машин, положенными в основу стратегии управления конкретной мехатронной системой.

Нам представляется, что наша работа является началом пути, который необходимо пройти современным инженерам для достойного поддержания высокого имиджа отечественного специалиста в области автомобилестроения и технологии машиностроения. Приведенный список литературы не претендует на полноту. В нем обращается внимание на наиболее простые и доступные источники. При изложении

разделов книги использовались мехатронные технологии, приведенные в Российских научно-технических журналах: «Мехатроника. Автоматизация. Управление» за 2000 – 2008 годы. В приложении приведен словарь терминов по мехатронике. Эти термины часто употребляются в научной литературе и периодических научно-технических изданиях.

Книга написана так, что она соответствует действующему образовательному стандарту Республики Узбекистан и учебному плану магистратуры по специальности «Автомобили». Она может быть полезна аспирантам и специалистам, занимающимся разработкой и исследованием современных машин.

## 1. Введение, целевые задачи мехатроники.

Мехатроника – это область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей, систем и машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.[11]

Цель мехатроники состоит в создании интеллектуальных машин и движущихся систем, которые обладают качественно новыми функциями и свойствами. Именно принципиальная новизна мехатронных систем вызывает быстрорастущий интерес к мехатронике во всем мире и стимулирует высокую активность специалистов в научно-исследовательской, образовательной и производственной сферах.

**Предметом мехатроники** являются процессы проектирования и производства модулей, машин и систем для реализации заданных функциональных движений. Функциональное движение мехатронной системы предусматривает ее целенаправленное механическое перемещение, которое координируется с параллельно управляемыми технологическими и информационными процессами. Таким образом, понятие «движение» трактуется в данном определении мехатроники расширительно. Древнегреческие философы понимали под движением тела всякое его изменение вообще: от изменения размеров, цвета и температуры, вплоть до возникновения и уничтожения. Но все-таки основой функциональных движений в мехатронике служит механическое перемещение функциональных движений (по точности, скорости и т.д.) определяются служебным назначением машины.

**Метод мехатроники** основан на системном сочетании таких ранее обособленных естественно – научных и инженерных направлений как точная механика, микроэлектроника, электроника, компьютерное управление и информатика. Основой метода мехатроники является синергетическая интеграция структурных элементов, технологий, энергетических и информационных процессов на всех этапах жизненного цикла изделия, начиная со стадии его концептуального проектирования и заканчивая производством и эксплуатацией.

**Мехатронные технологии** включают маркетинговые, проектно-конструкторские, производственные, технологические и информационные процессы, которые обеспечивают полный жизненный цикл мехатронных изделий. Раскрытие связей и закономерностей, характерных для этих процессов, позволяет создавать мехатронные модули, машины и системы, которые способны наиболее эффективно выполнять заданные требования. Мехатронику можно поставить в один ряд с такими фундаментальными подходами к разработке сложных технических систем, как САПР в машиностроении, кибернетический и бионический подходы к проектированию, модульный принцип построения машин и CALS – технологии. В автомобилестроении мехатронные модули и системы машин нашли широкое применение в приводных модулях «мотор-колесо», антиблокировочных устройствах тормозов, автоматических коробках передач, системах автоматической парковки, навигационных системах, электромобилях и т.д.

Мехатроника представляет собой область науки, посвященной анализу исполнительных состояний мехатронных объектов и функционального взаимодействия механических, энергетических и информационных процессов между ними и с внешней средой, а также синтезу мехатронных объектов. С другой стороны, мехатроника – область техники, обеспечивающая полный жизненный цикл мехатронного объекта.

Мехатронный объект синтезируется на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин с интеллектуальным управлением их функциональными состояниями (в том числе движениями), рис. 1.1.

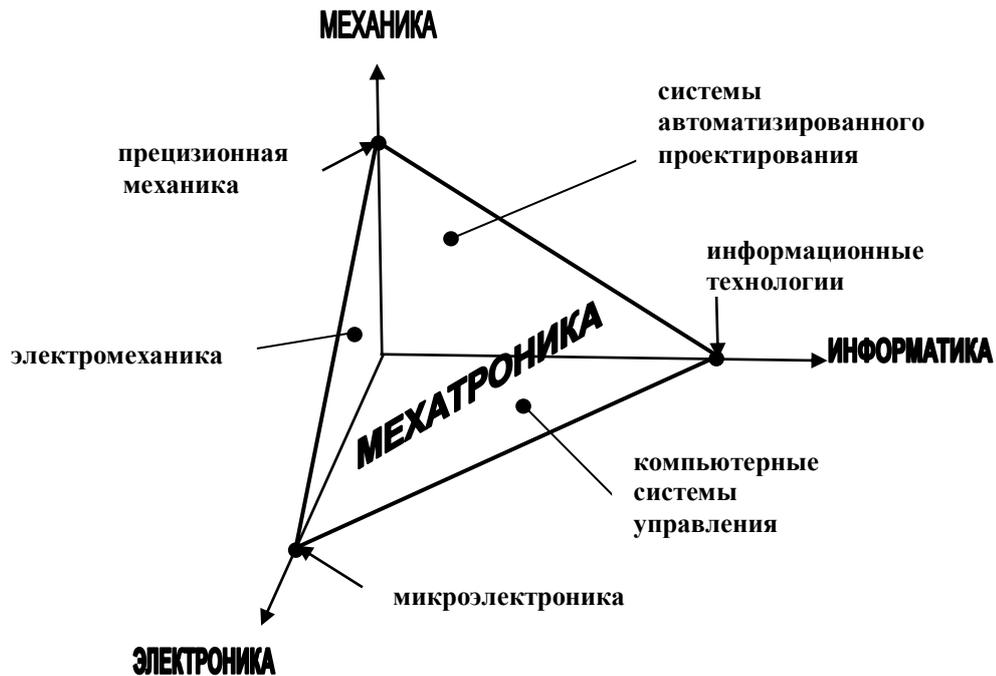


Рис. 1.1. Научно-технический синтез мехатроники.

Мехатроника решает задачи передачи и преобразования движения, манипулирования и давления (без относительного перемещения или при малых перемещениях).

Большую роль в механических компонентах играет трение в кинематических парах, из-за которого происходит износ контактирующих поверхностей. С этим процессом напрямую связан термин «самоорганизация» (например, геометрических форм).

Мехатронные объекты могут быть детерминированными, т.е. с постоянной структурой и недетерминированными, адаптирующимися к внешним условиям. При этом изменяться могут не только параметры, но и структура объекта.

Недетерминированные объекты - это интеллектуально управляемые объекты, т.к. выработка решения на изменение структуры производится лишь после анализа ситуации.

В машиностроении мехатроника должна сыграть большую роль в повышении точности обработки деталей и сборки узлов, в реализации разнообразнейших сочетаний механических движений, в создании принципиально новых технологических процессов производства и обработки композиционных материалов.

Современный этап развития мехатроники можно охарактеризовать как переход от мехатронизированных объектов к мехатронным.

Факторы, сдерживающие процесс расширения области применения мехатронных объектов можно разделить на субъективные и объективные.

Первые обусловлены ограниченным распределением идей мехатроники. Сегодня мехатроника представляет собой пока ещё недостаточно доступную для большинства общества отрасль техники.

Вторые являются следствием естественного процесса дифференциации мехатронного знания.[8]

Мехатронные идеи и образ мышления, связанные с применением микроэлектроники и средств вычислительной техники для управления движением наземных машин и систем, начали проникать в самые различные области техники ещё задолго до появления самого термина мехатроника.

Как писал «отец кибернетики» Н. Винер «важные исследования» задерживаются из-за того, что в одной области неизвестны результаты, уже давно ставшие классическими в смежной области.

Все мехатронные системы автомобилей по функциональному назначению делят на три основные группы:

- системы управления двигателем;
- системы управления трансмиссией и ходовой частью;
- системы управления оборудованием салона.

Система управления двигателем подразделяется на системы управления бензиновым и дизельным двигателем. По назначению они бывают монофункциональные и комплексные. В монофункциональных системах ЭБУ подает сигналы только системе впрыска. Впрыск может осуществляться постоянно и импульсами. При постоянной подаче топлива его количество меняется за счет изменения давления в топливопроводе, а при импульсной - за счет продолжительности импульса и его частоты.

В комплексных системах один электронный блок управляет несколькими подсистемами: впрыска топлива, зажигания, фазами газораспределения, самодиагностики и др.

Система электронного управления дизельным двигателем контролирует количество впрыскиваемого топлива, момент начала впрыска, ток факельной свечи и т.п.

В электронной системе управления трансмиссией объектом регулирования является главным образом автоматическая трансмиссия. На основании сигналов датчиков угла открытия дроссельной заслонки и скорости автомобиля ЭБУ выбирает оптимальное передаточное число трансмиссии, что повышает топливную экономичность и управляемость.

Управление ходовой частью включает в себя управление процессами движения, изменения траектории и торможения автомобиля. Они воздействуют на подвеску, рулевое управление и тормозную систему, обеспечивают поддержание заданной скорости движения.

Управление оборудованием салона призвано повысить комфортабельность и потребительскую ценность автомобиля. С этой целью используются кондиционер воздуха, электронная панель приборов, multifunctionальная информационная система, компас, фары, стеклоочиститель с прерывистым режимом работы, индикатор перегоревших ламп, устройство обнаружения препятствий при движении задним ходом, противоугонные устройства, аппаратура связи, центральная блокировка замков дверей, стеклоподъемники, сиденья с изменяемым положением, режим безопасности и т. д.

Мехатронные технологии оказывают и будут ещё больше оказывать влияние на социальные условия жизни населения, что связано как интеллектуализацией условий труда и быта, повышением качества и комфортности наземных машин, так и с сокращением рабочих мест. Отсюда последуют и научные основы структурных изменений в экономике.

### *1.1 Тенденции развития автомобильных мехатронных систем*

Помимо специфики выполняемых функций новейшие системы автомобильной бортовой автоматики кардинально отличаются от классических, чисто электронных систем широким разнообразием принципов действия входящих в них составных подсистем. В зависимости от решаемой задачи в новую систему в качестве основных компонентов могут входить не только электрические и электронные узлы и блоки, но и механические, гидравлические, светооптические, ультразвуковые и любые прочие устройства, имеющие не электрическую природу функционирования. Их роль в реализации заданной функции управления главная, хотя все информационные процессы в системе реализуются на уровне электронных блоков управления (ЭБУ), а в новейших системах — в бортовых микропроцессорах. Такие крупные составные комплексы управления не могут относиться ни к механическим, ни к электронным, ни к любым другим «чистым» по принципу действия системам.

Например, система автоматического управления амортизатором использует в качестве основной входной информации дорожные условия: тип дорожного покрытия (графий, бетон, асфальт) и его качество; асфальт (сухой, мокрый, обледенелый); освещение дороги; плотность транспортного потока.

Тип и качество дорожного покрытия с помощью датчиков (радарных или ультразвуковых) связаны с цифроаналоговыми преобразованиями.

Большое значение в системах автоматического управления уделяется бортовому компьютеру автомобиля.

Для расчета компьютером некоторых параметров водитель должен перед выездом ввести в него исходные данные, после чего компьютер сможет давать указанную выше информацию при нажатии соответствующей кнопки на пульте управления.

Для расчетов, требующих знания текущего времени, компьютер имеет встроенные кварцевые часы высокой точности.

Центральный бортовой компьютер (микропроцессор МП), в который интегрированы все логические и вычислительные функции автоматических систем управления (подвеской, курсовой устойчивостью, антиблокировочной системой тормозов, положением кузова относительно дороги и т.д.). Он содержит оперативную (ОЗУ) и постоянную (ПЗУ) память, а также входные аналогово-цифровые (АЦП) и выходные цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи.

Микропроцессор — это центральный орган управления системы. Его главная функция заключается в преобразовании электрических информационных сигналов об условиях движения автомобиля, полученных от входной периферии, в электрические сигналы управления, несущие информацию об интенсивности и последовательности неэлектрических воздействий на неэлектрические органы управления. Такая информация формируется в микропроцессоре в виде кодовых последовательностей электрических импульсов, которые для непосредственного управления неэлектрическими органами непригодны. Для согласования энергетических уровней без нарушения информационного содержания на выходе микропроцессора реализуется обратное преобразование информационных сигналов из цифровой формы в аналоговую. Эту функцию предполагается выполнять цифроаналоговыми преобразователями (ЦАПЫ), которые одновременно являются усилителями мощности аналоговых электрических сигналов.

Чтобы выполнить управляемое неэлектрическое воздействие на неэлектрические органы управления вслед за ЦАПами устанавливаются конечные преобразователи электрических сигналов в механические или любые другие неэлектрические воздействия. Конечные преобразователи являются выходными исполнительными устройствами системы, но не являются её информационным окончанием. В отличие от электронной системы мехатронная система включает в свой состав и неэлектрические объекты управления, которые и являются конечными потребителями информации.

В дальнейшем мехатронные машины и системы будут объединяться в мехатронные комплексы на базе единых платформ. Цель создания таких комплексов – добиться сочетания высокой производительности транспортных машин и одновременно гибкости техники – технологической среды за счёт возможности её реконфигурации, что позволит обеспечить конкурентоспособность и высокое качество выпускаемой продукции. [14]

Предмет мехатроника состоит из следующих разделов:

- Общие вопросы мехатроники;
- Кинематика и динамика мехатронных систем;
- Электроника мехатронных систем;
- Сенсорные элементы и устройства мехатронных систем;
- Исполнительные элементы и устройства мехатронных систем;
- Модули и компоненты мехатронных систем и технологий;
- Моделирование мехатронных систем и технологий;
- Управление мехатронными системами и автоматизация мехатронных технологий;

- Информационные технологии в мехатронных системах;
- Интеллектуализация мехатронных систем и технологий;
- Автоматизация проектирования мехатронных систем и технологий;
- Контроль, диагностика и испытание мехатронных систем;
- Робототехнические системы и комплексы;
- Гибкие автоматизированные производства и системы;
- Специальные мехатронные системы и технологии;
- Применение мехатронных систем и технологий (опыт создания, внедрения и эксплуатации отраслевых мехатронных систем и технологий: автомобилестроение, тракторостроение, строительно-дорожные машины, автодорожный комплекс и т.д.);
- Надежность, качество, стандарты и сертификация в мехатронике;
- Экономические и социальные аспекты мехатроники.

## 2. Основные понятия и определения в мехатронике.

Современный термин «Мехатроника» был введен фирмой Yaskawa Electric в 1969 году и зарегистрирован как торговая марка в 1972 году. Уже в 1980 году термин «Мехатроника» утверждается в мировой и технической литературе как название целого класса машин с компьютерным управлением движением. Наличие трёх обязательных частей - механической (точнее электромеханической), электронной и компьютерной, связанных энергетическими и информационными потоками, явилось первичным признаком, отличающим мехатронные системы. Характерно, что электрическая, гидравлическая или пневматическая энергия используется в современных мехатронных системах как промежуточная энергетическая форма с управлением на основе принципа обратной связи.

### 2.1. Основная терминология мехатроники.

В современных мехатронных системах используются следующие ключевые слова и терминология:

Автоматическая линия – совокупность машин-автоматов, соединенных между собой автоматическими транспортными устройствами и предназначенных для выполнения определенного технологического процесса.

Входной сигнал – сигнал, подаваемый на вход системы управления машины.

Выходной сигнал – сигнал, полученный на выходе системы управления машины.

Д'Аламбера принцип – один из принципов динамики, согласно которому приложенные к точкам материальной системы «задаваемые» (активные) силы могут быть разложены на «движущие» силы, сообщающие точкам системы ускорения, и на «потерянные» силы, уравнивающиеся противодействиями (реакциями) связей.

Д'Аламбера – Лагранжа принцип, объединяющий принцип возможных перемещений и принцип Д'Аламбера. Согласно этому, если к действующим на точки механической системы активным силам присоединить силы инерции, то при движении механической системы с идеальными связями сумма элементарных работ активных сил и сил инерции на любом возможном перемещении системы равна нулю. Д.–Л. принцип выражается равенством, которое называется общим уравнением механики:

$$\sum_{i=1}^n (F_i \cos \alpha_i - m_i a_i \cos \beta_i) \delta s_i = 0,$$

где  $F_i$ ,  $m_i$ ,  $a_i$ ,  $\delta s_i$  – соответственно активная сила, масса, ускорение и возможное перемещение  $i$ -й материальной точки системы;

$\alpha_i$  и  $\beta_i$  – углы между направлениями соответствующих сил и возможных перемещений;

$n$  – число материальных точек.

Этот принцип, позволяет изучать движение системы с идеальными связями, не вводя в уравнение неизвестные реакции связи.

Информационное устройство предназначено для сбора и передачи в устройство управления информации о фактическом состоянии внешней среды и движущейся мехатронной машины.

Манипулятор – это управляемое устройство или машина для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объектов в пространстве, оснащенное рабочим органом (обычно захватным устройством). Система управления манипулятора может быть выполнена в виде незамкнутой кинематической цепи и может содержать мехатронные средства управления и автоматики. Оптимизация движений манипуляторов предполагает количественное определение предельно достижимых показателей (например, максимальной силы или скорости рабочего органа, которые могут быть реализованы роботом в заданном направлении) при известных технических и технологических ограничениях. С точки зрения подхода к решению задач этого класса можно выделить две основные группы методов анализа кинематических и динамических свойств манипуляторов.

1. Группа методов, в которых манипулятор рассматривается как сложный механизм без учета приводных ограничений на скорости или моменты. Основным инструментом исследования является тензорно-геометрический метод. Фактически главным для всех методов исследования данной группы является то, что манипулятор рассматривается как передаточный механизм (трансмиссия), передающий скорости (ускорения, моменты) из сочленений на рабочий орган робота, воздействующий на окружающую среду.

2. Группа методов, в которых законы управления движением робота определяются с учетом ограничений (скоростных, моментных, энергетических) в исполнительных приводах. Основным инструментом анализа являются так называемые политопы - многогранники, ограничивающие области допустимых скоростей или сил в выбранной системе координат

Модуль: 1) название какого-либо важного коэффициента или величины;

2) унифицированный узел массового производства, выполняющий самостоятельную функцию в различных устройствах.

Звено механизма – одно или несколько неподвижно соединенных твердых тел, входящих в состав механизма.

Число степеней свободы – число независимых между собой возможных перемещений механической системы. Для механизма, все связи которого голономные, – это будет число обобщенных координат. Для твердого тела, свободно движущегося в пространстве, число степеней свободы равно шести: три поступательных вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и три вращательных вокруг этих осей.

Мехатронный модуль движения (ММД) – это конструктивно и функционально самостоятельное изделие, включающее в себя управляемый двигатель, механическое и информационное устройство.

Мехатронные машины – это интеллектуальные многомерные системы, построенные на мехатронных принципах и технологиях, которые способны эффективно выполнять программы функциональных движений в измеряющихся условиях внешней среды.

Внешней средой является технологическая среда (детерминированная или недетерминированная), которая содержит различное основное и вспомогательное оборудование, технологическую оснастку и объекты работ.

Обратная связь в мехатронной системе – устройство установленное между выходным звеном механизма и управляющим звеном привода и ограничивающее инерционное воздействие привода на выходное звено привода.

Параметрический ряд – ряд параметров механизма, построенный на основе ряда предпочтительных чисел.

Он содержит такие параметры, как: межосевое расстояние, модуль зубьев, передаточное число, момент на ведомом звене, консольную нагрузку на ведомом валу и др.

Рабочий орган мехатронной машины – это составная часть механического устройства для непосредственного выполнения технологических операций и/или вспомогательных переходов.

Робототехника – это область науки, ориентированная на создание роботов и робототехнических систем, предназначенных для автоматизации сложных технологических процессов и операций, в том числе выполняемых в недетерминированных условиях, для замены человека при выполнении тяжелых, утомительных и опасных работ.

Мехатроника и робототехника различаются по классификационным признакам. Мехатроника изучает новый методологический подход к созданию модулей и машин с качественно новыми характеристиками. Роботы же представляют собой один из современных классов машин с компьютерным управлением движением.

Проектирование и производство роботов базируется не только на мехатронных принципах и технологиях, но требует привлечения и других методологических подходов: методов технической кибернетики, бионики и САПРа.

Проектирование современных мехатронных систем основано на модульных принципах и технологиях.

Робот – это машина с антропоморфным (человекоподобным) поведением, которая частично или полностью выполняет функции человека при взаимодействии с окружающим миром.

Промышленные роботы, применяемые в автомобилестроении, обычно состоят из мехатронных модулей, манипулятора и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций. Используют робот в условиях, недоступных или вредных для человека, а также для выполнения тяжелых технологических операций.

Силовой анализ механизма – представляет определение действующих в механизме сил при заданном движении. Обычно следует определять реакции в кинематических парах и уравнивающие силы, приложенные к начальному звену. Для этого предварительно раскладывают механизм на структурные группы, которые должны удовлетворять условию кинестатической определенности: число уравнений кинестатики должно быть равно числу неизвестных величин, характеризующих реакции в кинематических парах. Далее определяют касательные составляющие реакции в кинематических парах со стороны отсоединенных звеньев, используя при этом уравнение  $\sum \bar{M} = 0$ .

Затем строят план сил – замкнутый векторный контур – и определяют оставшиеся неизвестные величины. Силы ведут последовательно, переходя от структурных групп с заданными внешними силами к структурным группам или звеньям, для которых следует определять внешние силы.

## *2.2 Гомеостаз, самоорганизация и антропоморфность мехатронных объектов (МО).*

В последнее время термин «гомеостаз» стали толковать расширительно, трактуя его как способность живых организмов и кибернетических систем сохранять свое состояние в условиях меняющейся среды за счет действия обратных связей. При этом механизмы восстановления и поддержания гомеостаза способны обеспечить не только выживаемость организма, но и его активную жизнедеятельность в условиях изменчивой среды обитания. В связи с этим весьма актуальным является распространение принципов организации, функционирования и форм проявления гомеостатических механизмов живого организма на теорию и практику построения высокоэффективных автоматических систем, к которым с полным правом можно отнести и мехатронные объекты.

Понятие гомеостаза, методологически тесно связанное с общесистемными понятиями самосохранения, устойчивости и целостности систем, заняло прочное место среди фундаментальных понятий современной науки и породило новое направление в развитии кибернетики - гомеостатику, которая изучает глубинные механизмы поддержания гомеостаза в сложных системах различной природы (биологических, технических, социальных и экономических). Для МТ использования идей гомеостаза при проектировании объектов СДМ весьма актуально, тем более что это прямой путь к бионике и к созданию биотехнических систем. В определении МТ есть термин «синергетика» - понятие, связанное с самоорганизацией объекта, которое опирается на гомеостаз и развивает его. Самоприспосабливаемая (адаптивная) система - система автоматического управления, способная обеспечить функционирование, самостоятельно изменяя свое поведение и/или состояние в соответствии с внешними факторами, например, с характеристикой среды, с которой она соприкасается.

Различают следующие виды самоприспосабливаемых систем:

- самонастраиваемые - изменяют собственные характеристики для компенсации изменяемых условий функционирования;
- самообучаемые - совершенствуют характер функционирования по мере накопления опыта;
- самоорганизуемые - изменяют свою структурную схему в зависимости от условий функционирования и/или от накопленного опыта.

В настоящее время много говорят о стремлении МО к антропоморфности, широко и длительно дискутируемой в применении к «интеллектуальным» работам.

Антропоморфизм - уподобление человеку, наделение человеческими свойствами предметов и явлений неживой природы. Это положение в первую очередь относится к манипуляционным системам (механическим, состоящих из звеньев и кинематических пар, как всякий механизм), и к природе их управления, к гомеостазу технических (в том числе мехатронных) систем. Так, фирма «Хонда» представила робототехническому обществу прототип гуманоида и поставила вопрос об использовании строго антропометрической концепции для создания новых направлений исследований в робототехнике.[14]

Бионика – прерогатива не только робототехники, но и мехатроники, дальнейшее развитие которой пойдет по пути синтеза с бионикой, поскольку любой мехатронный объект представляет собой имитацию живого организма.

### 3. Новые технологии в мехатронике.

Технологический процесс изготовления мехатронной машины может быть представлен в виде следующей схемы (рис.3.1):

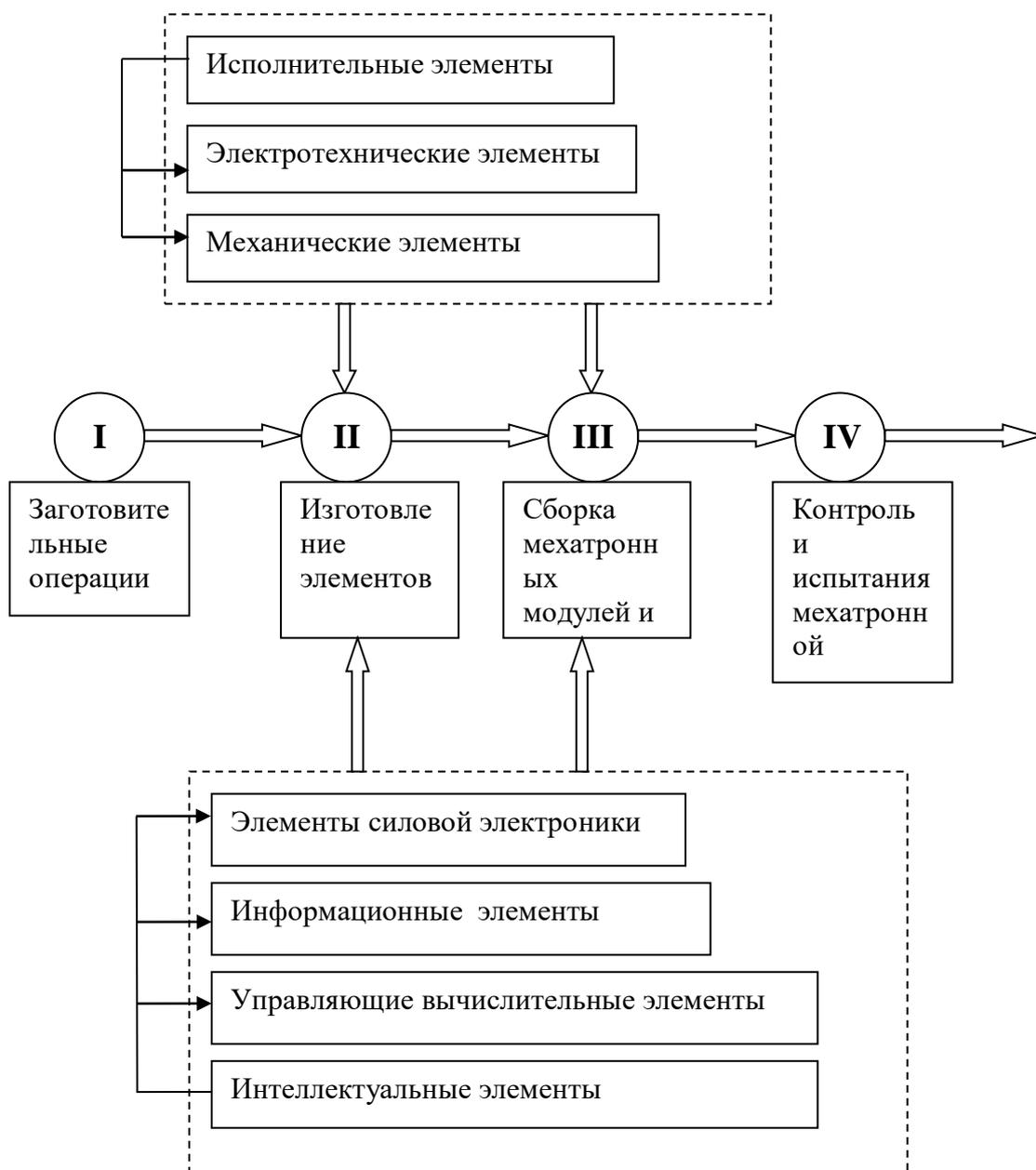


Рис.3.1. Схема технологического процесса изготовления мехатронной машины

Все компоненты мехатронных модулей подразделены на две большие группы:

1. Исполнительные элементы, к которым отнесены механические и электротехнические элементы (двигатели, преобразователи движения, тормоза, тяговые соленоиды и т.д.)
2. Интеллектуальные элементы, куда входят силовые электронные блоки, информационные (сенсорные) и управляющие вычислительные элементы.

Технологическая интеграция элементов первой и второй групп возможна только на этапе изготовления элементов (II) и сборки мехатронных модулей и машин (III). Выбор фазы технологической интеграции определяет глубину объединения компонентов в мехатронном модуле.[7]

Гибридная сборка соответствует конструкторской идее объединения разноприродных элементов в едином корпусе. В этом случае компоненты указанных групп хотя и являются составными частями общего конструкторского замысла, но их изготавливают независимо и параллельно на различных технологических линиях.

Гибридные технологии предусматривают использование общих материалов (например, полупроводников) и общих технологических процессов при производстве как исполнительных, так и интеллектуальных элементов.

Это дает возможность уменьшить размеры мехатронного модуля и его стоимость.

Если разработка идет в большую серию, то эффективным является использование технологии ASIC – микросхем, выпускаемых под конкретную задачу пользователя. Микросхемы ASIC представляют собой «одночиповое» решение, имеющее ряд преимуществ по сравнению с перепрограммируемыми схемами FPGA (Field Programmable Gate Arrays).

Современные технологии управления движением позволили перейти в системах управления от внешних управляющих устройств к контроллерам движения. (motion controllers). При этом обычно эту задачу делят на две части: планирование движения и его исполнение во времени. Планирование функциональных движений осуществляется оператором на компьютере верхнего уровня с использованием пакетов прикладных программ. Функцию программного расчета и выдачи управляющих сигналов непосредственно на исполнительные приводы выполняет контроллер движения. Типичным является трапецеидальный закон изменения скорости движения, включающий участки разгона, перемещения с постоянной скоростью и торможения с заданным ускорением (рис.3.2)



Рис.3.2. Система управления мехатронными модулями на базе контроллера движения



Рис. 3.3. Классификация мехатронных модулей

Модуль – это унифицированная функциональная часть машины, конструктивно оформленная как самостоятельное изделие.

Мехатронный модуль – это функционально и конструктивно самостоятельное изделие для реализации движений с взаимопроникновением и синергетической аппаратно-программной интеграцией составляющих его устройств, имеющих различную физическую природу (рис 3.3).

Модуль движения – конструктивно и функционально самостоятельное изделие, в котором конструктивно объединены управляемый двигатель и механическое устройство.

Мехатронные машины являются многомерными системами, которые komponуются на базе двух или более мехатронных модулей

В состав мехатронной машины входят четыре основных части:

1. механическое устройство, конечным звеном которого является рабочий орган;
2. блок приводов, включающий в себя силовые преобразователи и исполнительные двигатели;
3. устройство компьютерного управления (комплекс аппаратных и программных средств, вырабатывающий сигналы управления);
4. информационное устройство, предназначенное для получения и передачи в устройство компьютерного управления данных о реальном движении машины и о фактическом состоянии её подсистем.

В информационном устройстве можно выделить три группы сенсоров:

- датчики информации о состоянии внешней среды и объектов работ (системы технического зрения, локационные датчики, дальномеры и т.д.);
- датчики информации о движении механической части (датчики перемещений, скоростей, ускорений, сил и моментов);

- датчики обратной связи блока приводов (дают информацию о текущих значениях электрических токов и напряжений в силовых преобразователях).

Рабочая зона мехатронной машины представляет собой совокупность всех точек декартового пространства, которые могут быть достигнуты рабочим органом машины

Погрешность отработки траектории – это отклонение фактической траектории рабочего органа от траектории заданной программой движения.

Общий алгоритм проектирования мехатронного модуля можно представить в виде (Рис.3.4.)

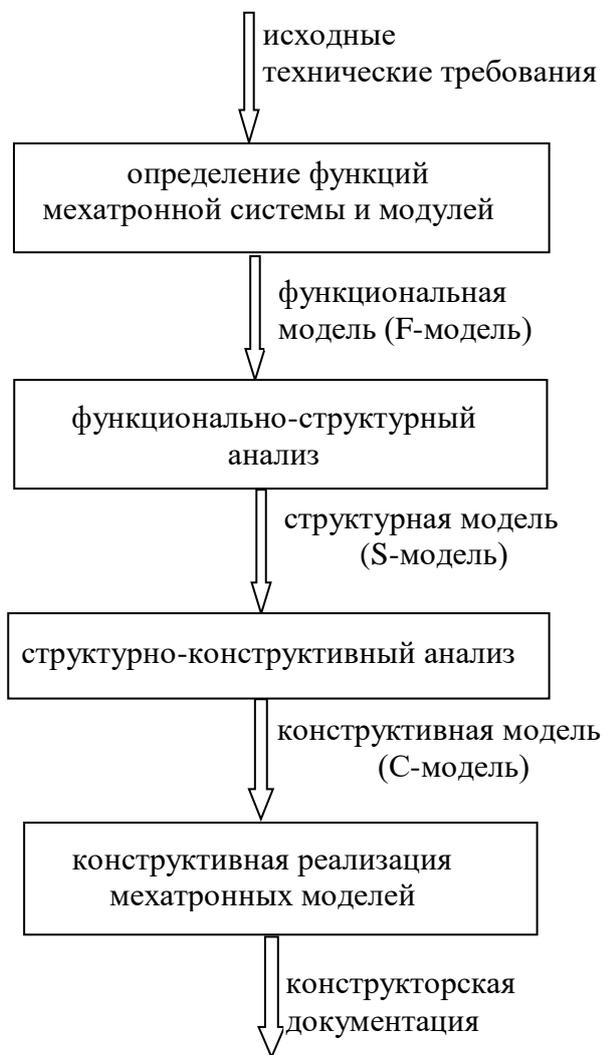


Рис. 3.4. Алгоритм проектирования мехатронного модуля

#### 4. Подход к проектированию интегрированных мехатронных модулей и систем.

Основой метода мехатроники является интеграция составляющих частей, которая закладывается на этапе проектирования и затем реализуется в технологических процессах производства и эксплуатации мехатронных модулей и систем. [16]

Первый уровень интеграции образуют мехатронные устройства и составляющие их элементы.

Второй уровень включает интегрированные мехатронные модули.

На третьем уровне интеграции из мехатронных модулей komponуются многокоординатные мехатронные машины.

Высший (четвертый) уровень предполагает построение на единой интеграционной платформе комплексов мехатронных машин для реконфигурированного производства.

Узким местом (bottleneck – бутылочное горлышко, англ.) мехатронных модулей и машин являются интерфейсы между составляющими устройствами и элементами.

Место интерфейса в структуре мехатронной системы задается связями с входными и выходными устройствами (табл. 4.1.). Технические характеристики интерфейса определяются способом и процедурой передачи воздействий, сигналов и информации, а также аппаратно-программной реализацией используемых каналов связи.

Таблица 4.1

Основные интерфейсы мехатронной системы

Характеристики интерфейса		
Устройство на входе	Устройство на выходе	Передаваемые воздействия /сигналы/ информация
Человек-оператор или компьютер верхнего уровня	Устройство компьютерного управления (УКУ)	Цель движения
УКУ	Силовые электронные преобразователи	Сигналы управления приводами
Силовые электронные преобразователи	Исполнительные двигатели	Управляющие напряжения
Исполнительные двигатели	Механическое устройство	Движущиеся силы и моменты
Механическое устройство	Информационное устройство	Информация о состоянии механического устройства
Исполнительные двигатели	Информационное устройство	Информация о состоянии двигателей
Информационное устройство	Устройство компьютерного управления (УКУ)	Сигналы обратной связи

Из таблицы видно, что многочисленные интерфейсы к мехатронной машине связывают устройства различной физической природы (механические, электронные и информационные), что предопределяет их конструктивную и аппаратно-программную сложность. При традиционном проектировании интерфейсы представляют собой самостоятельные устройства и узлы. Обычно это блоки, которые выпускаются специализированными фирмами, но многие интерфейсы приходится разрабатывать и изготавливать самим пользователем.

Суть мехатронного подхода состоит в объединении элементов в интегрированные модули уже на этапах проектирования и изготовления, освобождая, таким образом, конечного потребителя от решения «проблемы интерфейсов» при эксплуатации мехатронной машины

При традиционном проектировании управляемых машин разработка механической, электронной, информационной и компьютерной частей ведется последовательно и независимо друг от друга (рис.4.1.)

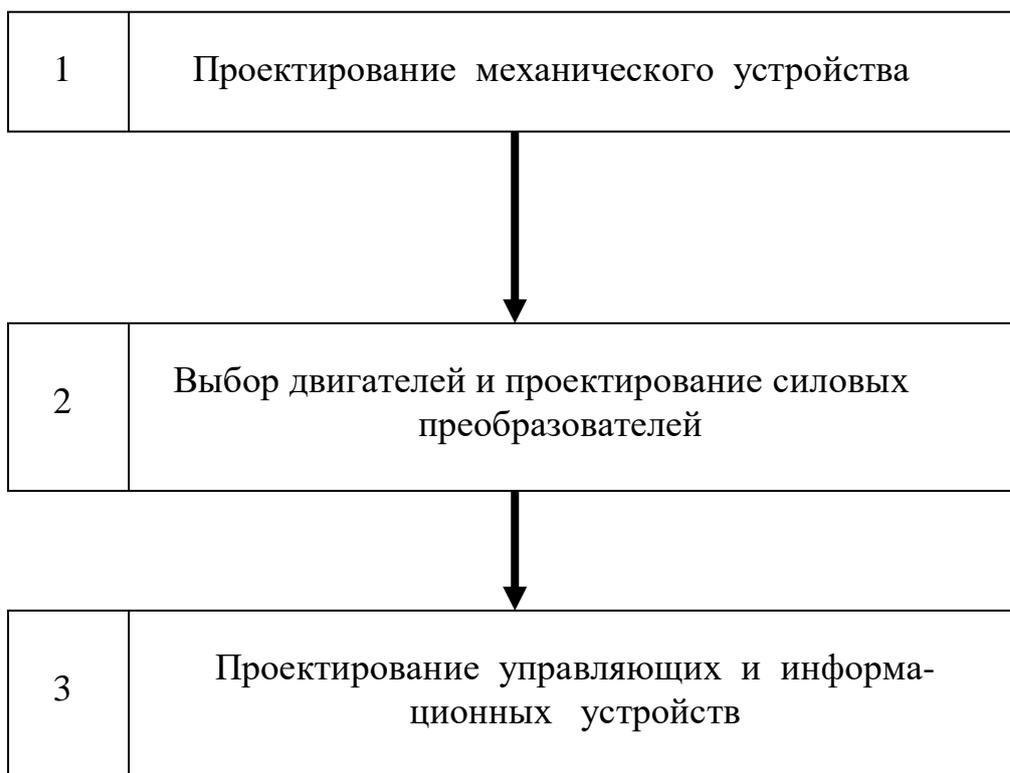


Рис. 4.1 Традиционный алгоритм проектирования

Выбранные двигатели и механические устройства образуют так называемую «неизменяемую часть», состав и характеристики, которой нельзя корректировать при разработке электронной и управляющей частей системы.

Исходные требования к мехатронным машинам, которые определяют основные проектные решения, формируются путем анализа выполняемых технологических операций. В качестве примера в табл.4.2 приведены предпочтительные значения параметров контурного движения рабочего органа для ряда роботизированных операций

Таблица 4.2.

Предпочтительные значения параметров движения рабочего органа.

Технологическая операция	Максимальная скорость РО, мм/с	Отношение рабочих скоростей РО $V_{\max} / V_{\min}$	Допустимая погрешность обработки траекторий, мм
Лазерная резка	66.7	66.7	0.05
Воздушно-плазменная резка	83.3	5.0	0.1
Окраска распылением	500	10.0	5.0
Дуговая сварка	11	2.2	0.5

Рекомендации технологов, как правило, ограничиваются выбором номинальных режимов движения машины.

Требования к траекториям движения содержат описание программных траекторий рабочего органа в пространстве и допустимую погрешность их отработки

Криволинейные пространственные траектории удобно задавать в параметрической форме:

$$\bar{X} = \bar{X}(\lambda) \quad (0 \leq \lambda \leq \lambda_{\max})$$

где  $\bar{X}$  – вектор, описывающий положение рабочего органа в выбранном декартовом базисе программирования;

$\lambda$  – путь, пройденный рабочим органом (скаляр, называемый лонгальным параметром)

Рабочие процессы автомобилестроения представляют собой совокупность многих операций, каждая из которых выполняется соответствующими механизмами технологического оборудования. На выходных звеньях этих механизмов устанавливаются захваты, обрабатываемые (собираемые) детали, инструменты, упоры и т.п.

Все рабочие органы должны иметь определенные законы движения, а последовательность их включения (выключения) должна быть увязана между собой, т.е. синхронизирована во времени и по положению в пространстве.

Кинематический цикл в технологическом оборудовании обычно формируется одним или несколькими оборотами приводного вала основного исполнительного механизма.

## 5. Метод объединения элементов мехатронного модуля в едином корпусе.

Одним из методов интеграции мехатронных модулей является минимизация конструктивной сложности модулей путем создания интегрированных мехатронных модулей, реализующих несколько функциональных и структурных преобразований. Эта цель может быть достигнута на этапе структурно-конструктивного анализа (рис. 5.1)

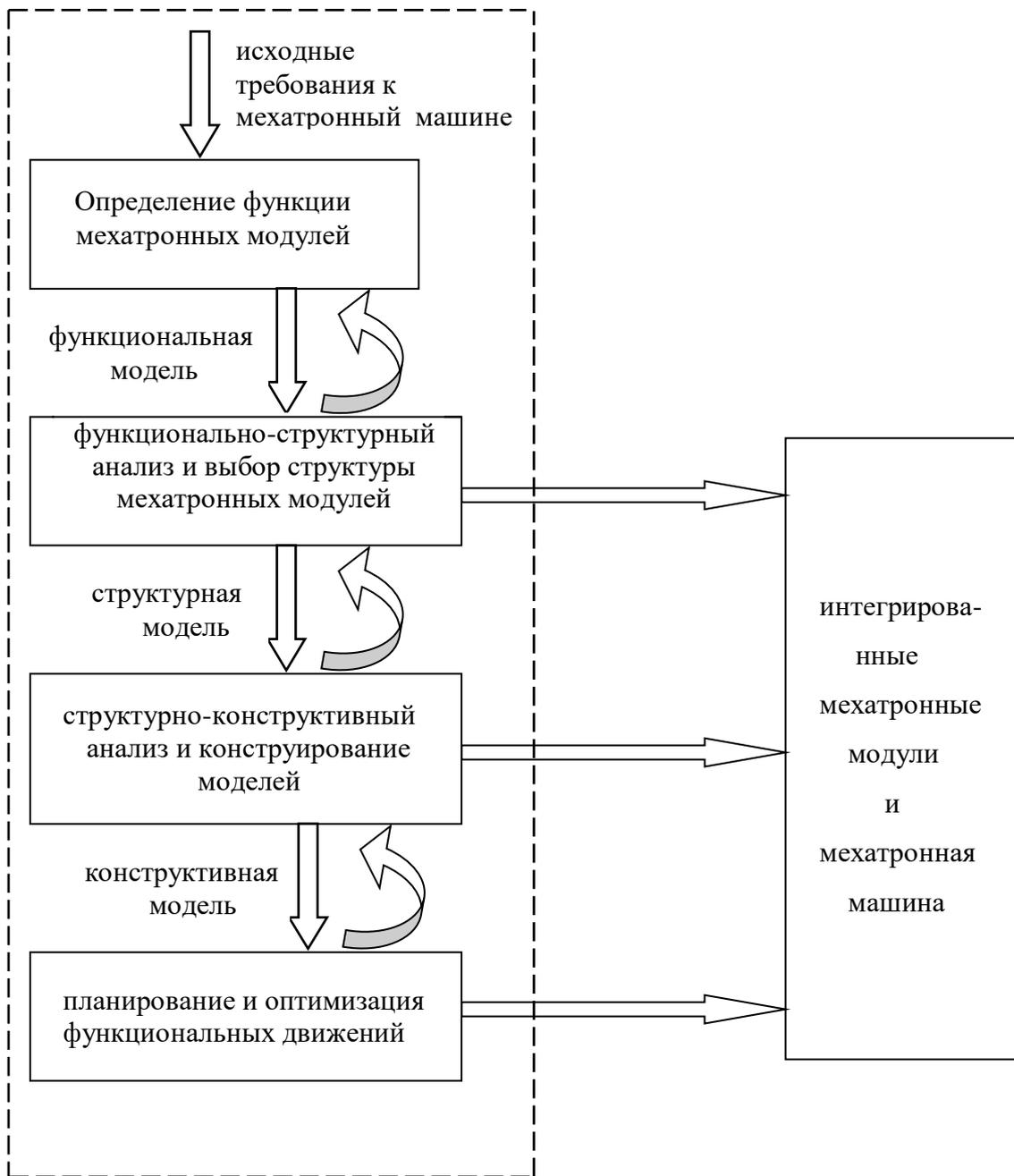


Рис. 5.1 Процедура проектирования интегрированных мехатронных модулей и машин

Структуру модуля, которая сформирована на предыдущем этапе, теперь считаем известной. Задача разработчика состоит в выборе конструктивных решений, реализующих заданный набор элементов и связи между ними.

Рассмотренный метод интеграции заключается в аппаратно-конструктивном объединении выбранных элементов и интерфейсов в едином корпусе.

Технологической базой для данного метода интеграции является гибридная сборка узлов и элементов. Аппаратное и конструктивное объединение элементов в единые модули должно обязательно сопровождаться разработкой интегрированного программного обеспечения.

Методическим ключом при поиске вариантов является рассмотрение интерфейсных блоков в качестве локальных точек, где потенциально возможна интеграция элементов. Для получения высокоинтегрированных модулей можно рекомендовать при проектировании опираться сразу на несколько интерфейсных точек.

В корпусе модуля движения объединены исполнительным двигателем и механическим устройством, причём вал двигателя является элементом механического преобразователя движения. Модули движения реализуют электромеханическое и механическое функциональные преобразования. Примерами модулей движения могут служить: мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-шпиндель и мотор барабан.

В состав современных модулей движения помимо двигателей и преобразователей движения входят и другие виды механических устройств – тормозные и люфтовыбирающие механизмы, направляющие и преобразователи движения. К модулям движения можно отнести также высокооборотные мотор-шпиндели, которые получены объединением ротора электродвигателя и вала инструмента.

Выбор окончательного проектного варианта во многом зависит от схемы и конструкции привода, технологии изготовления устройства привода и ряда других критериев, которые могут быть противоречивыми.

На рисунке 5.2 приведены удельные сравнительные характеристики электрических (Э), гидравлических (Г) и пневматических (П) приводов промышленного робота (ПР) в зависимости от преобразуемой мощности.

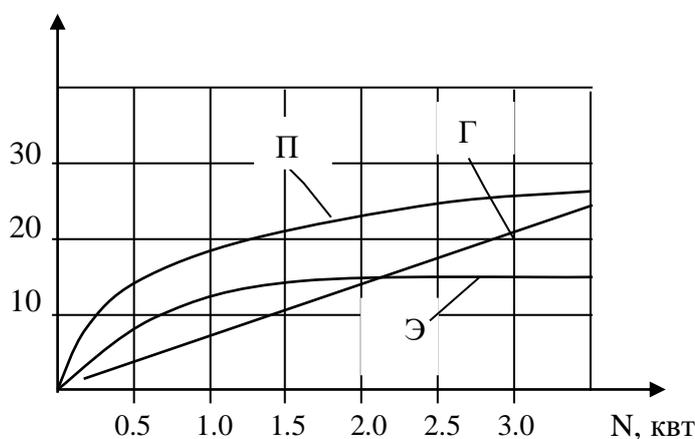


Рис. 5.2 Сравнительные характеристики приводов

Анализ графических зависимостей удельной мощности  $N_u$  показывает, что при значении выходной мощности приводов до 1.5 кВт предпочтение следует отдать электрическому приводу в сравнении с гидравлическим. Электрические приводы более выгодны для промышленных роботов малой и средней грузоподъемности со значениями выходной мощности из ряда  $N = 0.1 \dots 1.5$  кВт.

Но гидравлические приводы имеют лучшие показатели удельной мощности  $N_u$  для тяжелых и сверхтяжелых ПР при значениях  $N = 2 \dots 3$  кВт и более.

Пневматический привод для указанного диапазона изменения выходной мощности и реализации агрегатно-модульного построения может работать при напряжении рабочей среды 0.6 ... 1.0 МПа, обеспечивая наилучшие показатели, в частности, массогабаритная характеристика – удельная мощность  $N_u$  (рис. 5.2).

Окончательный вариант выбранного привода обычно принимается после моделирования процессов передачи и преобразования энергии в машинах, когда уточняются параметры и качественные соотношения механических, энергетических, гидравлических и пневматических явлений, используемых при моделировании заданного движения исполнительного механизма мехатронной системы: машины-автомата, промышленного робота.

В едином корпусе модуля находятся: двигатель, механическое устройство и датчик обратной связи.

В состав ротационного модуля входят: коллекторный электродвигатель, планетарный редуктор и фотоимпульсный датчик обратной связи (инкодер). Главной особенностью современного этапа развития мехатроники является создание принципиально нового поколения модулей – интеллектуальных мехатронных модулей (ИММ).

По сравнению с мехатронными модулями движения в конструкции ИММ дополнительно встраиваются компьютерные устройства и силовые электронные преобразователи. Это придает этим модулям интеллектуальные свойства и является их главным отличительным признаком.

Интеллектуальные мехатронные модули реализуют семь функциональных преобразований: моноэнергетические (информационные, электрические и механические преобразователи) и дуальные, – двойственные (информационно-электрические и электромеханические преобразователи, расположенные в прямой цепи функциональной модели, а также электро-информационные и механико-информационные преобразователи в цепях обратной связи). Структурно-конструктивная интеграция в интеллектуальных мехатронных модулях (ИММ) осуществляется по всем интерфейсным точкам.

В общем случае интеллектуальный мехатронный модуль состоит из следующих основных элементов:

- электродвигатель (гидродвигатель, пневмодвигатель);
- механическое устройство;
- датчики и устройства обратной связи;
- устройство компьютерного управления (УКУ);
- электронный силовой преобразователь;
- интерфейс для связи УКУ с компьютером верхнего уровня управления, а также внутренние интерфейсы.

Встраивание интеллектуальных устройств непосредственно в мехатронный модуль порождает и ряд ограничений. К ним следует отнести сложность модернизации, увеличение массогабаритных показателей модуля движения (по сравнению с приводами, где управляющие и электронные устройства вынесены в отдельные шкафы), а также существенные механические и температурные воздействия исполнительных устройств на встроенные электронные и компьютерные компоненты.

Подключение цифровых входов и диагностических сигналов, а также электрическая связь между двигателем и силовым преобразователем осуществляется с помощью штекерной техники.

Связь с центральным устройством управления и другими модулями обычно организуется через стандартную шину, – соединение производится подготовительным кабелем с присоединенным фланцем.

Подход к проектированию мехатронных модулей и систем заключается в нахождении оптимального соответствия между функциональной и структурной моделями синтезируемой системы.

При проектировании интегрированных мехатронных систем следует стремиться к повышению показателя функционально-структурной интеграции (ФСИ), т.е. реализовывать наибольшее количество функциональных преобразований минимально возможным числом структурных элементов. В этом смысле выгодно исключить

промежуточные структурные преобразователи и самостоятельные интерфейсы, а также создавать многофункциональные мехатронные модули.

Зависимость показателя ФСИ от числа интегрируемых элементов при заданном числе функциональных преобразований имеет гиперболический характер. Особенно высокая степень интеграции достигается при объединении в мехатронном модуле более пяти элементов. Этому условию удовлетворяют интеллектуальные мехатронные модули, в которых максимум функциональных преобразований сосредоточен в едином структурном элементе. С целью повышения показателя ФСИ проектирование системы управления нового уровня представляется целесообразным сосредоточить на двух главных точках интеграции:

- реализация всех функций информационного преобразователя в едином структурном модуле;
- сосредоточение функций информационно - электрического преобразования в одном структурном блоке.

Ядром разрабатываемых систем управления обычно является контроллер движения (КД), который выполняет все заданные информационные преобразования. В состав системы могут также входить усилитель с широтно-импульсным входом и фотоимпульсные датчики обратной связи.

Функцию информационно-электрического преобразования выполняет усилитель с широтно-модулированным (ШИМ) – входом.

ШИМ – сигнал, поступающий от контроллера движения, может иметь только два уровня (высокий и низкий) и при этом является маломощным.

В настоящее время механические устройства всё чаще становятся узким местом в сложных машинах.

Это объясняется их недостаточной функциональной гибкостью, наличием трения, люфтов и, упругостей в передачах, всё возрастающей стоимостью изготовления. Поэтому происходит постепенное вытеснение механических узлов сначала электронными, а затем и компьютерными блоками.

Производители отдают предпочтение упрощенным механическим решениям, но со сложными интеллектуальными системами управления.

Метод анализа значимости структурных элементов основан на теории графов и матриц.

## 6. Мехатронные модули движения.

В модуле движения конструктивно объединены управляемый двигатель и механическое устройство, причем вал двигателя является элементом механического преобразователя движения.

Широкое применение в приводах различных машин нашли мотор-редукторы, представляющее собой компактный конструктивный модуль, объединяющий электродвигатель и редуктор.

Мотор-редукторы обладают целым рядом преимуществ по сравнению с традиционным соединением двигателя и редуктора, таких как уменьшенные габаритные размеры, сниженная стоимость, улучшенные эксплуатационные свойства (пылевлагозащищенность, минимальный уровень вибрации, повышенная надежность и т.д.).

Конструктивное исполнение модуля мотор-редуктора определяется типом редуктора и электродвигателя.

В состав современных модулей движения могут входить и такие механические устройства, как тормозные и люфтовывбирающие механизмы, вариаторы и направляющие.

В связи с развитием новых электронных технологий, которые позволили создать миниатюрные датчики и электронные блоки для обработки их сигналов, в мехатронных модулях движения появились электронные и информационные устройства, что является их главным отличием от типовых модулей движения. Попытка синтеза мехатронного модуля движения из серийно выпускаемых компонентов может привести к технически и экономически неэффективным решениям. Поэтому более рациональным является проектирование специализированного модуля, наиболее полно отвечающего служебному назначению машины.

Часто в специализированных модулях используют бесконтактные (или вентильные) двигатели постоянного тока, в которых функции коллектора и щеток выполняют полупроводниковые управляемые ключи.

Бесконтактные двигатели постоянного тока состоят из трех основных элементов:

- электрической машины синхронного типа с  $m$ -фазной обмоткой на статоре и ротором в виде постоянного магнита;
- датчика положения ротора (ДПР), выполненного в одном корпусе с двигателем и предназначенного для выработки сигналов управления моментами времени и последовательностью коммутации токов в обмотках статора;
- электронного коммутатора, осуществляющего по сигналам ДПР коммутацию токов в обмотках статора.

Датчики положения ротора определяются их чувствительными элементами, которые могут быть построены с использованием ЭДС Холла, фотоэффекта и т.д. В реальных двигателях число обмоток, а соответственно и число чувствительных элементов и транзисторов не превышает 3-4. Частоту вращения бесконтактных двигателей можно регулировать в широких пределах путем изменения амплитуды напряжения питания либо скважности (длительности импульсов) для широтно-импульсного метода управления.

Широкое применение в мехатронных модулях находят преобразователи движения на основе планетарных зубчатых передач. Это объясняется: их компактностью и малой массой, реализацией больших передаточных отношений, малой нагрузкой на опоры, большим коэффициентом полезного действия, высокой кинематической точностью и жесткостью.

Датчики мехатронных модулей должны иметь конструкцию, позволяющую размещать их в местах с ограниченным для установки оборудованием объемом; обладать помехоустойчивостью, возможностью эксплуатации в условиях электромагнитных помех, колебаний напряжения и частоты сети, а также устойчивостью к механическим

воздействиям (ударам, вибрациям) и к изменениям параметров окружающей среды (температуры, влажности и т.п.).

Принцип действия фотоэлектрических датчиков основан на использовании физического эффекта периодического изменения освещенности в зависимости от перемещения (угла поворота). Эти датчики являются бесконтактными и дискретными. В цифровых фотоэлектрических датчиках измеряемое непрерывное значение угла и скорости поворота вала преобразуется в цифровой двоичный (реже десятичный) код, т.е. кодовую комбинацию электрических сигналов. В таком виде они могут непосредственно поступать в ЭВМ без дополнительных преобразований.

При выборе импульсного датчика необходимо учитывать предельную скорость вращения его вала и требуемую точность позиционирования выходного звена мехатронного модуля. Соединение валов импульсного датчика и мехатронного модуля производят с помощью специальных соединительных муфт или безлюфтового кинематического преобразователя движения.

Основным показателем импульсных датчиков является разрешающая способность (табл. 6.1)

Таблица 6.1

Технические характеристики фотоимпульсных датчиков фирмы Махон.

Тип индикатора	225783	228452	225785	228456	225787
Число импульсов на 1 оборот вала	256	500	512	1000	1024
Число каналов	3	3	3	3	3
Максимальная частота следования импульсов, кГц	80	200	160	200	320

В мехатронных модулях движения зачастую используются аналогово-цифровые преобразователи, поэтому ниже рассмотрены их наиболее распространенные архитектуры.

#### 6.1. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)

##### 6.1.1. Принципы построения АЦП

АЦП бывают разных типов: из дискретных компонентов, в виде ИС, высокопроизводительных гибридных схем, модулей и даже блоков. Также АЦП изготавливаются в виде стандартных ячеек для применения в специализированных ИС. АЦП - это преобразователи, конвертирующие аналоговые данные, обычно напряжение в эквивалентный цифровой сигнал, совместимый с цифровыми устройствами обработки данных. Основными характеристиками АЦП являются: абсолютная и относительная погрешность, линейность, разрешающая способность, скорость преобразования, стабильность, способность не пропускать коды и стоимость. Довольно часто, особенно когда цена АЦП имеет решающее значение, применяют преобразователи, реализованные из дискретных компонентов и в виде монолитных ИС. Наиболее популярными являются АЦП, построенные на принципе последовательного приближения, которые дают возможность найти хороший компромисс между быстродействием и точностью. Когда не требуется высокая скорость преобразований, часто применяются интегрирующие АЦП и преобразователи напряжения в частоту. В настоящее время методы проектирования АЦП хорошо отработаны. В этом разделе будут даны краткие описания наиболее распространенных архитектур АЦП.

Самым известным цифровым кодом является двоичный (т.е. код с основанием 2). Наиболее часто двоичный код используется для представления целых чисел.

При этом целое число в простом двоичном коде имеет вид  $n$ -разрядного слова, в котором вес младшего значащего разряда (МЗР) равен  $2^0$  (т.е. единице), вес следующего разряда —  $2^1$  (т.е. 2) и так далее до старшего значащего разряда (СЗР), вес которого определяется

## Простой двоичный и дробный двоичный коды

десятичные дроби	двоичные дроби	СЗР $\times 1/2$	разряд1 $\times 1/4$	разряд2 $\times 1/6$	разряд3 $\times 1/6$	простой двоичный код	десятичное число
0	0 0000	0	0	0	0	0000	0
1/16 (МЗР)	0 0001	0	0	0	1	0001	1
2/16=1/8	00010	0	0	1	0	0010	2
3/16=1/8+1/16	0 0011	0	0	1	1	0010	3
4/16=1/4	00100	0	1	0	0	0100	4
5/16=1/4+1/16	00101	0	1	0	1	0101	5
6/16=1/4+1/8	00110	0	1	1	0	0110	6
7/16=1/4+1/8 + 1/16	00111	0	1	1	1	0111	7
8/16= 1/2 (СЗР)	01000	1	0	0	0	1000	8
9/16=1/2+1/16	0 1001	1	0	0	1	1001	9
10/16=1/2+1/8	0 1010	1	0	1	0	1010	10
11/16=1/2+1/8 + 1/16	01011	1	0	1	1	1011	11
12/16=1/2+1/4	0 1100	1	1	0	0	1100	12
13/16=1/2+1/4+1/16	0 1101	1	1	0	1	1101	13
14/16=1/2+1/4+1/8	01110	1	1	1	0	1110	14
15/16= 1/2+ 1/4+ 1/8+1/16	0 1111	1	1	1	1	1111	15

значением  $2^{n-1}$  (т.е.  $2^n/2$ ). Значение целого числа получается при сложении весов всех ненулевых разрядов. В двоичном виде можно представить любые целые числа в интервале  $0..2^n-1$ . Добавление дополнительных разрядов позволяет значительно увеличивать максимальное значение целого числа, которое можно представить двоичным словом.

При преобразовании сигналов аналоговых датчиков удобнее пользоваться *дробным* двоичным кодом. Для того чтобы простой двоичный код преобразовать в дробный, все целые значения необходимо разделить на  $2^n$ . Тогда вес СЗР должен равняться  $1/2$  (поскольку  $2^n \cdot 1/2^n = 2^1$ ), вес следующего бита —  $1/4$  (т.е.  $2^2$ ) и так далее до МЗР, вес которого будет равен  $1/2^n$  (т.е.  $2^n$ ). Сумма нормализованных разрядов может быть равна любому из  $2^n$  значений в интервале  $0...(1-2^n)$ , что составляет полную шкалу датчика.

Таблица 6.3..

## Весы двоичных разрядов и разрешающая способность

разряд	$2^n$	$1/2^n$ дробный двоичный код	дБ	$1/2^n$ десятичное число	%	одна миллионная часть (ppm)
Максимум	$2^0$	1	0	1 0	100	1,000,000
СЗР	$2^1$	1/2	-6	05	50	500,000
2	$2^2$	1/4	-12	0 25	25	250,000
3	$2^3$	1/8	-18 1	0 125	125	125,000
4	$2^4$	1/16	-24 1	0 0625	62	62,500
5	$2^5$	1/32	-30 1	003125	3 1	31,250
6	$2^6$	1/64	-36 1	0 015625	1 6	15,625
7	$2^7$	1/128	-42 1	0 007812	08	7,812
8	$2^8$	1/256	-48 2	0 003906	04	3,906
9	29	1/512	-54 2	0 001953	02	1,953

10	210	1/1,024	-60 2	0 0009766	0 1	977
11	211	1/2,048	-66 2	0 00048828	0 05	488
12	2 <sup>-12</sup>	1/4,096	-72 2	0 00024414	0 024	244
13	2 <sup>-13</sup>	1/8,192	-78 3	0 00012207	0012	122
14	2 <sup>-14</sup>	1/16,384	-84 3	0 000061035	0 006	61
15	2 <sup>-15</sup>	1/32,768	-90 3	0 0000305176	0 003	31
16	2 <sup>-16</sup>	1/65,536	-96 3	0 0000152588	00015	15
17	2 <sup>-17</sup>	1/131,072	-102 3	0 00000762939	0 0008	76
18	2 <sup>-18</sup>	1/262,144	-108 4	0 000003814697	0 0004	38
19	2 <sup>-19</sup>	1/524,288	-114 4	0 000001907349	0 0002	1 9
20	2 <sup>-20</sup>	1/1,048,576	-120 4	0 0000009536743	0 0001	0 95

Дополнительные разряды повышают разрешение датчика, не оказывая никакого влияния на его диапазон измерений. В таблице 6.2. приведен список 16 значений пятиразрядного слова, лежащих в интервале 0...1, и их двоичные веса. Здесь также показаны эквиваленты чисел, выраженных в десятичном, простом двоичном и дробном десятичном кодах.

Когда все разряды простого двоичного кода равны «1», ему соответствует значение в дробном двоичном коде  $1 - 2^{-n}$ . Строго говоря, это число надо записать как 0.1111 (=1 - 0.0001). Но на практике это число чаще всего обозначается, как 1111 (т.е. 15), но все при этом понимают, что речь идет о числе 15/16 или 1111/(1111+1).

В таблице 6.3. приведен список весов двоичных разрядов в двоичных числах, разрядность которых меняется в диапазоне 1...20 разрядов. Однако на практике разрядность датчиков редко превышает число 16.

Вес, соответствующий МЗР, является разрешающей способностью n-разрядных преобразователей. Числа в колонке, выраженной в дБ, равны десятичным логарифмам отношения МЗР к полной шкале измерения (т.е. 1), умноженным на 20. Каждая последующая степень числа 2 соответствует изменению чисел на 6.02 дБ (или 20lg2), что часто называют изменением 6 дБ на октаву.

#### 6.1.2. Преобразователи напряжения в частоту (ПНЧ)

Достоинством ПНЧ является высокая разрешающая способность преобразований, поэтому они часто используются с датчиками, обладающими большим временем интегрирования (от секунд до нескольких лет), в преобразователях цифрового значения в частоту (в цифроаналоговых преобразователях (ЦАП)), в частотных модуляторах, делителях и умножителях. На входы ПНЧ поступает аналоговый сигнал датчика, который может быть либо напряжением, либо током (в последнем случае это уже будет преобразователь тока в частоту). В некоторых случаях датчик является частью АЦП. В данном разделе будут рассмотрены только ПНЧ, в которых величина напряжения определяется количеством прямоугольных импульсов в единицу времени. Частота может рассматриваться цифровым сигналом, поскольку всегда можно подсчитать импульсы в заданном интервале времени и представить полученное число в двоичном коде. Все ПНЧ являются преобразователями интегрирующего типа, поскольку их выходным сигналом является *частота* (количество импульсов в секунду), пропорциональная *среднему* значению входного напряжения.

На основе ПНЧ реализуются самые простые и экономичные АЦП. Время, требуемое на преобразование напряжения в цифровое значение, определяется максимальной частотой ПНЧ и необходимым уровнем разрешения. Как правило, ПНЧ обладают сравнительно невысоким быстродействием по сравнению с АЦП последовательного приближения, однако они подходят для совместной работы с подавляющим большинством датчиков. Когда ПНЧ используется в качестве АЦП, он подключается к счетчику, тактируемому с заданной частотой отсчетов. Например, если верхний предел частоты преобразователя равен 32 кГц, а счетчик включается 8 раз в секунду, максимальное количество импульсов, посчитанных за один счетный период, составит 4000, что приблизительно соответствует разрешающей способности 12-ти

разрядного АЦП (см. таблицу 6.3.). Используя ту же самую комбинацию компонентов (ПНЧ и счетчик), можно реализовать интегрирующее устройство, применяемое в случаях, когда необходимо проводить измерения внешних сигналов в определенном интервале времени. В этом случае счетчик будет подсчитывать количество импульсов в течение заданного промежутка времени, а не среднее число импульсов за цикл счета.

Другое полезное свойство ПНЧ — простота передачи импульсов по линиям связи. Импульсные сигналы обладают большей помехоустойчивостью по сравнению с аналоговыми сигналами, имеющими высокое разрешение. В идеальном случае выходная частота преобразователя  $f_{out}$  пропорциональна входному напряжению  $V_{in}$ , т.е. выполняется соотношение:

$$\frac{f_{out}}{f_{FS}} = \frac{V_{in}}{V_{FS}}$$

где  $f_{FS}$  и  $V_{FS}$  — максимальная частота и входное напряжение ПНЧ. Для линейного преобразователя отношение  $f_{FS}/V_{FS}=G$ , являющееся постоянной величиной, называется коэффициентом преобразования. Тогда

$$f_{out} = GV_{in}$$

Существует несколько типов ПНЧ. Самые популярные из них построены на основе мультивибратора и схемы с уравниванием заряда.

*ПНЧ мультивибраторного типа*, показанный на рис. 6.1, реализован на основе асинхронного генератора прямоугольных импульсов, в котором ток заряда и разряда времязадающего конденсатора определяется входным сигналом. Входное напряжение  $V_{in}$  усиливается дифференциальным усилителем (например, измерительным усилителем), выходной сигнал которого используется для управления транзисторами  $U_1$  и  $U_2$ , являющимися преобразователями напряжения в ток. Прецизионный мультивибратор поочередно подключает времязадающий конденсатор  $C$  к обоим токовым преобразователям. В результате чего, конденсатор половину периода заряжается током  $i_a$  через транзистор  $U_1$ , а вторую половину периода разряжается через транзистор  $U_2$  током  $i_b$ . Поскольку величина токов  $i_a$  и  $i_b$  определяется входным сигналом, напряжение на конденсаторе во время заряда и разряда будет меняться с одинаковой скоростью, но с противоположным знаком. При этом на выходе мультивибратора формируется сигнал, частота которого пропорциональна

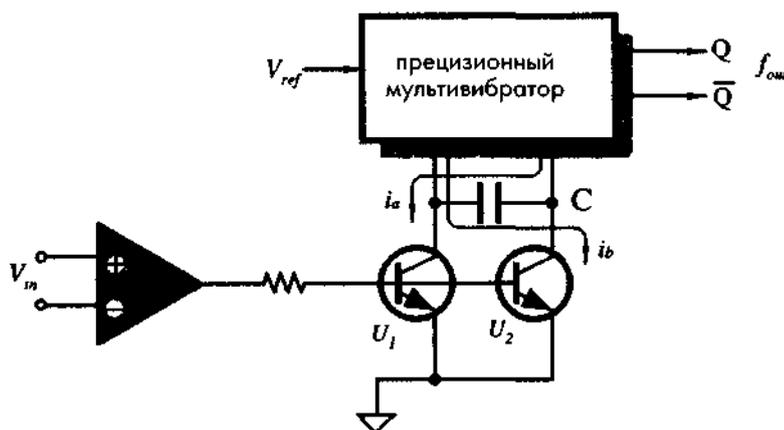


Рис. 6.1. ПНЧ, реализованный на основе мультивибратора

входному напряжению. Достоинства этой схемы — простота и относительно низкая потребляемая мощность. Однако она обладает низким подавлением высокочастотных шумов, поэтому в случаях, где требуется высокая помехоустойчивость лучше применять схемы с уравниванием заряда.

В состав *ПНЧ с уравниванием заряда* входит аналоговый интегратор и компаратор напряжений (рис. 6.2.). Достоинства этой схемы - высокое быстродействие, линейность и хорошее шумоподавление. Ряд фирм выпускают такие схемы в интегральном исполнении:

например, ADVFC32 и AD650 (Analog Devices), а также LM331 (National Semiconductors). Такой ПНЧ работает следующим образом. Входное напряжение  $V_m$  поступает на вход интегратора через резистор  $R$ . Интегрирующий конденсатор включен в цепь ОС ОУ, выходной сигнал которого сравнивается с небольшим отрицательным пороговым напряжением  $-0.6$  В. На выходе интегратора формируется пилообразное напряжение (рис. 6.4). В момент равенства напряжения интегратора и уровня порогового сигнала на выходе компаратора появляется перепад напряжения, запускающий одновибратор, вырабатывающий на своем выходе прямоугольный сигнал фиксированной длительности  $t_{os}$ . Прецизионный источник тока вырабатывает постоянный сигнал, который попеременно подключается то ко входу интегратора, то к его выходу. Ключ  $S_1$ , выполняющий операцию переключения, управляется выходным сигналом одновибратора. При подсоединении источника тока ко входу ОУ интегрирующий конденсатор  $C_m$  получает постоянный заряд  $\Delta Q = i \times t_{os}$ . На тот же самый конденсатор через резистор  $R_m$  поступает и входной ток  $I_{in}$ . В результате заряд на конденсаторе определяется суммой этих токов.

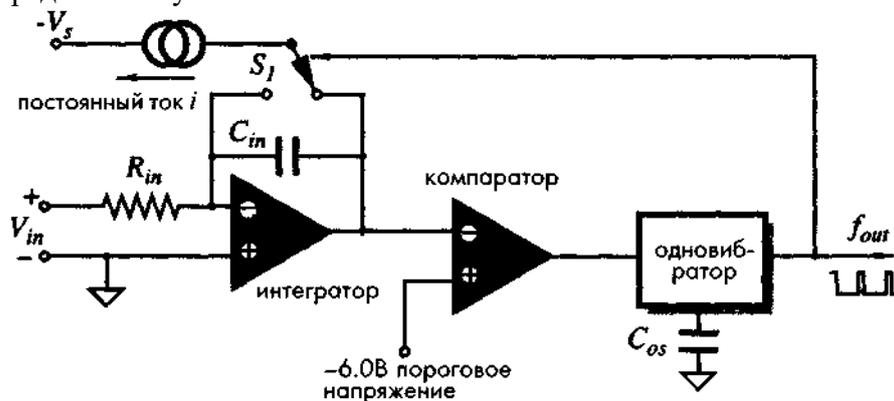


Рис. 6.2. ПНЧ с уравниванием заряда

Когда выходное напряжение интегратора сравнивается с пороговым напряжением, запускается одновибратор и ключ  $S_1$  меняет свое положение, т.е. начинается стадия восстановления (рис. 6.3 Б). Во время этой стадии ко входу интегратора одновременно подключены и источник тока, и источник входного напряжения. Полный перепад напряжения на выходе интегратора за время стадии восстановления определяется длительностью импульса одновибратора:

$$\Delta V = t_{os} \frac{dV}{dt} = t_{os} \frac{i - I_{in}}{C_m}.$$

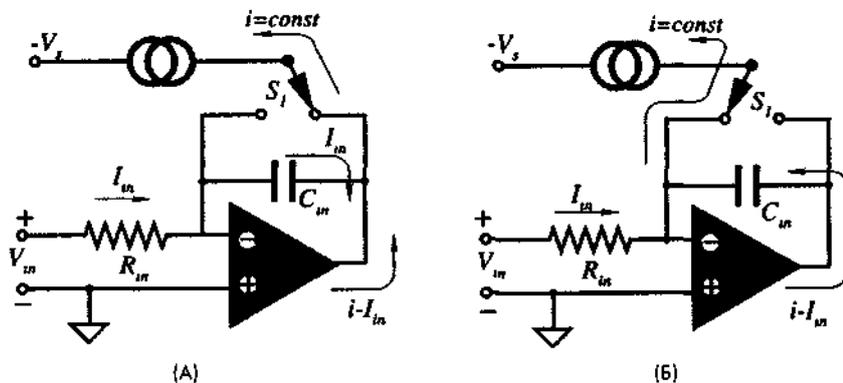


Рис. 6.3. Две стадии работы ПНЧ с уравниванием заряда: интегрирования и восстановления

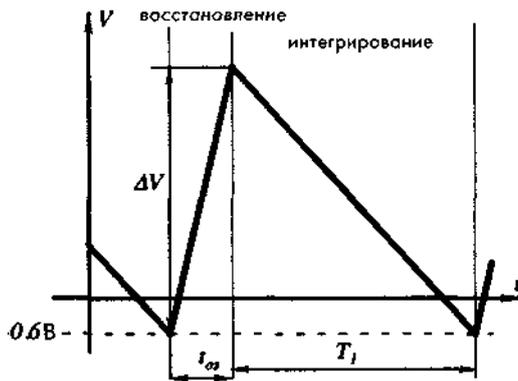


Рис.6.4. Выходной сигнал интегратора ПНЧ с уравниванием заряда

По окончании импульса одновибратора ключ  $S_1$  подключает ток  $i$  к выходу интегратора. Теперь этот ток никак не влияет на конденсатор  $C_{in}$ , однако при этом ток на входе компаратора уменьшается. Эта стадия называется стадией интегрирования (рис. 6.3.А и 6.4.). Во время этой стадии происходит разряд конденсатора положительным входным током:  $I_{in} = V_{in}/R_{in}$  со скоростью, пропорциональной величине напряжения  $V_{in}$ . Время, за которое напряжение на входе компаратора сравнивается с пороговым напряжением, находится из уравнения:

$$T_1 = \frac{\Delta V}{dV/dt} = t_{os} \frac{i - I_{in}}{C_{in}} \cdot \frac{1}{I_{in}/C_{in}} = t_{os} \frac{i - I_{in}}{I_{in}}$$

Из этой формулы видно, что величина конденсатора никак не влияет на длительность стадии интегрирования. Частота выходного сигнала определяется выражением:

$$f_{out} = \frac{1}{t_{os} + T_1} = \frac{I_{in}}{t_{os} i} = \frac{V_{in}}{R_{in}} \cdot \frac{1}{t_{os} \cdot i}$$

Следовательно, частота импульсов одновибратора пропорциональна входному напряжению и зависит от качества интегрирующего резистора, стабильности генератора тока и одновибратора. При выполнении точного расчета можно реализовать ПНЧ такого типа, обладающий в диапазоне частот 1 Гц... 1 МГц погрешностью нелинейности  $10 \times 10^{-4}$ .

Основным достоинством преобразователей интегрирующего типа является их способность подавления аддитивных шумов, поскольку при выполнении процедуры интегрирования уровень помех значительно снижается. Счетчик выполняет подсчет импульсов от преобразователя в течение заданного интервала времени  $T$ . Счетчик ведет себя как фильтр с передаточной функцией вида:

$$H(f) = \frac{\sin \pi f T}{\pi f T},$$

где  $f$  — частота импульсов. На низких частотах значение этой передаточной функции близко к единице. Это значит, что преобразователь совместно со счетчиком выполняют корректные измерения. Однако на частоте  $1/T$  передаточная функция равна 0, что означает полное подавление сигналов этих частот. Например, при интервале счета  $T = 20$  мсек, соответствующем частоте 50 Гц (частоте напряжения сети, которая часто является источником существенных помех во многих датчиках), 50-ти Гц шумы будут полностью устранены. Более того импульсы с частотами, кратными 50 Гц (100 Гц, 150 Гц,...), будут также подавлены.

### 6.1.3. АЦП двойного интегрирования

АЦП двойного интегрирования являются очень популярными преобразователями. Они используются практически во всех цифровых вольтметрах и других портативных устройствах, не требующих высокого быстродействия. АЦП данного типа выполняют косвенное преобразование входного напряжения. Сначала они преобразуют  $V_{in}$  в функцию от времени, которую затем при помощи счетчика импульсов конвертируют в цифровой код. Хотя АЦП двойного интегрирования и являются довольно медленными преобразователями, но благодаря

своей простоте, невысокой стоимости, помехоустойчивости и сравнительно высокой разрешающей способности они часто применяются в случаях, где нет быстрых изменений внешних сигналов. Рис. 6.5. поясняет принцип действия таких АЦП. Также как и ПНЧ с уравниванием зарядов АЦП двойного интегрирования состоит из интегратора и порогового компаратора. В данном случае пороговое напряжение устанавливается равным нулю (соответствующий вывод заземляется), правда, в некоторых случаях оно задается равным некоторому постоянному напряжению. При помощи переключателя  $S_1$  к интегратору поочередно подключается то входное, то эталонное напряжение. В рассматриваемой упрощенной схеме входное напряжение является отрицательным, а эталонное — положительным. Однако при добавлении к входному сигналу постоянной составляющей при помощи дополнительного ОУ, т.е. при его смещении вдоль вертикальной оси, данная схема может работать и с биполярными сигналами. Когда выходное напряжение интегратора пересекает нулевой уровень, компаратор срабатывает и посылает сигнал в логический блок, управляющий переключателями  $S_1$  и  $S_2$ . Ключ  $S_2$  используется для разряда интегрирующего конденсатора  $C_{in}$ .

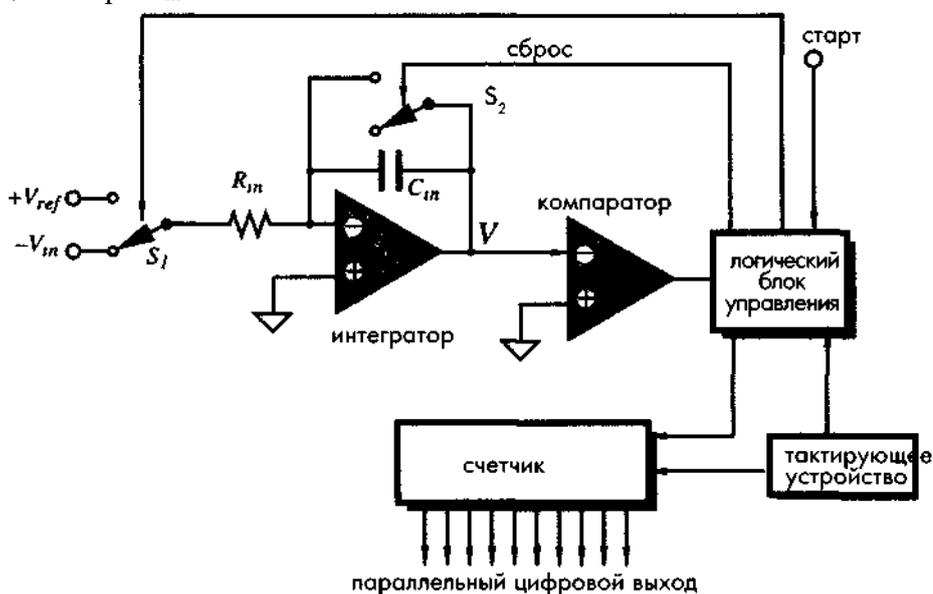


Рис. 6.5. АЦП двойного интегрирования

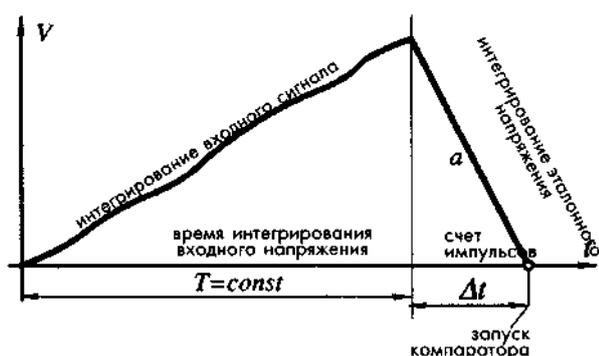


Рис. 6.6. Выходной сигнал АЦП двойного интегрирования

В начале преобразований, когда на вход «старт» приходит разрешающий сигнал, ключ  $S_1$  подает на интегратор входное напряжение, и блок управления запускает таймер, установленный на фиксированный интервал времени  $T$ , в течение которого напряжение на выходе интегратора линейно возрастает (рис. 6.6.). Любые изменения входного сигнала в процессе интегрирования усредняются. По истечении времени напряжение на выходе интегратора становится равным следующему значению:

$$V_{in} = V_{ref} \frac{T}{R_{in} C_{in}},$$

где  $V_{in}$  — среднее значение входного сигнала за промежуток времени  $T$ . В этот момент ключ  $S_1$  подключает на вход интегратора эталонное напряжение, имеющее противоположную входному сигналу полярность. Наступает фаза интегрирования эталонного напряжения, в течение которой выходное напряжение интегратора линейно уменьшается до нуля со скоростью:

$$a = -\frac{V_{ref}}{R_{in} C_{in}}$$

Во время интегрирования эталонного напряжения счетчик считает импульсы, поступающие от тактирующего устройства. Счет прекращается в момент, когда напряжение интегратора становится равным нулю. По сигналу компаратора, фиксирующего переход нулевого уровня, блок управления переключает ключ  $S_2$ , разряжающий конденсатор  $C_{in}$ . Заряд на конденсаторе, полученный в течение интегрирования входного сигнала, точно равен заряду, потерянный за время интегрирования эталонного напряжения. Поэтому справедливо следующее соотношение:

$$V_{in} \frac{T}{R_{in} C_{in}} = V_{ref} \frac{\Delta t}{R_{in} C_{in}}$$

Следовательно, отношение среднего входного и эталонного из которого выводится выражение:

$$\frac{V_{in}}{V_{ref}} = \frac{\Delta t}{T}.$$

напряжений можно заменить на отношение двух временных интервалов. Далее счетчик выполняет следующую процедуру: он конвертирует временной интервал  $\Delta t$  в цифровой код, определяя количество тактовых импульсов, поступающих в течение данного промежутка времени. Посчитанное количество импульсов и будет соответствовать среднему входному напряжению. Необходимо помнить,  $V_{ref}$  и  $T$  должны быть постоянными величинами.

АЦП двойного интегрирования имеет такие же преимущества, что и ПНЧ с уравниванием зарядов:

- Они оба подавляют шумы с частотой  $1/T$ . Следует отметить, что при  $T = 200$  мс происходит подавление как 50-ти, так и 60-ти герцовых помех, что защищает АЦП от сетевых наводок.
- Точность преобразования в обоих преобразователях не зависит от стабильности тактовой частоты, поскольку одно и то же тактирующее устройство задает интервал счета  $T$  и вырабатывает счетные импульсы.
- Разрешающая способность преобразователей ограничивается только их разрядностью. Поэтому для представления сигнала иногда используется большее количество разрядов, чем это требуется для обеспечения заданного уровня точности.
- Интегрирование входного напряжения обеспечивает подавление высокочастотных помех и усреднение всех выбросов сигнала в течение заданного интервала  $T$ .
- Пропускная способность АЦП двойного интегрирования ограничивается величиной, равной  $1/2 T$  преобразований в секунду.

Иногда для уменьшения погрешностей, вносимых аналоговой частью схемы (интегратором и компаратором), вводят еще одну стадию преобразований, во время которой конденсатор заряжается сигналом дрейфа нуля. Для компенсации этого явления полученное при этом значение напряжения вычитается при интегрировании входного сигнала. Существует еще один способ уменьшения статической погрешности, заключающийся в запоминании результатов счета, полученных на стадии заряда конденсатора сигналом дрейфа нуля, с последующим их вычитанием цифровыми методами.

АЦП двойного интегрирования часто дополняются аналоговыми компонентами (ОУ, ключами, резисторами и конденсаторами) и микроконтроллером, управляющим тактирующим устройством, логическим блоком и счетчиком. Иногда аналоговая часть такого

АЦП выполняется в виде отдельной ИС. Примером этого может служить модуль TS500 фирмы Texas Instruments.

#### 6.1.4. АЦП последовательного приближения

АЦП такого типа обладают высоким быстродействием (их пропускная способность может составлять до 1 МГц) и хорошей разрешающей способностью (до 16 разрядов). Они выпускаются в виде ИС и широко используются со многими типами датчиков. Их время преобразования постоянно и не зависит от входного сигнала. Все преобразования уникальны, поскольку внутренние логические схемы и регистры обнуляются после каждого из них, что делает АЦП последовательного приближения пригодными для многоканального мультиплексирования. АЦП, показанный на рис.6.7.А, состоит из прецизионного компаратора напряжений; модуля, включающего в себя сдвиговые регистры и логический блок управления; и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), выполняющего роль цепи ОС, связывающей цифровые выходы со входом аналогового компаратора.

Метод преобразования заключается в сравнении неизвестного входного напряжения  $V_{in}$  с прецизионным напряжением  $V_a$  или током, генерируемым ЦАП. Этот метод похож на процесс взвешивания при помощи набора из  $n$  эталонных гирь, соответственно равных 1/2 кг, 1/4 кг, 1/8 кг, 1/16 кг и т.д. (Общий вес всех гирь при этом составляет 1 кг).

Перед началом цикла преобразования все регистры очищаются, а на выходе компаратора устанавливается ВЫСОКИЙ уровень напряжения. На входах ЦАП задается код, равный СЗР (1/2 максимального значения). При этом на выходах ЦАП формируется, соответствующее этому коду аналоговое напряжение  $V_a$ , равное половине максимального входного сигнала. Если при этом входное напряжение больше напряжения ЦАП, уровень на выходе компаратора остается ВЫСОКИМ, и в соответствующем разряде регистра формируется значение, равное «1». После этого к СЗР добавляется следующий по значимости разряд (2/8 = 1/4 максимального значения). Если и в этом случае входной сигнал остается больше напряжения ЦАП, к ним добавляется следующий бит и т.д. Так происходит до тех пор, пока входной сигнал не станет меньше напряжения ЦАП. В рассматриваемом примере это произошло на втором шаге. При этом выходной сигнал компаратора сразу же переключается на НИЗКИЙ уровень, а в соответствующем разряде регистра устанавливается значение «0». После чего подключается очередной (третий) разряд. Процесс такого сравнения продолжается до тех пор, пока не будет использован последний МЗР. После чего на линии состояния выставляется «1», информирующая об окончании цикла преобразования, и данные могут быть считаны из регистра. Код, сформированный в выходном регистре, соответствует цифровому представлению входного сигнала.

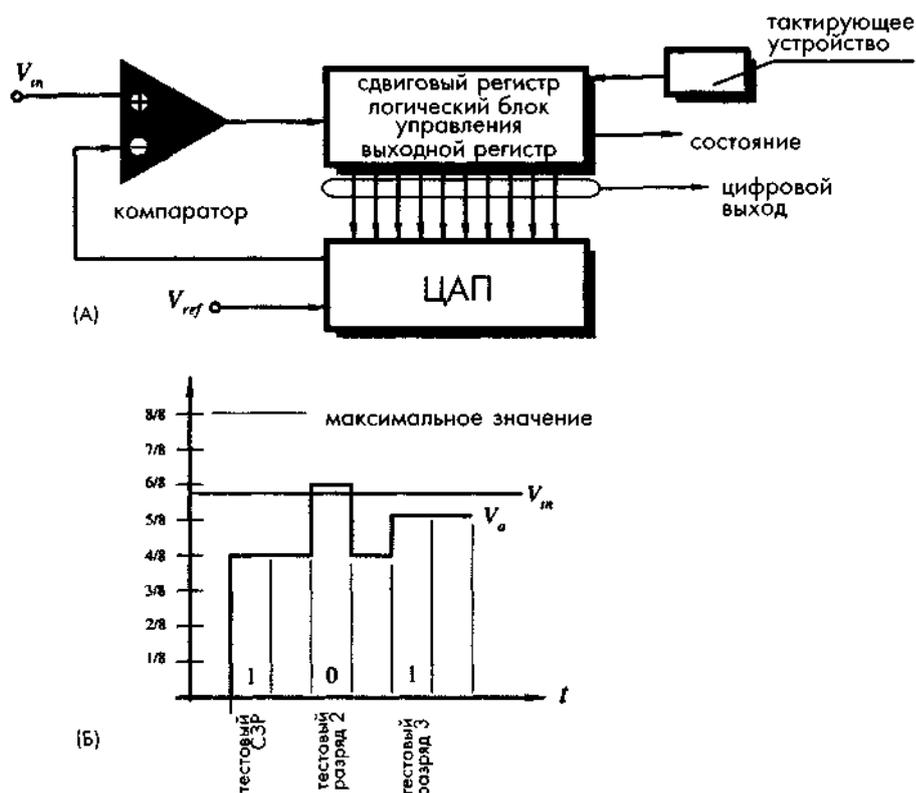


Рис. 6.7. АЦП последовательного приближения: А — блок-схема, Б — временная диаграмма, поясняющая процесс 3-х разрядного взвешивания

Для получения достоверных данных входной сигнал не должен меняться в течение всего цикла преобразований. Невыполнение этого условия может привести к возникновению ошибок. Для обеспечения постоянства входного напряжения в состав АЦП последовательного приближения, как правило, входит схема выборки и хранения, являющаяся аналоговым устройством, запоминающим входной сигнал в начале цикла и хранящим это значение до окончания всех преобразований.

#### 6.1.5. Улучшение разрешающей способности систем сбора данных

В типовой системе сбора данных в состав ИС микроконтроллера часто входит АЦП, разрешающая способность которого ограничивается, как правило, 8-мью, редко 10-тью разрядами. При более высоком разрешении, когда число разрядов достигает 12 и даже 14, либо стоимость устройства становится несоизмеримо большой, либо характеристики встроенного АЦП не удовлетворяют требованиям системы. На практике для большинства задач 8-10 разрядов бывает достаточно для корректного преобразования внешних воздействий. Существуют два метода улучшения разрешающей способности системы: использование АЦП двойного интегрирования, чья разрешающая способность ограничивается только скоростью счета и быстродействием компаратора и применение АЦП (например, последовательного приближения) совместно с устройством расширения разрешающей способности, дающего возможность повысить разрешение на несколько разрядов (например, с 8 до 12). В дополнение к обычному 8-ми разрядному АЦП в состав такого устройства (рис.6.8) включены ЦАП, вычитающее устройство и усилитель с коэффициентом усиления  $A$ . В специализированных ИС или схемах из дискретных компонентов ЦАП может входить в состав АЦП (см. рис. 6.7.А).

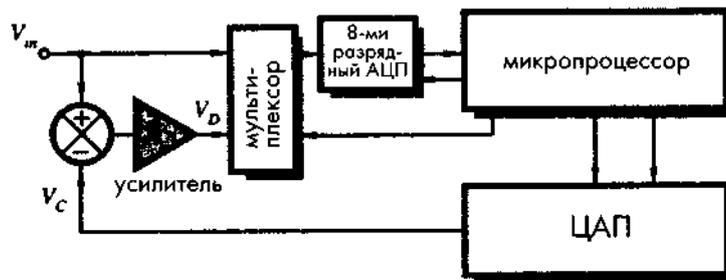


Рис. 6.8. Схема с улучшенной разрешающей способностью

При максимальном уровне входного сигнала  $V_{in}$ , равном  $E$ , исходная разрешающая способность 8-ми разрядного преобразователя выражаемая в вольт/разряд, равна:

$$R_0 = \frac{E}{2^8 - 1} = \frac{E}{255},$$

Например, при  $E = 5$  В, разрешение 8 -ми разрядного АЦП будет равно 19.6 мВ/разрядное напряжение. При этом выходной сигнал АЦП в цифровом виде равен  $M$ . В исходном состоянии мультиплексор подсоединяет ко входу АЦП вход  $M$ . Микропроцессор передает это значение на вход ЦАП, с выхода которого снимается аналоговое напряжение  $V_c$ , приблизительно равное входному сигналу. На вычитающем устройстве определяется разность напряжений  $V_{in}$  и  $V_c$ , которая затем усиливается ОУ до значения:

$$V_D = (V_{in} - V_c)A$$

Напряжение  $V_D$  представляет собой усиленное рассогласование между действительным значением входного сигнала и его цифровым представлением. При максимальном уровне входного сигнала получается наибольшее значение ошибки ( $V_{in} - V_c$ ), равное разрешающей способности АЦП. При 8-ми разрядном преобразовании величина  $V_D$  равна 19.6 мВ. После этого мультиплексор подает напряжение  $V_D$  на АЦП, преобразующий его в цифровое значение  $C$ :

$$C = \frac{V_D}{R_0} = (V_{in} - V_c) \frac{A}{R_0}$$

В результате микропроцессор получает два цифровых кода, соответствующих значения  $M$  и  $C$ , где  $C$  соответствует дополнительным разрядам, обеспечивающим более высокое разрешение. При  $A = 255$ ,  $E = 5$  В, МЗР будет приблизительно равен 77 мкВ, разрешению 16-ти разрядного АЦП. На практике получить такое высокое разрешение, как правило, не удастся, что связано с внутренними погрешностями ЦАП, дрейфом усилителя, шумами и т.д. Однако этот метод дает возможность реально повысить разрешение до 10 или 12 разрядов.

## 7. Интеллектуальные мехатронные модули

По сравнению с мехатронными модулями движения в конструкцию интеллектуальных мехатронных модулей (ИММ) дополнительно встраиваются управляющие устройства и силовые электронные преобразователи, что придает им интеллектуальные свойства.

Искусственный интеллект образуется на использовании в системе управления датчиков (преобразователей контролируемых параметров в электрический или другой сигнал) информации, воспринимаемой устройствами автоматики. Среди таких устройств «сбора и обработки» информации о состоянии внешней среды особое место занимают преобразователи усилий в деформацию чувствительного элемента, регистрирующие статические и динамические нагрузки. Такие тактильные датчики могут быть контактными и бесконтактными. Функционирование схем машин и механизмов автоматического действия в технической системе сопряжено с непрерывным контролем и взаимосвязанным процессом передачи, приема и обработки информации информационно-измерительной подсистемой по соответствующим алгоритмам с применением микропроцессорных устройств и современной вычислительной техники.

Объединение производителем в едином модуле управляющих и электронных свойств, двигателя, механической и информационных частей освобождает пользователя от решения «проблемы интересов».

Для работы с ИММ пользователю достаточно только связать мехатронные модули с центральным устройством управления через локальную сеть, в результате получается децентрализованная распределенная система управления, типовая архитектура которой представлена на рис. 7.1

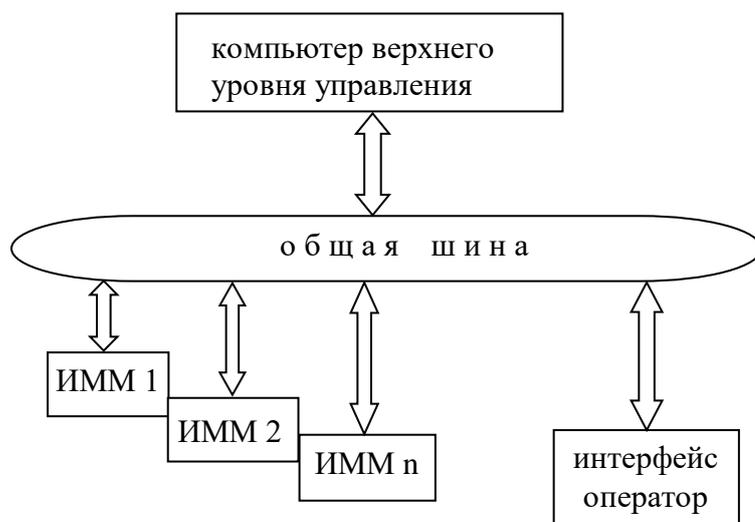


Рис. 7.1 Типовая архитектура распределенной системы управления

При этом расстояние между компьютером верхнего уровня управления и контроллерами интеллектуальных модулей может достигать нескольких сотен метров. Обмен информацией и управляющими командами между этими устройствами осуществляется через высокоскоростную компьютерную сеть.

Применение распределенных систем позволяет эффективно решить ряд проблем управления, характерных для мехатроники. К числу основных преимуществ систем данного типа следует отнести:

- отсутствие многочисленных соединительных кабелей и приводов (удобство наладки, эксплуатации и т.д.);
- возможность применения современных вычислительных алгоритмов и методов управления движением;

- высокая гибкость открытой архитектуры, возможность оперативно формировать зоны управления в соответствии с требованиями технологического процесса, и расширять систему для решения новых функциональных задач;
- высокая надежность системы, диагностика в процессе вычисления операции.

Оператор с помощью специального программного обеспечения может задавать в программе движения временные или логические условия, использовать методы компенсации зазора (люфта), получать сообщения о текущем положении и диагностике состояния модуля.

Технические характеристики интеллектуального мехатронного модуля “Simordrive Posmo Si” приведены в качестве примера в табл. 7.1

Таблица 7.1

Технические характеристики ИММ “Simordrive Posmo Si”

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальный момент, Нм	Момент инерции ротора без / с тормозом $J_g \cdot 10^{-4}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	Номинальный ток, А	Масса без тормоза / с тормозом, кг
1 FK6	2.1	4.0	8.9 / 9.5	3	12.0 / 12.5
	3.7	6.0	16.1 / 17.0	5.2	16.3 / 16.8
	2.8	6.8	15.0 / 18.0	3.9	16.3 / 17.8
	5.3	10.5	27.3 / 30.3	7.4	21.0 / 22.5
	6	12	55.3 / 63.2	8.2	23.9 / 26.3

Фирма “Siemens” производитель данных модулей, отмечает их следующие достоинства:

- минимизация затрат потребителя, благодаря размещению модуля непосредственно в машине;
- непосредственное подключение сигналов с помощью четырех клемм, которые настраиваются на входе и выходе;
- быстрая диагностика, благодаря светодиодам, показывающим неисправность и готовность к работе и использованию специальной программы Simo Com U;
- быстрая замена модулей с помощью карты памяти.

В качестве датчика обратной связи используется вращающийся трансформатор с разрешающей способностью 4096 имп/об.

Модуль оснащен двигателями синхронного типа с номинальным моментом 4 Нм при максимальной скорости вращения до 6000  $\text{мин}^{-1}$ . Отдельные модификации мехатронных модулей содержат также встроенное тормозное устройство.

Принцип действия любой автоматической системы управления заключается в обнаружении отклонений регулируемых величин от заданных значений и формирование воздействий на процесс управления для устранения этих отклонений.

Часто переменную величину, значение которой необходимо поддерживать постоянной или изменять по желаемому закону, называют управляемой величиной (координатой).

Требуемое значение регулируемой величины (координаты) принято называть заданным, а фактическое – текущим.

Разность между заданным и текущим значениями является отклонением или сигналом ошибки. Совокупность устройств, которые воздействуют на объект управления, поддерживая текущее значение управляемой величины (координаты) равным заданному называют автоматическим регулятором или динамической системой.

Воздействие регулятора на объект с целью приближения текущего значения управляемой величины к заданному или придания замкнутой системе желаемых свойств, называют управляющим воздействием, а совокупность устройств и физических сред,

через которые управляющее воздействие влияет на управляемую величину – каналом управления.

В зависимости от управляющего воздействия системы управления разделяют на:

- системы автоматической стабилизации, поддерживающие управляемую величину на заданном уровне;
- системы программного регулирования с изменением управляемой величины по заданному закону;
- следящие системы, в которых заданное значение управляемой величины изменяется произвольно по времени.

Для уменьшения ошибки и сохранения устойчивости обычно вводят интегральный закон управления (И – регулятор) в виде:

$$И = -K \int_0^t \Delta(t) \text{ или } \frac{du}{dt} = -K \cdot \Delta,$$

где  $K$  – коэффициент усиления регулятора (знак минус учитывает наличие обратной связи);  
 $\Delta$  – сигнал ошибки.

Данный закон предусматривает изменение управляющего сигнала со скоростью, пропорциональной отклонению управляемой величины от заданного значения. Включение интегрирующего звена в мехатронную систему существенно повышает точность процесса управления.

## 8. Производственные машины с параллельной и гибридной кинематикой.

Благодаря появлению высокопроизводительных компьютеров и интеллектуальных мехатронных моделей стало возможным управление движением машин с нелинейной структурой в реальном масштабе времени. Мехатронный подход к интеграции прецизионной механики с микроэлектронными, вычислительными и сенсорными устройствами делает перспективным создание и внедрение машин с параллельной и гибридной кинематикой в различных отраслях промышленности.

Такие мехатронные центры (машины), состоящие из ряда модулей контролируют предельные значения скоростей и ускорений в приводах, исключают возможность достижения границ рабочей зоны линейными или ориентирующими степенями подвижности. Все описанные ситуации визуализируются на дисплее системы управления.

Примером производственных машин на единой конструктивной базе могут быть: координатно-измерительные машины (КИМ) и технологические модули (ТМ) для механообработки.

Сочетание функций обрабатывающего центра и КИМ дает возможность:

- точно «координировать» новые участки к уже готовым поверхностям;
- корректировать траектории движения инструмента с учетом деформации обрабатываемой детали;
- аттестовывать и при необходимости дорабатывать изделия на одном рабочем месте.

Технологические модули предназначены для фасонной обработки изделий с высокой точностью методами фрезерования, шлифования, сверления, полирования, а также для выполнения операций гравировки, растачивания, разметки. Рабочая зона таких производственных машин варьируется у различных моделей в диапазонах: по оси X – 500 ... 3000 мм, по оси Y – 400 ... 1400 мм, по оси Z – 350 ... 750 мм. Максимальный угол поворота подвижной платформы относительно каждой из осей составляет 45...60°, скорость её движения задается программно в интервале 0.01 ... 160 мм/с. Технологические машины оснащаются мехатронными модулями типа «мотор-шпиндель» мощностью от 1.5 ... 7.5 кВт с регулируемой частотой вращения в диапазоне 400...2400 мин<sup>-1</sup>.

КИМ выполняют автоматические измерения и контроль размеров деталей от конструкторских или технологических баз. Погрешность объемных измерений для различных моделей не превышает 3.8 мкм для измеряемого размера L = 300 мм.

Измерения выполняются с помощью специальной головки-щупа, оснащенной датчиками механического или токового касания. Контактное усилие при токовом касании не превышает 0.0003 Н, что позволяет измерять податливые и мелкоструктурные детали. Погрешность позиционирования рабочего органа для технологических машин составляет 5.0 мкм (на перемещениях на расстояние до 300 мм).

### *8.1 Мехатронные технологии обработки материалов резанием.*

Существует точка зрения, что мехатронные технологии включают в себя технологии новых материалов и композитов, микроэлектронику, фотонику, микробионику, лазерные и др. технологии.

Однако, при этом происходит подмена понятий и, вместо мехатронных технологий, которые реализуются на основе использования мехатронных объектов, в этих работах идет речь о технологии изготовления и сборки таких объектов.

Большинство научных работников в настоящее время считают, что мехатронные технологии всего лишь формируют и реализуют необходимые законы исполнительных движений механизмов с компьютерным управлением, а также агрегатов на их основе, или осуществляют анализ этих движений для решения диагностических и прогностических задач.

В механической обработке эти технологии направлены на обеспечение точности и производительности, которые невозможно достигнуть без использования мехатронных

объектов, прообразами которых являются металлорежущие станки с открытыми системами ЧПУ. В частности такие технологии позволяют компенсировать погрешности, которые возникают вследствие колебания инструмента относительно заготовки.

Однако, предварительно следует отметить, что мехатронные технологии включают в себя следующие этапы:

1. Технологическая постановка задачи;
2. Создание модели процесса с целью получения закона исполнительного движения;
3. Разработка программного и информационного обеспечения для реализации;
4. Дополнение информационной управляющей и конструкторской базы типового мехатронного объекта, реализующего предлагаемую технологию, если в этом есть необходимость.

Адаптивный способ повышения виброустойчивости токарного станка.

В условиях использования разнообразного режущего инструмента при обработке деталей сложной формы и широкой номенклатуры может резко возрастает вероятность возникновения автоколебаний и потеря виброустойчивости технологической системы станка.

Это влечет за собой снижение интенсивности обработки или дополнительные капитальные вложения в технологический процесс. Перспективным способом снижения уровня автоколебаний является изменение скорости резания в процессе обработки.

Такой способ достаточно просто реализуется технически и оказывает эффективное воздействие на процесс резания. Ранее этот способ реализовался как априорное регулирование на основе предварительных расчетов, что ограничивает его применение, так как не позволяет учитывать многообразие причин и изменчивость условий возникновения вибраций.

Значительно более эффективны адаптивные системы регулирования скорости резания с оперативным контролем силы резания и ее динамической составляющей.

Механизм считывания уровня автоколебаний при обработке с изменяемой скоростью резания можно представить следующим образом.

Пусть при обработке детали со скоростью резания  $V_1$  технологическая система находится в условиях автоколебаний. При этом частота и фаза колебаний на обработанной поверхности совпадают с частотой и фазой колебаний силы резания и самого резца (эти колебания выражаются в виде дробления, волнистости и шероховатости).

При переходе к скорости  $V_2$  колебания на обработанной поверхности детали относительно резца при последующем обороте (при обработке «по следу») происходит с другой частотой и синхронности колебаний, то есть их фазовое совпадение нарушается. Благодаря этому, в условиях обработки «по следу» интенсивность автоколебаний снижается, а в их спектре появляются высокочастотные гармоники.

С течением времени в спектре начинают преобладать собственные резонансные частоты и процесс автоколебаний вновь интенсифицируется, что требует повторного изменения скорости резания.

Из сказанного следует, что основными параметрами описанного метода является величина изменения скорости резания  $\Delta V$ , а также знак и частота этого изменения. Эффективность влияния изменения скорости резания на показатели обработки следует оценивать по длительности периода восстановления автоколебаний. Чем он больше, тем дольше сохраняется пониженный уровень автоколебаний.

Разработка метода адаптивного управления скоростью резания предполагает имитационное моделирование этого процесса на основе математической модели автоколебаний (рис.8.1), которая должна:

1. Учитывать динамику процесса резания;
2. Принимать во внимание обработку «по следу»;

3. Адекватно описывать процесс резания в условиях автоколебаний.

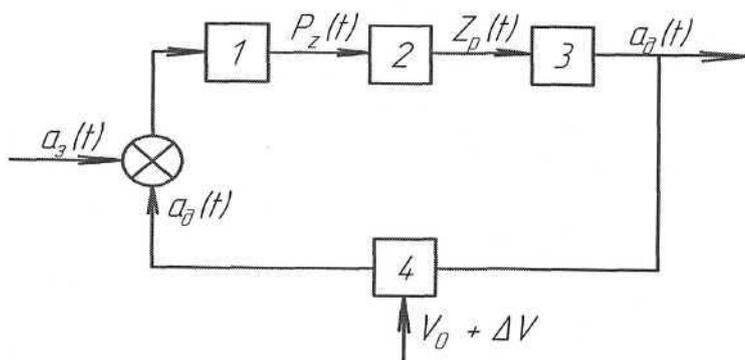


Рис.8.1. Структурная модель автоколебаний.

- 1 - модель динамической характеристики силы резания
- 2 - преобразование  $P_z$  в колебания резца  $Z_p$
- 3 - преобразование  $Z_p$  в колебания  $a_d$  на поверхности детали
- 4 - блок задержки на время одного оборота заготовки

Первоначально возмущающим входным воздействием разработанной модели является  $a_3$  припуска на заготовке.

Изменения припуска приводят к колебаниям силы резания  $P_z$ , что определяется моделью ее динамической характеристики. Изменение  $P_z$  вызывает колебание  $Z_p$  резца. Дальнейшие преобразования колебания резца в колебания  $a_d$  детали, позволят перейти к колебаниям на обработанной поверхности детали.

Введение обратной связи путем подачи колебания  $a_d$  на вход модели с задержкой на время одного оборота заготовки учитывает обработку «по следу».

В результате моделирования установлено следующее:

1. Регулированием скорости резания в условиях автоколебаний можно добиться уменьшения их амплитуды. В дальнейшем амплитуда может снова возрастать, что требует повторного изменения скорости резания.
2. Величина изменения скорости резания заметно влияет на длительность периода снижения и восстановления уровня автоколебаний.
3. Для каждой частоты автоколебаний существует свое оптимальное значение изменения скорости резания.
4. Чем выше частота автоколебаний, тем меньше должно быть значение  $\Delta V$
5. Чем меньше заданная допустимая амплитуда автоколебаний, тем с большей частотой следует изменять скорость резания.

Последнее свидетельствует о том, что область применения предложенного метода подавления автоколебаний ограничена динамическими характеристиками привода главного движения (ПГД). На основании результатов моделирования разработан алгоритм адаптивного управления приводом главного движения в целях снижения уровня автоколебаний (рис. 8.2). Исходя из технологических условий, задают допустимую амплитуду автоколебаний технологической системы. В отсутствие задания система сама устанавливает мнимое значение  $a_{доп}$ .

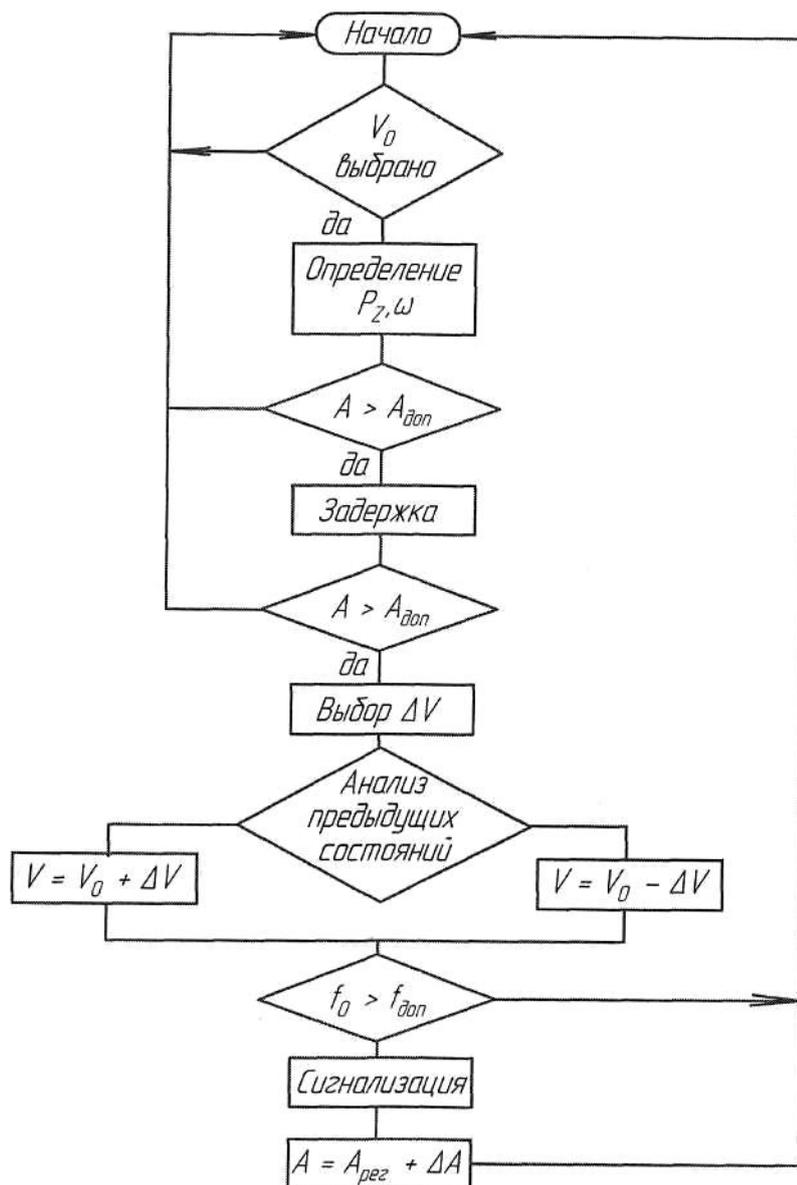


Рис.8.2. Алгоритм адаптивного управления приводом главного движения

### 8.2. Мехатронный робот-станок "РОСТ 300"

Мехатронный робот-станок предназначен для финишной обработки: пера лопаток газовых и паровых турбин, энергетических станций и установок, газотурбинных двигателей, лопастей водяных турбин, гребных винтов различного назначения. Схема станка представлена на рис. 8.3. Создание этой мехатронной машины вызвано необходимостью стабилизации геометрических параметров и качества поверхности лопаток, определяющих вибрационные и шумовые характеристики турбоагрегатов, а также автоматизировать тяжелые и вредные для здоровья человека технологические операции.

Машина имеет нелинейную компоновку, отличием которой является отсутствие традиционных прямолинейных направляющих. Все формообразующие движения реализуются мехатронными модулями вращательного типа. Мехатронные модули построены на базе высокомоментных двигателей серии ТМА швейцарской фирмы ETEL S.A., которые встроены в конструкцию машины. Станок оснащен

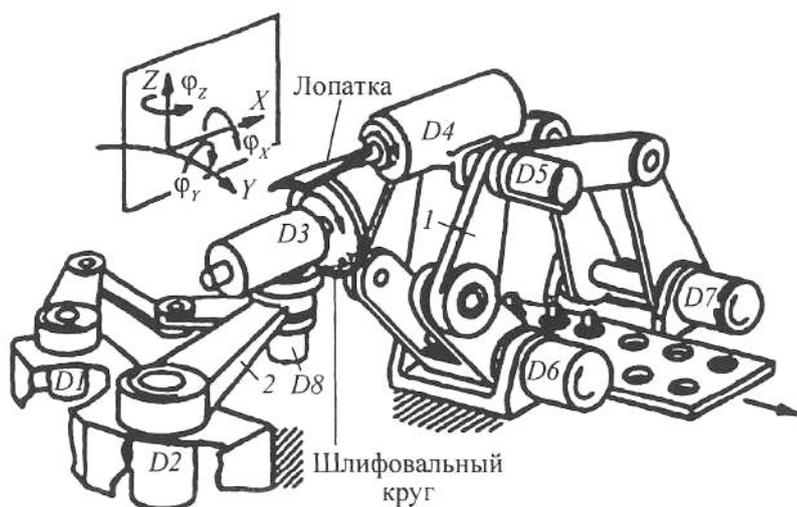


Рис.8.3. Схема робота-станка "РОСТ 300" (ИМАШ РАН)

"Indramat DIAХ04" и устройством числового программного управления серии РА8000NT фирмы Power Automation AG. Оптико-электронная измерительная система позволяет осуществлять контроль обрабатываемой поверхности заготовки с целью привязки к базовым поверхностям станка и задания оптимальных режимов обработки.

**Технические характеристики робота-станка "РОСТ 300"**

Число одновременно управляемых координат .....	6
Масса машины, кг .....	2500
Максимальные размеры обрабатываемого изделия, мм .....	150 x 40 x 80
Диаметр шлифовального круга, мм .....	30...80
Точность контурной обработки, мм.....	0,025
Пределы рабочих подач по осям, мин <sup>-1</sup> .....	120.. 2000
Скорость быстрого перемещения, мм/мин.....	24 000
Скорость вращения шлифовального электрошпинделя, мин <sup>-1</sup> .....	6000...24000

Наряду с очевидными преимуществами опыт внедрения машин с параллельной и гибридной кинематикой в реальное производство выявил ряд актуальных научно-технических проблем. К ним в первую очередь следует отнести следующие вопросы:

- сложность системной интеграции, необходимость дополнительного времени для анализа и поиска неисправностей;
- большая трудоемкость обслуживания и программирования машины по сравнению с традиционным оборудованием;
- сложность и неотработанность процедуры калибровки машины;
- необходимость знаний как в области станков с ЧПУ, так и промышленных роботов для обучения персонала методике программирования;
- неоднородность (анизотропия) характеристик машины в различных областях рабочей зоны, наличие особых конфигураций.

На эффективность решения эти задач, поставленных практикой производственного применения, необходимо обратить особое внимание при создании машин нового поколения.

## 9. Управление движением мехатронных систем на основе Интернет технологий

Дистанционное управление мехатронными объектами с использованием Интернета подразумевает не только сбор данных при помощи информационно-измерительной аппаратуры, но и подачу управляющих воздействий на исполнительные элементы различных типов.

Интернет технологии являются эффективным и удобным средством организации дистанционного управления техническими объектами, преимуществами которого являются:

- возможность организовать дистанционное управление реальными объектами и экспериментами из любой точки мира;
- возможность организации доступа широкого круга специалистов-экспертов, территориально удаленных друг от друга, к уникальному оборудованию в режиме реального времени.

Для правильного подхода к решению проблем использования Интернета для управления необходимо знать параметры временной задержки и вероятность потери пакетов данных, т.е. необходимо сформировать модель сегмента Интернета (табл. 9.1)

В зависимости от местонахождения оператора может меняться трассировка маршрута к серверу работа, содержащая различное число промежуточных серверов с неопределенными временами переходов к разной степени загрузки этих серверов.

Робототехническая система с мехатронным управлением по глобальной сети должна удовлетворять ряду основных практических требований:

- влияние изменения загруженности сети на работу оператора и качество его взаимодействия с роботом должно быть сведено к минимуму;
- для улучшения взаимодействия оператора с роботом web-сервер должен обеспечивать «дружелюбный» человеко-машинный интерфейс.

Таблица 9.1

Средняя задержка при передаче данных по Интернету

Хост	Расстояние, км	Среднее значение задержки, мс	Средне-квадратическое отклонение	Потери пакетов данных, %
Локальная сеть	0,05	0,998	0,715	0
тот же домен	30	8,10	5,35	0,08
Другой город	150	17,20	9,74	0,80
Другой континент	10000	326,3	27,20	41,4

Для уменьшения влияния загруженности сети на работу оператора необходимо уделить достаточное внимание оптимизации объема передаваемой по сети информации.

Обобщенная схема системы управления мобильным роботом по глобальной сети представлена на рис. 9.1

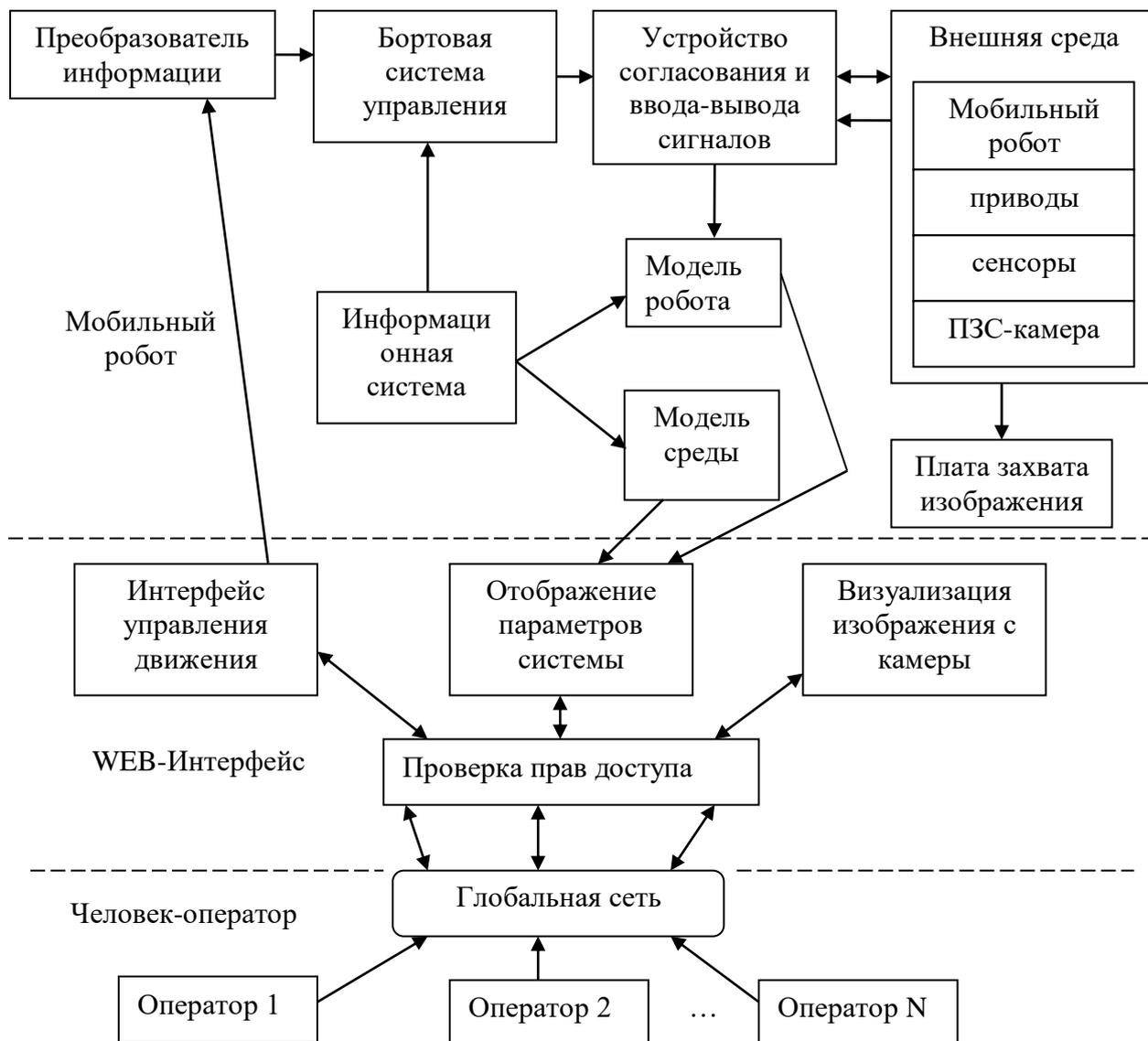


Рис. 9.1. Обобщенная схема системы дистанционного управления мобильным роботом по сети Интернет.

В этой схеме можно организовать эффективное управление мобильными роботами в различных условиях внешней среды с использованием коммуникационного ресурса Интернета и удобным пользовательским web-интерфейсом.

Преобразователь информации выполняет функцию преобразования унифицированных команд верхнего уровня управления, поступающих от человеко-машинного интерфейса системы, в команды для тактического уровня управления.

Информационная система навигации мобильного робота выполняет функцию сбора и обработки данных с датчиков пройденного пути, скорости и ускорения, датчиков наличия препятствий и т.п. Обработка этих данных позволяет выдавать информацию о текущем положении и скорости движения робота, наличии препятствий, расстоянии до них и т.п. Значения этих навигационных переменных используются системой управления тактического уровня, а также позволяет сформировать модель робота и окружающей среды для отображения параметров системы на мониторе оператора.

Бортовая система управления уровня должна обладать высокой степенью интеллектуальности на тактическом уровне.

Устройства согласования и ввода-вывода сигналов обеспечивают работу системы на исполнительном уровне управления. Они осуществляют усиление сигналов, сбор данных, выдачу управляющих воздействий на приводы робота.

Основными функциональными блоками web-интерфейса являются интерфейсы управления движением, отображения параметров системы и передачи видеоизображения.

Интерфейс управления движением представляет возможность оператору подавать такие унифицированные команды верхнего уровня с помощью нажатия кнопки на экране монитора, как разрешение на начало движения, остановку, поворот, изменение скорости.

Для реализации взаимодействия клиент-сервер важно, какой метод запроса использует клиентская часть при обращении к web-серверу. В общем случае запрос – это сообщение, посылаемое клиентом серверу. Метод POST используется для запроса серверу, чтобы тот принял информацию, включенную в запрос, как относящуюся к ресурсу, указанному идентификатором ресурса. Метод GET используется для получения любой информации, идентифицированной идентификатором ресурса в запросе.

CGI определяет четыре информационных потока: переменные окружения, стандартный входной поток, стандартный выходной поток.

Для создания человеко-машинного интерфейса –клиентской части системы управления – необходимо создать документ, в котором реализован интерфейс с оператором. В языке HTML это возможно посредством форм. Оператору предоставляется возможность давать команду «старт/стоп», изменять скорость и направление движения робота. Текущие значения сигналов с датчиков отображаются в виде графиков, стрелочных и цифровых индикаторов на динамически обновляемой web-странице на мониторе оператора.

При этом обработка навигационных переменных, а также параметров текущего состояния робота осуществляется на управляющем компьютере в рамках работы управляющей программы независимо от оператора и временной задержки сети Интернет.

## 10. Сенсорные элементы, датчики, чувствительные элементы и устройства мехатронных систем.

Перспективы развития мобильной робототехники связаны с интеллектуализацией устройств управления и сенсоров, что позволяет повысить качество проводимых операций и автономность их выполнения.

Для принятия решений мобильным роботом используются системы технического зрения, локационные датчики, датчики крена-дифферента, фотоимпульсные датчики скорости и многие другие, относящиеся к управлению режимами работы робота и диагностики состояния того объекта, который обследует мобильный робот.[12]

Таблица 10.1

Сенсоры, используемые в прототипе мобильного робота.

Сенсоры	Функциональное описание
Акселерометры	Двухкоординатные акселерометры «Analogue Device ADXL 205» для определения фактических параметров движения мобильного робота при его транспортной навигации
Фотоимпульсные датчики	Фотоимпульсные датчики «ЛИР-21» с разрешающей способностью 1000 имп/об для измерения параметров движения
Ультразвуковые датчики	Однозондные релейные ультразвуковые датчики "Sirio" для определения дефектов трубы и обнаружения препятствий
Микроволновый датчик	Однозондный релейный микроволновый датчик «Falcon MWS-1» для определения дефектов трубы и обнаружения препятствий
Видеокамера	Видеокамера «Logitech» для изучения внутреннего состояния трубы и её конфигурации. Может работать как в непрерывном, так и в дискретном режимах

Сенсорный модуль прототипа мобильного робота «ИРИС-1» с компьютерным управлением включает ультразвуковые и фотоимпульсные датчики, микроволновый датчик, видеокамеру, набор двухмерных акселерометров (табл. 10.1)

Для эффективного функционирования видеокамеры внутри трубы на работе, имеется источник дополнительного освещения.

Мобильный робот оснащен системой дистанционного управления с использованием сети Интернет.

Для надежной работы всего ММ в целом сигналы от датчиков обратной связи должны передаваться в двоичном коде. В соответствии с этим требованием структура мехатронного датчика может быть следующей (рис. 10.1) Внешнее механическое воздействие (сила, давление, деформация) действует на чувствительный элемент, который преобразовывает его в электрический сигнал. Чувствительный элемент непосредственно связан первичным аналоговым преобразователем, который усиливает электрический сигнал до уровня, необходимого для нормальной работы аналого-цифрового преобразователя.

Во время периодического опроса мехатронных датчиков всей ММС запрос на рассматриваемый датчик поступает на входной интерфейс, который открывает канал для получения информации от выходного интерфейса. Для уменьшения габаритов мехатронных модулей ММС сигналы от системы управления и обратно идут по одной шине.

Оснащение ММС мехатронными датчиками позволяет вводить в систему управления информацию о внешних воздействиях различной физической природы (рис.10.2).

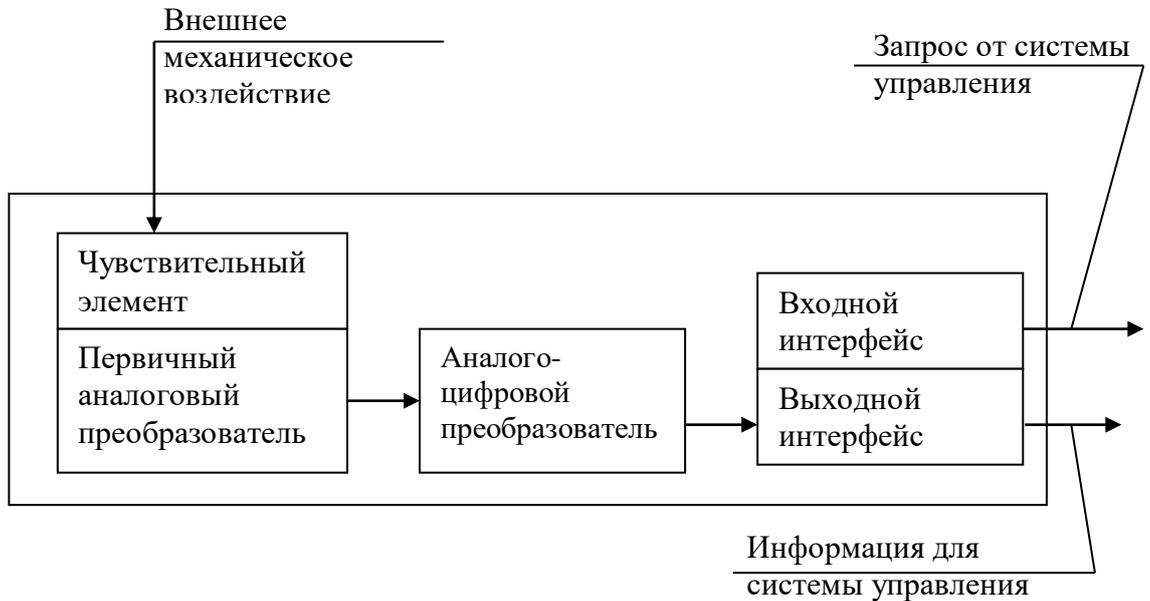


Рис. 10.1. Структурная схема мехатронного датчика микромеханического модуля

При круиз-контроле автомобиля впереди устанавливается датчик, который измеряет скорость транспортного средства и расстояние.

Датчик может быть оптического или радарного типа, но радарный датчик предпочтительней, поскольку он не подвержен влиянию погодных условий, как оптический датчик.

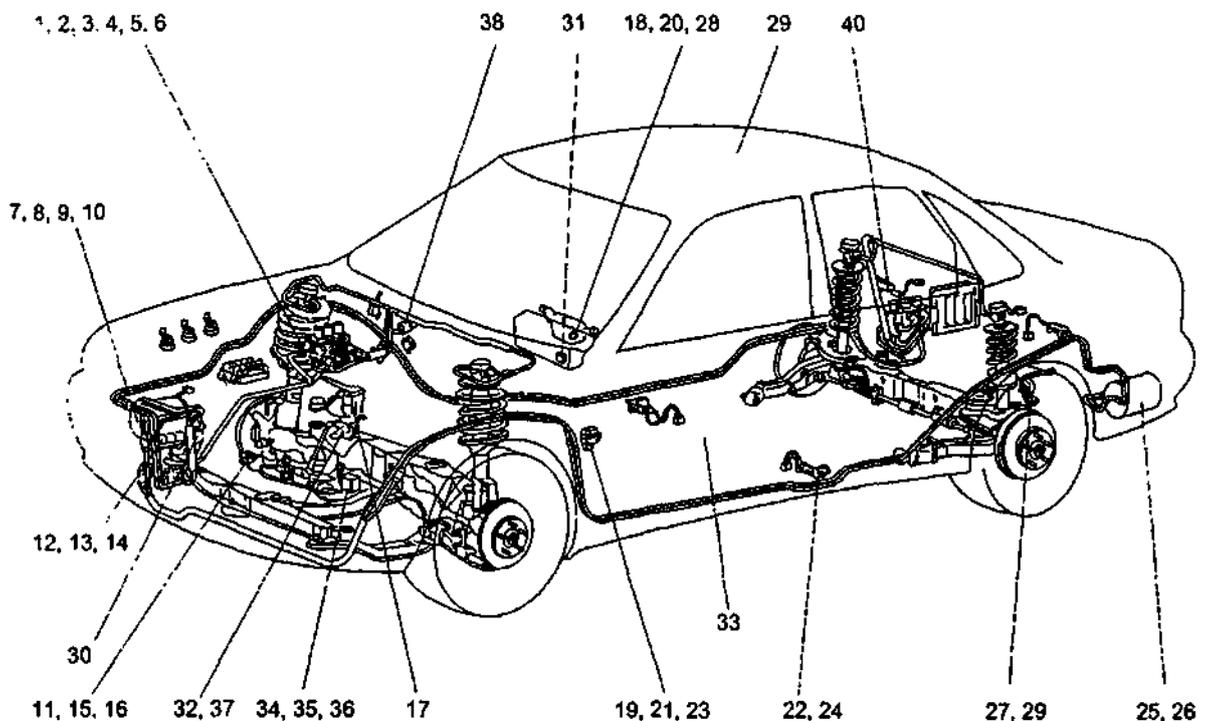


Рис. 10.2. Расположение датчиков на автомобиле

1 — датчик конфигурации впускного коллектора с управляемой геометрией, 2 — датчик тахометра, 3 — датчик положения распределительного вала, 4 — датчик нагрузки двигателя, 5 — датчик положения коленчатого вала, 6 — датчик крутящего момента

двигателя, 7 — датчик количества масла, 8 — датчик температуры охлаждающей жидкости, 9 — датчик скорости автомобиля, 10 — датчик давления масла, 11 — датчик уровня охлаждающей жидкости, 12 — радарный датчик системы торможения, 13 — датчик атмосферного давления, 14 — радарный датчик системы предотвращения столкновений, 15 — датчик скорости вращения ведущего вала коробки передач, 16 — датчик выбранной передачи в коробке передач, 17 — датчик давления топлива в рампе форсунок, 18 — датчик скорости вращения руля, 19 — датчик положения педали, 20 — датчик скорости вращения автомобиля относительно вертикальной оси, 21 — датчик противоугонной системы, 22 — датчик положения сиденья, 23 — датчик ускорения при фронтальном столкновении, 24 — датчик ускорения при боковом столкновении, 25 — датчик давления топлива в баке, 26 — датчик уровня топлива в баке, 27 — датчик высоты кузова по отношению к шасси, 28 — датчик угла поворота руля, 29 — датчик дождя или тумана, 30 — датчик температуры забортного воздуха, 31 — датчик веса пассажира, 32 — датчик кислорода, 33 — датчик наличия пассажира в сиденье, 34 — датчик положения дроссельной заслонки, 35 — датчик пропусков воспламенения, 36 — датчик положения клапана рециркуляции выхлопных газов, 37 — датчик абсолютного давления в впускном коллекторе, 38 — датчик азимута, 39 — датчик скорости вращения колес, 40 — датчик давления в шинах

### *10.1. Мехатронные модули микроперемещений*

Автоматические электромеханические устройства, предназначенные для перемещения миниатюрных объектов на расстояние менее 1 мм, можно назвать системами микроперемещений. Сфера их применения в последнее время постоянно расширяется. Это связано с интенсивным развитием таких областей приборостроения как микроэлектроника и микромеханика, оптика и оптоэлектроника, которые служат мощным стимулом прогресса робототехники и компьютерной техники.

Системы микроперемещений должны обладать достаточно высокой точностью: минимальный шаг обычно не превышает 1% от максимального хода. Для создания устройств с такими характеристиками актуальны принципы мехатроники. Они базируются на соединении в единую систему механических, электронных и электромеханических частей. Основные преимущества мехатронных систем микромеханики заключаются в компактности модулей и улучшении динамических характеристик вследствие упрощения кинематических цепей, а также высокой надежности и помехозащищенности.

Одним из перспективных видов приводов мехатронных систем микроперемещений (ММС) являются пьезоэлектрические приводы, которые позволяют через упругие кинематические механизмы сообщать выходным звеньям движение с необходимыми траекториями.

ММС в связи с чрезвычайно малыми перемещениями рабочих органов и высокими требованиями к точности обработки их движений (до  $\pm 0.1$  мкм) должны быть оснащены высокочувствительными датчикам обратной связи. Одно из главных требований к ним — это минимальные габариты, позволяющие встроить датчики в элементы микромеханической системы. Сочетание высокой точности и достоверности информации обратной связи с миниатюрными размерами датчиков усложняет задачу создания ММС. При обычной схеме построения системы управления сигналы с датчиков поступают в блок управления, располагающийся отдельно от механического блока. В связи с миниатюрными размерами приводов ММС аналоговые сигналы обратной связи и управляющие сигналы оказывают взаимное влияние, что резко ухудшает достоверность информации и управления. Поэтому логично было бы расположить преобразователи аналоговых сигналов, поступающих с датчиков, в дискретные непосредственно рядом с датчиком, т.к. достоверность передачи дискретных сигналов на порядок выше, чем аналоговых. Такое решение приводит к появлению следующего технического противоречия: для повышения точности всего микропривода необходимо оснастить

датчики преобразователями сигналов в непосредственной близости от них, что при этом не должно приводить к увеличению габаритов ММС. Преодоление этого противоречия возможно двумя путями.[5]

Использование оптических систем передачи информации: подвижная часть модуля оснащается зеркалом, а оптический сигнал воспринимается датчиком, расположенным на неподвижной части ММС. Такие системы с неподвижными датчиками могут определять координаты подвижных элементов.

Использование миниатюрных интегральных электронных устройств, кремниевые подложки которых являются несущими элементами упругих механических систем. Такие системы дают информацию о механических напряжениях, деформациях и ускорениях.

Наиболее перспективное направление в этой области состоит в работе мехатронных микромеханических модулей (ММ), из которых образуется ММС. Суть мехатронного подхода к проектированию заключается в интеграции в единый функциональный модуль приводной, информационной и управляющей составляющих электромеханической системы. Такой ММ может состоять из следующих элементов.

1. Микроэлектромеханический привод.
2. Упругие механические передачи.
3. Миниатюрные датчики обратной связи.
4. Первичные преобразователи электрических сигналов, снимаемых с датчиков.
5. Интерфейсы аналого-цифровые преобразователи.

Для манипуляционных систем целесообразно иметь обратную связь по следующим параметрам

- по перемещениям рабочего органа (выходного звена),
- по скоростям и ускорениям в характерных точках системы.
- по деформациям (что эквивалентно механическим напряжениям), характерных точках системы.[14]

#### *10.2 Датчики и чувствительные элементы мехатронных модулей.*

Обратная связь по перемещениям позволяет выйти рабочему органу (выходному звену) в определенную точку с минимальными погрешностями в квазистационарном режиме (т.е. когда динамические силы и моменты на порядок меньше, чем силы пьезопривода), несмотря на наличие гистерезиса в пьезопреобразователях. Чувствительные элементы, входящие в состав датчиков перемещения, по принципу действия можно классифицировать на оптические электромеханические и пневматические. Оптические системы обратной связи (техническое зрение), используемые в ММС, позволяют производить обработку получаемой информации и определять текущие значения скоростей и ускорений выходного звена при постоянном мониторинге. При этом на выходном звене обычно отсутствует какой-либо преобразующий элемент, за исключением миниатюрного зеркала, поэтому компактность системы высокая. Информация о скоростях и ускорениях позволяет работать мехатронному ММ в динамическом режиме с минимальными погрешностями, как по перемещениям, так и по скоростям.

Пневматические датчики обычно не подходят для ММ, т.к. в большинстве случаев подача воздушной струи в рабочую зону недопустима, хотя точность таких датчиков достигает 0.1 – 0.5 мкм. Электромеханические датчики, в частности индукционные и емкостные, как правило, имеют худшие характеристики по точности чем пневматические.

Обратная связь по деформациям (и соответственно по механическим напряжениям) позволяет осуществить тактильное ощущение системы, т.е. определять следующие параметры процесса.

1. Момент времени, когда рабочий орган начинает взаимодействовать с внешней средой, например, когда игла микроманипулятора начинает внедряться в исследуемый биоматериал.

2. Механические нагрузки на рабочий орган: сопротивление среды или объекта, динамические нагрузки на рабочий орган во время разгона или

торможения при микроударе. Кроме того, в некоторых случаях может наступить ситуация, в которой механические нагрузки будут превышать допустимый уровень. Поэтому эти датчики обеспечат информацию о предельных нагрузках.

3. По информации, поступающей с нескольких датчиков деформации можно судить об отклонениях пространственного положения элемента системы от определенного фиксированного положения, информация о котором находится в памяти микропроцессора.

Пьезоэлектрические преобразователи могут работать, используя как прямой, так и обратный пьезоэффект. По этой причине пьезокерамическую пластинку, входящую в состав пьезопреобразователя, можно применять в качестве приводного элемента, а небольшую его часть - в качестве датчика деформаций или ускорений. Такие датчики реагируют на переменное воздействие, поэтому использование их в качестве чувствительного элемента квазистационарного процесса проблематично. Они имеют высокую чувствительность, особенно тонкопленочные пьезоэлектрические датчики.

Перспективно использование пьезорезистивных датчиков, основанных на изменении электрического сопротивления при механической деформации чувствительного слоя датчика. Такой слой, выполненный по технологии вакуумного напыления на изолированную подложку, имеет весьма малые габариты: не более 1 x 1 x 0,02 мм, а чувствительность таких датчиков высока. Применяются датчики, измеряющие давление от 1 до 50 кПа, максимальное напряжение на выходе датчика - 80 мВ, температурный коэффициент нестабильности - 0,02 % К.

Такие датчики находят свое применение в конструкциях микроманипуляторов. На рис.10.3. показано выходное звено 1 микроманипулятора, имеющее микропипетку 2, закрепленную в центре крестообразной кремниевой диафрагмы 3. Качательное движение микропипетки 2 в двух направлениях x и y относительно корпуса 4, которая взаимодействует с объектом 5, осуществляется при помощи двухкоординатного электромагнитного привода 6. Перемещение микропипетки 2 вдоль оси z осуществляется за счет перемещения корпуса 4. Двухкоординатный датчик силы располагается на диафрагме 3. Он состоит из 8 пьезорезистивных элементов 7, расположенных в местах крепления перемычек 8 крестообразной диафрагмы 3 (в этих местах изгибные деформации максимальны). Пьезорезистивные элементы 7 соединены электропроводящими дорожками с аналого-цифровыми преобразователями сигналов 9. При отклонении микропипетки 2 от оси z пьезорезистивные элементы 7 будут испытывать различные деформации, в соответствии с которыми их омические сопротивления будут изменяться. Информация от пьезорезистивных элементов 7 через аналого-цифровые преобразователи 9 будет поступать в систему управления, которая в свою очередь выдаст сигналы на двухкоординатный электромагнитный привод 6.

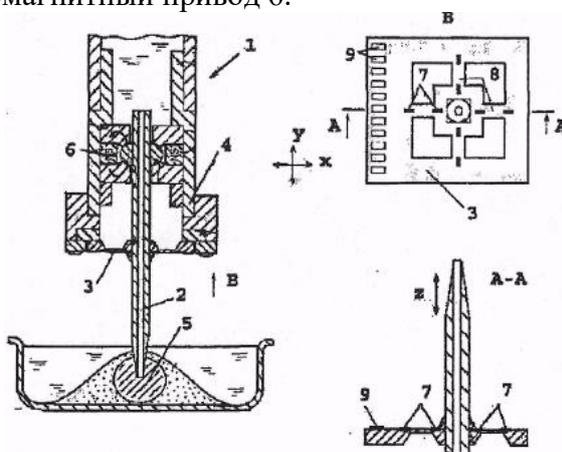


Рисунок 10.3. Микроманипулятор с двухкоординатным датчиком силы

Для оценки быстродействия модуля микроперемещений необходимо определить собственную частоту упругой системы. АУП можно представить как упругую систему с сосредоточенными параметрами. Тогда собственная частота определяется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_0}{m}},$$

где  $m$  – масса платформы, если масса платформы на много больше массы рессор с блоком перемещения платформы.

### 10.3. Ультразвуковые датчики расстояний для мехатронных модулей движения автомобиля.

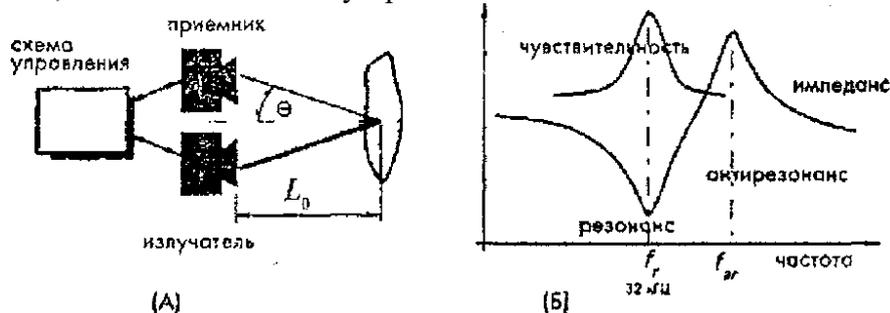
В активных системах безопасности автомобилей используются различные датчики, предупреждающие водителя и реагирующие: на засыпание водителя, на близкие объекты, находящиеся спереди и сзади, на предупреждения столкновений, на присутствие пешеходов в ночное время, на правильность парковки и т.д. Учитывая, что при этом полностью не задействованы возможности центрального компьютера автомобиля, можно на переднем бампере автомобиля установить два ультразвуковых датчика, отвечающих за плавность хода автомобиля и непосредственно считывающих информацию о качестве дороги. Общая схема такой системы воздействия на амортизаторы нами разработана и запатентована. Для проведения бесконтактных измерений можно разработать активный датчик, который бы мог одновременно и передавать эталонный сигнал, и принимать отраженный от объекта сигнал. Передаваться энергия может в виде любого излучения — например, через электромагнитные волны оптического или микроволнового диапазонов, через акустические волны и т.д. Принцип передачи и приема ультразвуковой энергии лежит в основе очень популярных ультразвуковых датчиков и детекторов скорости. Ультразвуковые волны являются механическими акустическими волнами, частота которых лежит за пределами слышимости человеческого уха — более 20 кГц.

При столкновении любых волн с объектом часть их энергии отражается. В случае ультразвуковых волн отраженная энергия рассеивается в пространстве. Это означает, что вне зависимости от направления падающего луча, все отраженные лучи почти равномерно распределяются внутри широкого пространственного угла, который может достигать значения 180°. При движении объекта частота отраженных волн не совпадает с частотой излучаемых волн. Это и есть так называемый эффект Доплера. Этот эффект характерен для волн любой природы, в том числе и ультразвуковых.

Расстояние  $L_0$  до объекта можно определить по скорости ультразвуковых волн  $v$  в данной среде и углу  $\theta$  (рис.10.4.А):

$$L_0 = \frac{vt \cos \theta}{2}, \text{ м}$$

где  $t$  — время, за которое ультразвуковая волна распространяется от излучателя до объекта и назад к приемнику. Если излучатель и приемник расположены недалеко друг от друга по сравнению с расстоянием до объекта,  $\cos \theta \approx 1$ . Очевидное преимущество ультразвуковых волн над волнами микроволнового диапазона заключается в том, что они распространяются со скоростями, которые намного меньше скорости света, характерной для СВЧ-волн. Поэтому интервал  $t$  для них гораздо длиннее, что упрощает его измерение, и, следовательно, снижает стоимость устройств.



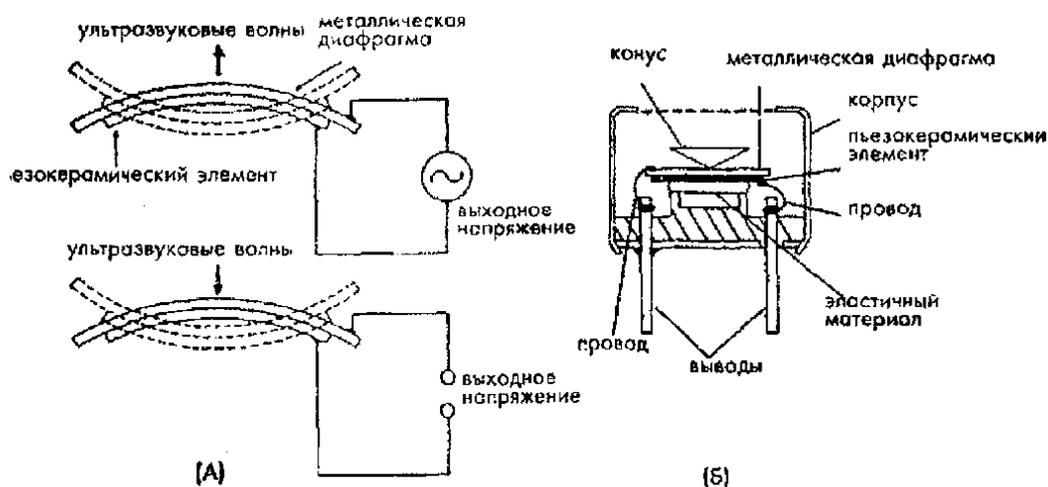
А – принципиальная схема, Б - характеристика пьезоэлектрического преобразователя

Рис.10.4. Ультразвуковые датчики расстояний

Для генерации любых механических волн, включая ультразвуковые, требуется организовать обратно поступательное движение поверхности, при котором создаются зоны разряжения и сжатия рабочей среды: газовой (воздушной), жидкостной или твердой.

Для возбуждения ультразвуковых волн чаще всего применяются пьезоэлектрические преобразователи, работающие в так называемом моторном режиме. Это название указывает на то, что в данном режиме пьезоэлектрические устройства напрямую преобразуют электрическую энергию в механическую.

На рис.10.5 А показано, что входное напряжение, приложенное к пьезокерамическому элементу заставляет его изгибаться, возбуждая тем самым ультразвуковые волны. Поскольку пьезоэлектричество является обратимым эффектом, воздействие ультразвуковых волн на тот же керамический элемент приводит к появлению на его поверхности электрических зарядов. Другими словами, элемент может работать и как излучатель, и как приемник (микрофон). Типичная рабочая частота излучающего пьезоэлемента составляет около 32 кГц. Для повышения эффективности частота задающего генератора должна быть равна резонансной частоте  $f_r$  керамического элемента (рис.10.5Б). При соблюдении этого условия удастся реализовать лучшую чувствительность и эффективность элемента. При работе схемы в импульсном режиме для передачи и приема сигнала можно использовать один и тот же пьезопреобразователь. При непрерывном режиме работы необходимы два пьезоэлемента. - входное напряжение приводит к изгибу элемента, что вызывает генерацию ультразвуковых волн. И наоборот, в результате воздействия волн на выходе преобразователя появляется напряжение.. Часто на практике важно знать диаграмму направленности датчика. Чем уже диаграмма, тем выше чувствительность преобразователя.



А – схема генерации ультразвуковых волн ; Б – конструкция ультразвукового преобразователя.

Рис.10.5. Пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь

#### 10.4. Радарные датчики в мехатронных модулях движения автомобилей.

Для повышения безопасности автомобилей все шире применяются системы обнаружения препятствий, например, основанные на радарах.

Так как автомобильный рынок стремится использовать для обнаружения препятствий преимущества различных методов, в настоящий момент сравнительный анализ технологий активной безопасности весьма актуален.

Системы, основанные на видеокамерах, в автомобильных системах активной безопасности являются, пожалуй, доминирующей сенсорной технологией.

Видеокамеры позволяют выполнять многие функции систем помощи водителю (СПВ), оценивать скорость и расстояние до впереди идущего автомобиля, осуществлять мониторинг полосы и так далее, но их надежность ограничивается погодными условиями и условиями освещения.

Радары, или радарные системы позволяют обнаруживать, отслеживать объекты и обрабатывать изображения.

Основные области автомобильных применений радаров сконцентрированы в системах адаптивного круиз-контроля (АКК), где они выполняют функции обнаружения объектов и слежения — для предупреждения фронтальных аварий. Радарные системы миллиметрового диапазона, работающие в диапазоне 76-77 ГГц, с радарными дальнего диапазона (РДД), позволяют детектировать (обнаруживать и распознавать) объекты и определять расстояния в диапазоне 1-150 м с разрешением в 1 м, причем при оптимальном дизайне могут быть определены расстояние, относительная скорость и угол азимута.

Современные АСС основываются главным образом на радарных системах миллиметрового волнового диапазона (включающего диапазон 40-300 ГГц, 1-7,5 мм). АСС подразделяются на импульсные и непрерывного действия, с незатухающей гармонической волной. Последние, в свою очередь, также включают две основные группы: частотно модулированные и системы с рассеянным спектром.

Большинство радаров работает в микроволновом частотном диапазоне (200 МГц — 95 ГГц, длины волн 0,67 м — 3,16 мм).

АКК на основе радаров устанавливается в автомобили BMW серии 3, Volkswagen Passat, некоторые модели Mitsubishi, Mercedes-Benz, Toyota и др.

Радары 77 ГГц имеют апертурный угол порядка 10°. Следующее поколение полноскоростных АКК требует расширения угла наблюдения для повышения возможности обзора препятствий на различных расстояниях. С дополнительными датчиками на 24 ГГц АКК более пригодны для реализации функций регулирования жесткости амортизатора, предупреждения непреднамеренного ухода с полосы (ПНУП), ассистирования в удержании на полосе (АУП), помощи при смене полосы (ПСП), мониторинга «мертвых зон». Среди возможных частотных диапазонов для датчиков автоматического регулирования амортизатора выбрана частотная полоса от 24,00 до 24,25 ГГц.

Окончательная цель автомобильных систем активной безопасности, включая развитие радарных функций, — расширить обзор до 360°.

Радары 24 ГГц, работающие на коротких расстояниях (обычно до 20 м), могут быть использованы для систем предотвращения или смягчения аварий. Возможность избежания аварий будет важнейшей функцией электронных систем новых машин. Так, Mercedes-Benz S-класса оборудуются радаром 24 ГГц для жесткого торможения при неизбежной аварии.

Важнейшим преимуществом радаров является их значительная нечувствительность к погодным условиям, в отличие от лидаров и ультразвуковых датчиков, а также камер видимого и ИК-спектра.

Использование лазерных радаров (лидаров) представляет собой недорогую альтернативу стандартным микроволновым и миллиметровым радарным АКК. Например, лидары Heila KGaA Hueck & Co предлагают снижение стоимости системы АКК на 50%. Лидары устанавливают на свои автомобили, например, DaimlerChrysler, Toyota и Nissan.

Таким образом, преимущества радаров перед ультразвуковыми, оптическими, лазерными и тепловыми методами базируются на следующих особенностях:

- невидимый монтаж за непроводящими материалами;
- работа в любых погодных условиях;
- возможность работы в жестких автомобильных условиях;
- быстрое действие, возможность параллелизации измерений;
- малая интерференция с другими системами;

- практически полное отсутствие старения;
- высокая точность и надежность предоставляемой информации.

Тем временем японская компания Honda Motor видит в качестве альтернативы радарам, стереовидению и другим сенсорным технологиям 3-мерную технологию Electronic Perception Technology', разработанную Silicon Valley и внедренную Canesta Inc., и планирует применять ее во всех классах своих автомобилей. Фирма Honda за последние три года инвестировала значительные средства в разработку новых систем автомобильной безопасности на основе технологии ЕРТ. Применения ЕРТ включают обнаружение пассажиров, помощь при парковке, обнаружение пешеходов, избежание аварий.

Основными компонентами радара являются передатчик, антенна и приемник.

Основная задача радара — это обнаружение объекта в зоне действия радиосигнала, излучаемого передатчиком, при котором выход приемника в данное время соответствует эху, отраженному от объекта. Передатчик также содержит усилитель, который увеличивает мощность электромагнитного импульса, и антенну, которая транслирует электромагнитные волны. Радиоприемник получает отраженные от объекта электромагнитные волны посредством антенны, преобразуя их в ток. Для повышения надежности детектирования и отделения полезного сигнала от шумов в схеме обработки сигнала непрерывно выполняется сравнение амплитуды выхода приемника с некоторым установленным или адаптивно вычисляемым порогом. Время, за которое радиосигнал проходит путь до объекта и обратно, соответствует расстоянию  $2R$  и равняется  $2R/c$ , где  $c$  — скорость распространения электромагнитной волны (скорость света). Поскольку скорость света  $c$  практически неизменна в любой среде, очевидны преимущества радаров по точности в сравнении с ультразвуковыми датчиками.

После того как объект обнаружен, радар отслеживает его положение или скорость. Моностатический радар измеряет положение в сферической координатной системе с начальной точкой в фазовом центре антенны радара. Направление обзора антенны (называемое boresight direction) лежит вдоль оси  $X$ . Угол  $\theta$  называется углом азимута; для анализа положения используется также угол поворота  $\varphi$ , который зависит от ориентации антенны (рис.10.6). В большинстве современных систем АКК  $\varphi$  можно не учитывать.

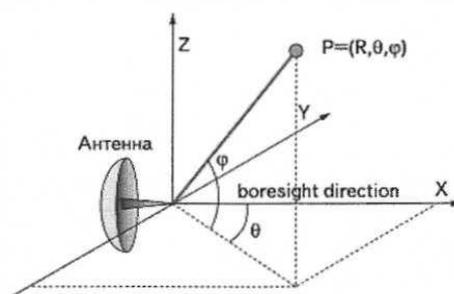


Рис.10.6. Сферическая координатная система для радарных измерений

Моностатическим называется радар, в котором антенны передатчика и приемника объединены (то есть используется одна и та же антенна). Радары данного типа составляют большинство современных устройств. В бистатическом радаре антенны передатчика и приемника разделены.

Угловое положение определяется путем анализа свойств отраженного волнового сигнала. Радар локализует положение цели за счет получения угла азимута относительно опорной линии или точки радарной антенны и расстояния range. Угол азимута цели определяется как угловое расстояние между опорной линией антенны (в направлении перпендикуляра от опорной точки антенны) и прямой, соединяющей опорную точку радарной антенны и апертурную точку цели. Расстояние до цели определяется как расстояние от антенной опорной точки до цели.

Хотя угол азимута и расстояние позволяют вычислить положение цели, возможны ошибки, возникающие вследствие изменений температуры и флуктуаций напряжения

волны. Процентная ошибка между вычисленным и фактическим расстоянием может составлять порядка 10-30%; для ее уменьшения в радарных системах используется калибровка.

Скорость оценивается посредством доплеровского смещения эха цели. Эффект Доплера состоит в изменении частоты и длины волн, регистрируемых ресивером, что вызвано относительным движением их источника (детектируемого объекта) или приемника. Когда радар и объект неподвижны, отраженный сигнал будет иметь ту же частоту, что и оригинальный сигнал, и несколько ослабленную амплитуду, то есть скорость, равную нулю, невозможно измерить. Когда детектируемый объект удаляется, второй сегмент сигнала проходит большее расстояние, чем первый сегмент, что растягивает волну, уменьшая ее частоту, длина волны при этом увеличивается. Если же объект приближается к условно неподвижному в выбранной системе отсчета ресиверу, второй сегмент волны проходит более короткое расстояние, что увеличивает частоту принятого сигнала, длина волны при этом уменьшается. Регистрируя изменения частоты, радар вычисляет радиальную составляющую скорости объекта, которой является проекция скорости на прямую, проходящую через объект и радар. Доплеровский метод обеспечивает измерение только радиальной составляющей скорости, но последовательность измерений положения и радиальной скорости позволяют сделать вывод о динамике объекта в трех измерениях.

Отличительная черта радарной системы — тип используемой техники модуляции для получения информации о расстоянии и скорости.

В дальнейшем, по мере увеличения числа автомобилей, оснащаемых радарными, интерференция будет возрастать, что предполагает в течение следующих нескольких лет повышенное внимание автопроизводителей к вопросу снижения уровней мощностей 24-гигагерцовых радаров. Дальнейшие перспективы автомобильных систем связываются с развитием 77-гигагерцовых радарных технологий. Прогноз развития мирового рынка автомобильной радарной технологии 77 Гц показан на рис.10.7.

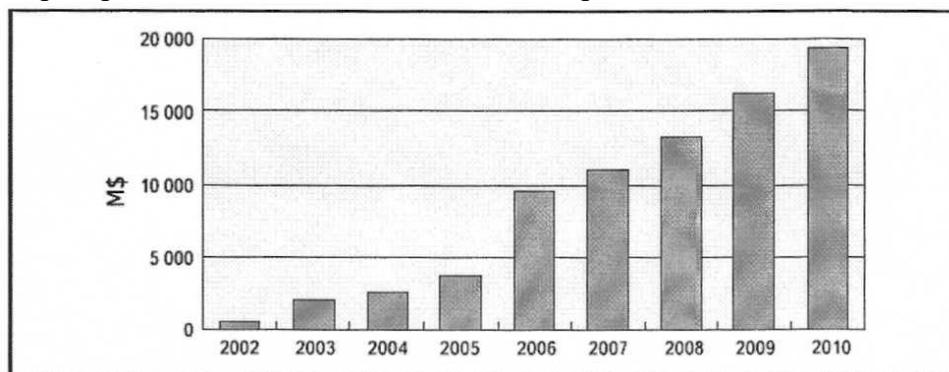


Рис.10.7. Прогноз развития мирового рынка автомобильной радарной технологии 77 Гц.

В качестве альтернативы 24-гигагерцовым автомобильным радарным системам компания Cambridge Consultants предлагает использовать 5,8-гигагерцовую систему, которая допускает область обзора в  $\pm 75^\circ$  с угловым разрешением порядка  $2^\circ$ , позволяя с одним датчиком измерять угол азимута и подъем (компания акцентирует внимание на 3В-функциональности системы). Тот же самый радар может работать с соответствующим программным обеспечением в различных режимах со скоростями сканирования 50-2000 Гц расстояния 2-32 м. Компания рекомендует использовать свои радарные датчики для фронтального и бокового обзора, мониторинга «мертвых зон» и помощи при парковке.

Технология компании Cambridge Consultants может снижать число датчиков, требуемых для мониторинга области вокруг автомобиля, только до четырех (в сравнении с предложениями 8-сенсорных систем). Типичные размеры антенн — порядка  $80 \times 120$  мм, сравнимые с размерами 24-гигагерцовых устройств.

Радарные сигналы от работающей системы всегда определяют расстояние между объектами во фронте автомобиля и относительную скорость и служат для предупреждения водителя об опасных ситуациях посредством только визуальных и звуковых сигналов (без воспроизведения видеоданных).

Из приведенного анализа следует, что радарная технология имеет значительные преимущества по сравнению с другими конкурирующими технологиями — такими как видеокамеры, инфракрасные детекторы и ультразвуковые датчики (в воздушной среде).

Радарная система — многообещающая технология при условии снижения ее цены до уровней, приемлемых для массового производства систем автоэлектроники. Поэтому для автоматической системы регулирования жесткости амортизаторов мембранного типа сигналы изменения качества дороги лучше всего считать с помощью радарных датчиков.

#### 10.5 Датчики, работающие на эффекте Холла.

Во многих датчиках, используемых в мехатронных системах, используется эффект Холла.

Холл открыл это физическое явление в 1879 году. Первоначально этот эффект применялся для изучения электропроводности металлов, полупроводников и других токопроводящих материалов. В настоящее время датчики Холла используются для обнаружения магнитных полей и определения положения и перемещения объектов.

Эффект Холла основан на взаимодействии между движущимися носителями электрического заряда и внешним магнитным полем. В металлах носителями зарядов являются электроны. При движении электронов в магнитном поле на них действует отклоняющая сила:

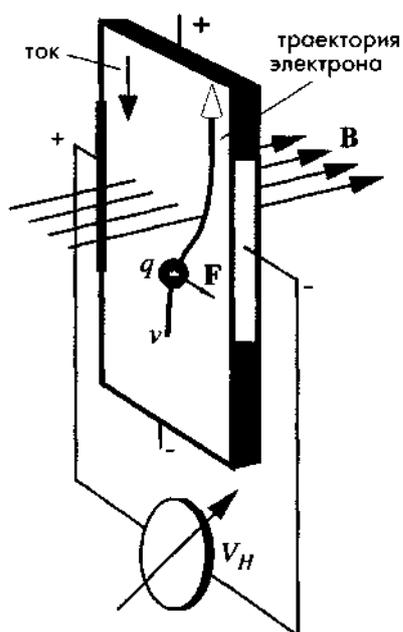


Рис. 10.8. Датчик Холла. Магнитное поле отклоняет движущийся электрический заряд  $F = qvB$

где  $q = 1,6 \cdot 10^{19}$  Кл — величина заряда электрона,  $v$  — его скорость, а  $\mathbf{B}$  — магнитная индукция. Выделенный шрифт указывает на то, что  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{B}$  являются векторами. Направление силы и ее величина зависят от пространственного расположения магнитного потока и направления движения электрона. Единицей измерения  $\mathbf{B}$  является тесла: 1 Тесла = 1 Ньютон/(амперметр) =  $10^4$  Гаусс.

Предположим, что электроны двигаются внутри электропроводной пластины, помещенной в магнитное поле  $\mathbf{B}$  (рис. 10.8). На две стороны пластины нанесены дополнительные электроды, подключенные к вольтметру. Еще два электрода расположены сверху и снизу пластины, они подсоединены к источнику электрического

тока. Из-за действия внешнего магнитного поля возникает отклоняющая сила, смещающая электроны ближе к правому краю пластины, поэтому эта сторона становится более отрицательно заряженной, чем левая. Очевидно, что вследствие взаимодействия магнитного поля и электрического тока возникает *поперечная разность потенциалов*, получившая название *напряжение Холла*  $V_H$ . Знак и амплитуда этого напряжения зависят как от величины, так и направления магнитного и электрического полей. При фиксированной температуре оно определяется выражением:

$$V_H = h i B \sin \alpha$$

где  $\alpha$  — угол между вектором магнитного поля и плоскостью пластины Холла (рис. 10.9), а  $h$  — полная чувствительность датчика, на значение которой влияют тип материала пластины, ее геометрия (площадь активной зоны) и температура.

Полная чувствительность датчика Холла зависит от коэффициента Холла, который определяется градиентом поперечного электрического потенциала на единицу интенсивности магнитного поля и на единицу плотности тока. В соответствии с теорией свободных электронов в металлах, коэффициент Холла можно найти при помощи выражения:

$$H = \frac{1}{N e c}$$

где  $N$  — число свободных электронов в единице объема, а  $c$  — скорость света. В зависимости от кристаллической структуры материала заряды могут быть либо электронами (отрицательными), либо дырками (положительными). Поэтому и эффект Холла бывает либо положительным, либо отрицательным

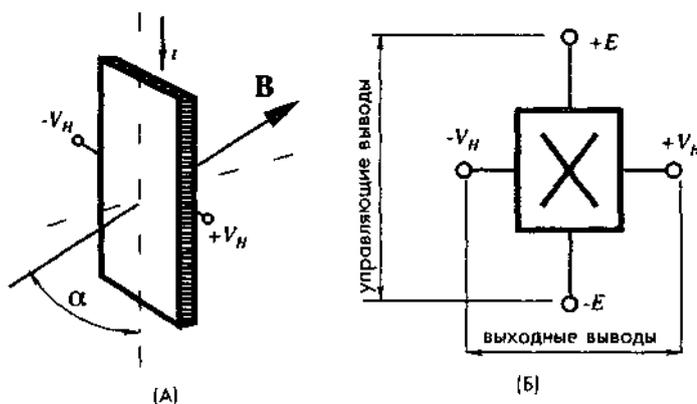


Рис. 10.9. А — выходной сигнал датчика Холла зависит от угла между вектором магнитного поля и плоскостью пластины, Б — четыре вывода датчика Холла

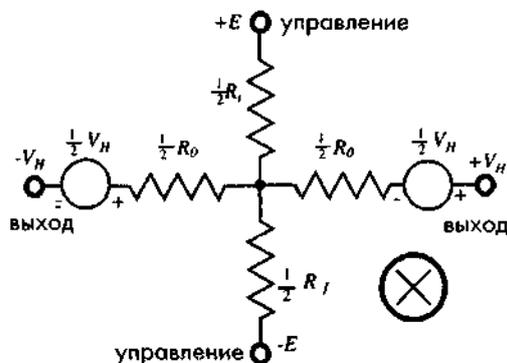


Рис. 10.10. Эквивалентная схема датчика Холла

Линейный датчик Холла обычно размещается в корпусе с четырьмя выводами. Два вывода для подключения тока управления называются управляющими выводами, а

сопротивление между ними — сопротивлением управляющей цепи  $R$ . Выводы для измерения выходного напряжения называются дифференциальными выходами, а сопротивление между ними — выходным дифференциальным сопротивлением  $R_0$ . Эквивалентную схему датчика Холла (рис. 10.10) можно представить в виде узлового соединения 4-х резисторов и двух источников напряжения, включенных последовательно с выходными выводами. Знак  $\otimes$  на рис. 10.9Б и 10.10 указывает на то, что вектор  $B$  направлен от наблюдателя.

Датчик характеризуется следующими параметрами: сопротивлениями  $R_i$  и  $R_o$ , напряжением смещения при отсутствии магнитного поля, чувствительностью и температурным коэффициентом чувствительности.

Большинство датчиков Холла изготавливаются из кремния, и их можно разделить на две основные категории: простые и интегрированные. Для построения чувствительных элементов на основе эффекта Холла применяются InSb, InAs, Ge и GaAs. Кремниевые сенсоры могут быть интегрированы на одной подложке с интерфейсными электронными схемами. Такая интеграция особенно важна при построении прецизионных датчиков, поскольку напряжение Холла обычно довольно мало. В таблице 10.2 приведены основные характеристики простого кремниевого линейного датчика Холла UGN-3605K, выпускаемого компанией Sprague.

Таблица 10.2

Типовые характеристики линейного датчика Холла

Управляющий ток	3 мА
Сопротивление управляющей цепи	2,2 кОм
Температурный коэффициент чувствительности сопротивления управляющей цепи	+0,8%/°C
Дифференциальное выходное сопротивление	4,4 кОм
Выходное напряжение смещения	5,0 мВ (при $B = 0$ Гс)
Чувствительность	60 мкВ/Гс
Температурный коэффициент чувствительности	+0,1%/°C
Полная чувствительность	20 В/(Ом·кГс)
Максимальная плотность магнитного потока	ограничений нет

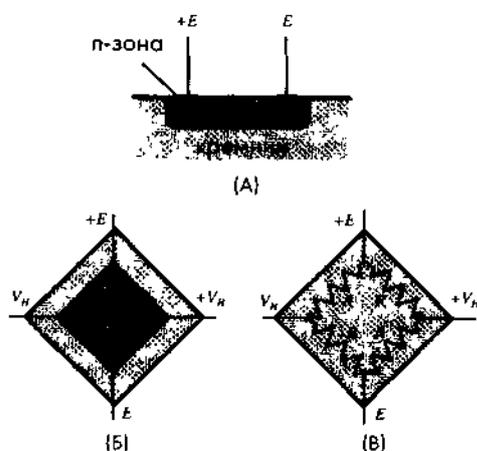


Рис. 10.11. А и Б — кремниевый датчик Холла с  $n$ -зоной, В — его эквивалентная схема в виде резистивного моста.

Встроенная интерфейсная схема может иметь в своем составе пороговый детектор, превращающий датчик в устройство с двумя положениями: его выходной сигнал будет равен нулю, когда магнитное поле ниже порогового значения, и единице — когда плотность магнитного потока становится значительной.

Поскольку кремний обладает пьезорезистивными свойствами, датчики, реализованные на его основе, реагируют на механические напряжения, поэтому необходимо минимизировать нагрузки на корпус датчика и на подводящие провода. Датчики Холла также являются чувствительными к колебаниям температуры, приводят к изменению сопротивления сенсорных элементов. Если чувствительный элемент подключен к источнику напряжения, изменения температуры будут влиять на значение сопротивления, а, следовательно, и на ток в цепи управления.

Поэтому предпочтительнее управляющие выводы подключать к источнику тока, а не источнику напряжения.

На рис. 10.11А приведена схема датчика Холла, реализованного на кремниевой подложке *p*-типа с зоной *n*-типа, полученной методом ионной имплантации. Электрические контакты обеспечивают подсоединение к источнику питания и формируют выходные выводы датчика. Элемент Холла представляет собой квадрат с углублением с четырьмя электродами, включенными по диагоналям (рис. 10.11Б). На рис. 10.11В приведена его эквивалентная схема в виде резистивного моста. Поскольку мосты являются самыми популярными электрическими цепями с хорошо проработанными методами расчета, они чаще всего используются на практике.

#### 10.6 Электронный блок управления (ЭБУ)

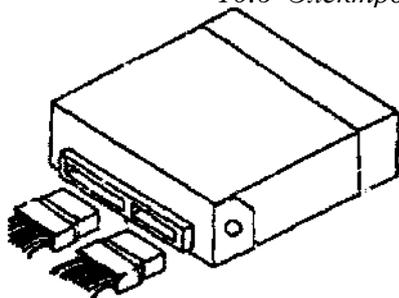


Рис.10.12. Внешний вид ЭБУ.

Электронный блок управления (ЭБУ) расположен за панелью обивки с правой стороны салона автомобиля (Рис.10.12). ЭБУ является основным элементом системы впрыска топлива. ЭБУ постоянно получает сигналы от различных датчиков и осуществляет управление важнейшими системами и узлами двигателя. Кроме того, ЭБУ выполняет функции диагностики неисправностей систем и узлов двигателя. При обнаружении какой-либо неисправности ЭБУ включает сигнализатор "Требуется техобслуживание двигателя", определяет и заносит в память соответствующий код (коды) неисправности. Это облегчает в дальнейшем проведение диагностики отказов. На автомобиль установлен ЭБУ типа IEFI-6. При отказе ЭБУ заменяется в сборе, поскольку не содержит ремонтпригодных элементов. Параметры и алгоритмы управления хранятся в стираемом программируемом постоянном запоминающем устройстве (СППЗУ). Вариант программы, записанной в ПЗУ, обозначен номером ЭБУ, который соответствует идентификационному номеру автомобиля.

ЭБУ осуществляет питание различных датчиков и выключателей постоянным напряжением 5 и 12 В. Электрические цепи ЭБУ обладают высоким сопротивлением, поэтому при соединении клемм питания с контрольной лампой последняя не горит.

Для точного измерения напряжения питания следует применять цифровой вольтметр с высоким полным сопротивлением (10 МОм). ЭБУ управляет работой топливных форсунок, клапаном холостого хода, сцеплением компрессора и т. д. с помощью специальных электронных устройств (4-х канальных драйверов), предназначенных для обработки выходных управляющих сигналов ЭБУ.

ЭБУ выполнен необслуживаемым. Поэтому при отказе ЭБУ он подлежит замене в сборе.

Контроль за работой узлов автомобиля осуществляют датчики, соединенные с ЭБУ. Краткое описание некоторых датчиков приведем ниже.

#### 10.6.1 Датчик температуры охлаждающей жидкости

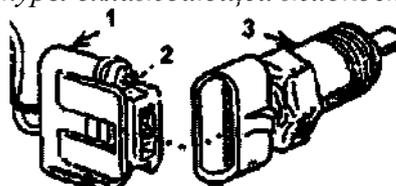


Рис. 10.13. Конструкция датчика температуры.

Датчик температуры охлаждающей жидкости показан на Рис. 10.13. Он содержит электрический разъем 1, лапку фиксатор 2 и корпус 3. Датчик температуры жидкости. ДТЖ установлен в системе охлаждения двигателя. В ДТЖ используется термистор, который изменяет электрическое сопротивление в зависимости от температуры. При низкой температуре охлаждающей жидкости ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) сопротивление термистора составляет около 100 кОм, а при высокой температуре ( $130^{\circ}\text{C}$ ) – только 70 Ом. ЭБУ питает сеть ДТЖ постоянным опорным напряжением через последовательно включенное сопротивление. Напряжение сигнала ДТЖ велико, когда двигатель холодный и уменьшается по мере прогрева двигателя. По напряжению сигнала ДТЖ ЭБУ определяет температуру двигателя, которая учитывается при управлении многими системами и узлами двигателя. При отказе цепи ДТЖ ЭБУ устанавливает код неисправности (14) и записывает его в память. Для устранения отказа необходимо провести диагностику и отремонтировать проводку или заменить датчик.

#### 10.6.2 Датчик температуры воздуха во впускном коллекторе (ДТВ).

В ДТВ используется термистор, который изменяет электрическое сопротивление в зависимости от температуры. При низкой температуре воздуха ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) сопротивление термистора составляет около 100 кОм, а при высокой температуре ( $130^{\circ}\text{C}$ ) - только 70 Ом. ЭБУ питает цепь ДТВ постоянным опорным напряжением через последовательно включенное сопротивление. Напряжение сигнала ДТВ достаточно велико.

#### 10.6.3. Датчик концентрации кислорода в отработавших газах (ДКК)

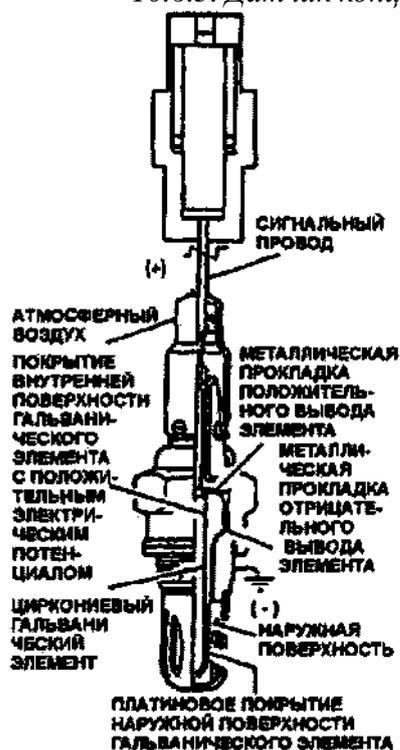


Рис.10.14. Датчик концентрации кислорода в отработавших газах.

ДКК установлен в выпускном трубопроводе и омывается потоком отработавших газов. В зависимости от содержания кислорода в отработавших газах изменяется напряжение сигнала датчика. Напряжение сигнала может изменяться от 0,1 В при высоком содержании кислорода.

#### 10.6.4. Датчик положения дроссельной заслонки (ДДЗ)

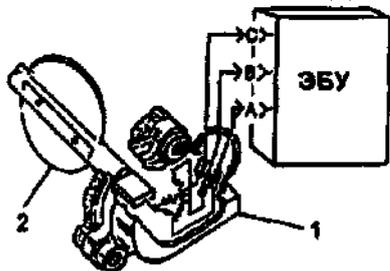


Рис.10.15. Схема датчика положения дроссельной заслонки.

1- датчик положения дроссельной заслонки. 2- дроссельная заслонка ДДЗ представляет собой потенциометр, который установлен в корпусе дроссельной заслонки и связан с ее осью. Проводка ДДЗ включает в себя провод питания с напряжением 5 В, "массовый" и сигнальный провода.

#### 10.6.5. Датчик абсолютного давления во впускном трубопроводе (ДАД).

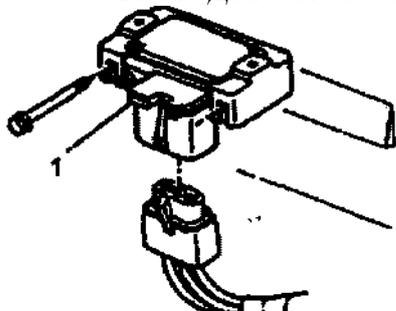


Рис.10.16. Датчик абсолютного давления во впускном трубопроводе (ДАД).

1- датчик абсолютного давления во впускном трубопроводе, ДАД предназначен для преобразования давления во впускном трубопроводе, которое зависит от нагрузки двигателя и частоты вращения коленчатого вала, в электрическое напряжение.

#### 10.6.6. Датчик скорости автомобиля (ДСА)

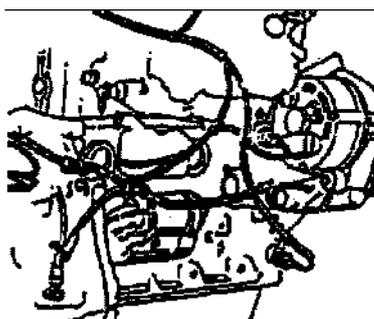


Рис.10.17. Схема датчика скорости автомобиля.

Датчик скорости автомобиля ДСА посылает в ЭБУ сигнал переменного напряжения, который преобразуется в скорость в единицах км/ч. Имеется несколько типов ДСА.

#### 10.6.7. Датчик включения системы кондиционирования воздуха

Датчик подает на вход ЭБУ сигнал при нажатии на кнопку А/С. При получении этого сигнала ЭБУ корректирует режим холостого хода двигателя прежде, чем включит сцепление компрессора. При отсутствии сигнала компрессор не включается.

#### 10.6.8. Автомобильные видеодатчики.

Большинство автомобильных видеодатчиков, или неизлучающих датчиков изображений, имеют в своей основе принцип действия, применяемый в цифровых фотоаппаратах, камерах

сотовых телефонов, видеокамерах или камкордерах. Как известно, цветная цифровая видеотехнология с мегапиксельным разрешением в настоящее время доступна по цене и привлекательна для многих автомобильных применений.

В отличие от обычных видеокамер и камер фотоаппаратов, к автомобильным видеодатчикам предъявляются очень жесткие требования:

- способность функционировать в различных условиях освещенности;
- обеспечение высокой надежности работы и гарантия дорожной безопасности в соответствии с автомобильными стандартами;
- обеспечение стандартизированных показателей динамического диапазона, чувствительности, спектральной полосы;
- автоматическое распознавание объектов в любых условиях сцены: освещенности, скорости движения объекта;
- высокий показатель частоты смены кадров;
- малое энергопотребление и включение схем отвода тепла при нагреве камеры вследствие рассеяния мощности — для повышения срока службы камеры и уменьшения температурных шумов пикселей;
- стоимостная эффективность, доступность элементной базы в массовых объемах по низкой цене.

К важнейшим характеристикам автомобильных камер относятся:

- оптический формат — физические размеры фоточувствительной матрицы, выражаемые в долях дюйма ( $1/4, 1/3$ );
- разрешение — количество элементов матрицы, выражаемое численно по числу горизонтальных/вертикальных пикселей или их общему числу в мегапикселях.

Чем больше оптический формат ( $1/3 > 1/4$ ), тем больший участок захватывает видеодатчик и тем меньше при прочих равных условиях геометрические искажения изображения, но камеры формата  $1/4$  являются более миниатюрными. Чем выше разрешение, то есть чем больше элементов матрицы задействовано в формировании изображения, тем выше качество изображения (четкость и чувствительность). В любой камере часть пикселей остается пассивной, поэтому при анализе чувствительности учитывается количество ее активных пикселей. Другие важные показатели в спецификации видеодатчиков.

- Светочувствительная область в мм,
- Размер пикселей в мкм.

Эти параметры определяют заполнение светочувствительной области пикселями и в дальнейшем характеризуют эффективность сбора света, или чувствительность. Меньшие по размеру пиксели, скомпонованные в матрице более плотно, обеспечивают более высокое разрешение изображения.

- Фактор заполнения пикселя — отношение светочувствительной области к общему размеру пикселя (характеризует заполнение пикселей, в которые встраиваются транзисторы).

Фактор заполнения, по сути, определяет долю площади микросхемы, чувствительной к свету. Для устранения малого фактора заполнения многие датчики оснащаются массивом микролинз. Большие размеры пикселей и повышенный фактор заполнения увеличивают чувствительность датчика. Большой пиксель, в сравнении с меньшим, произведенный по той же технологии, будет характеризоваться и меньшими шумами.

- Частота смены кадров — число кадров в секунду, воспринимаемое камерой, — важнейший показатель скорости работы в динамических условиях окружающей среды: съемки объектов, движущихся с высокой скоростью.
- Скорость передачи данных в мегапикселях за секунду (Мп/с).

Скорость обработки данных, или рабочая тактовая частота (порядка 27 МГц), или частота входной синхронизации — привязки видеосигнала к фазе напряжения внешнего источника синхроимпульсов или другого видеосигнала.

Динамический диапазон сцены — это отношение наиболее высокой интенсивности света к наименьшей. В диапазоне от освещения лунной ночи до яркого солнечного света диапазон сцены составляет 120 дБ.

Желаемый динамический диапазон автомобильных видеодатчиков — соотношение между самой темной и самой яркой областью сцены, которую датчик может захватить одновременно — также составляет 120 дБ (компания Omron заявляет в спецификации камеры HDRС динамический диапазон даже в 170 дБ), но, в зависимости от применения, для автомобильных камер с высокими рабочими характеристиками он может быть и меньшим — порядка 72 дБ. Если динамический диапазон камеры недостаточно широк в сравнении с динамическим диапазоном сцены, изображение будет терять детали на темных областях и насыщаться в ярких областях, что может повлиять на безопасность.

Чувствительность камеры определяется эффективностью работы матрицы (сбора света и преобразования фотонов в электроны) — соотношением выходного фототока и энергии воздействующего света (монохроматическая чувствительность на определенной длине волны), выходного фототока и светового потока (интегральная чувствительность), а также шумовым порогом обнаружения фотонов. Главным фактором, ограничивающим порог чувствительности, является темновой ток — ток пикселя в анодной цепи фотоэлемента, возникающий без влияния освещения катодной части вследствие термоэлектронной эмиссии; второй наиболее значимый фактор — тепловой (или термический) шум. В связи с технологией производства даже в пределах каждого пикселя уровни темнового тока и теплового шума различаются.

Помимо рабочей температуры, важным показателем видеодатчиков для эксплуатации в автомобильных условиях является их корпусирование — соответствие квалификационному стандарту Automobile Electronics Council (AEC Q100), работающих в жестких условиях эксплуатации.

## 11. Примеры интеллектуальных мехатронных модулей

Одним из первых интеллектуальных мехатронных модулей является модуль SmartMotor американской фирмы Animatics Corp., который появился на рынке в 1994 году.

Он создан на базе стандартного электродвигателя диаметром 60 мм, в задней части корпуса которого дополнительно были установлены фотоимпульсный датчик, усилитель, 32-битовый программируемый контроллер и устройство связи с сетью. Модуль является универсальным, может быть использован в мехатронных системах различного назначения. Производитель подчеркивает, что на 70% модуль состоит из стандартных элементов, что позволило снизить его стоимость и обеспечить высокую надежность. Пользователь может самостоятельно выбрать режим управления (по положению, скорости или ускорению), а также использовать алгоритмы компьютерного управления, компенсирующие влияние люфта в преобразователях движения на динамические характеристики модуля.

Фирма SIEMENS выпускает интеллектуальные мехатронные модули SIMODRIVE POSMO A (рис. 11.1), состоящие из следующих элементов:

- вентильного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов;
  - планетарного (рис. 11.1,а) или червячного (рис. 11.1,б) преобразователя движения (может отсутствовать (рис. 11.1, в));
- тормозного устройства (может отсутствовать);
- встроенного фотоимпульсного датчика (ФИД);
  - силового преобразователя, который конструктивно закрепляется на крышке двигателя;
  - комплектного управляющего устройства, включающего регулятор двигателя, блоки позиционирования и программирования, а также коммуникационный интерфейс для подключения в среде PROFIBUS.

Отличительной особенностью конструкции является съёмная крышка для подключения силового преобразователя, которая содержит интегрированный переключатель адреса шины PROFIBUS и тормозной резистор, что позволяет при необходимости отключить двигатель без разрыва коммуникационных и силовых (по питанию) связей в других устройствах. Благодаря объединению коммуникационной и силовой шин достигается упрощение внутренней структуры модуля и обеспечивается его компактность.

Управление модулем осуществляют по стандартной шине PROFIBUS, при этом возможны следующие режимы движения:

- перемещение в конечную позицию с программно заданной скоростью и регулируемым ускорением;
- движение с регулируемой частотой вращения вала и регулируемым ускорением.

Оператор с помощью специального программного обеспечения может задавать в программе движения временные или логические условия, использовать методы компенсации зазора (люфта), получать сообщения о текущем положении и диагностике состояния модуля.

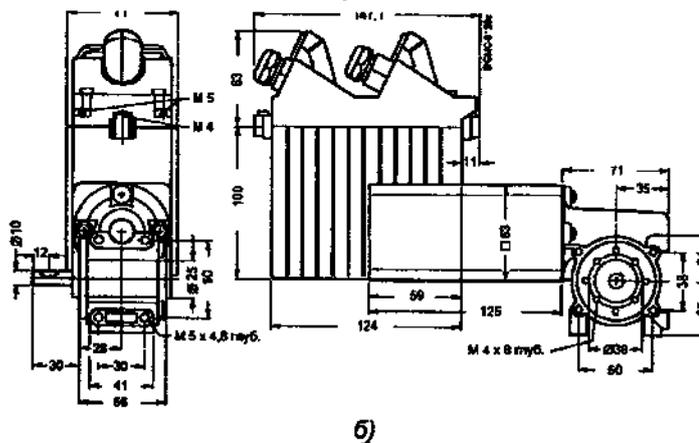
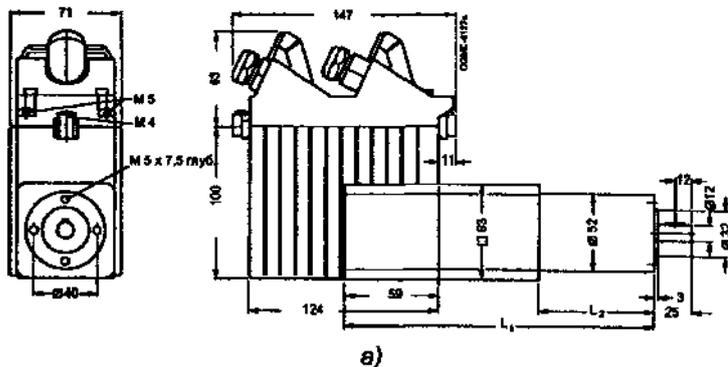
Технические данные некоторых модулей SIMODRIVE POSMO A приведены в табл. 11.1.

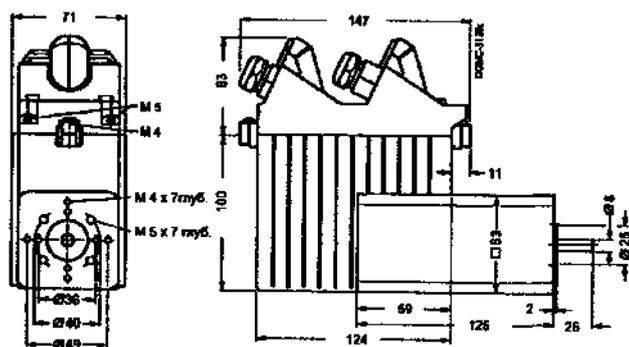
Таблица 11.1

Технические характеристики интеллектуальных мехатронных модулей SIMODRIVE POSMO A

Тип модуля	75 Ватт	300 Ватт
Напряжение питания U,В	24	48
Тип двигателя	С возбуждением бесщеточный серводвигатель от постоянных магнитов	
Номинальное частота вра-	3300; 2000	3500; 3000

ращения вала двигателя $n_n$ , об/мин		
Номинальный момент двигателя $T_n$ , Н·м	0,18; 0,36	0,48; 0,95
Номинальный ток двигателя I.A	4,5; 9	5; 10
КПД двигателя $\eta$ , %	65	75
Момент инерции двигателя, $J_d$ , кг·м <sup>2</sup>	$6 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$
Датчик обратной связи	инкрементальный	инкрементальный
Разрешение датчика, инкр/об	816	4096
Масса модуля т, кг: без редуктора с 1-ступенчатым зубчатым редуктором с 2-ступенчатым зубчатым редуктором с 3-ступенчатым зубчатым редуктором с червячным редуктором	3,1 3,5 3,7 3,9 3,5	3,9 (4,0) 5,1 (5,2) 5,4 (5,5)
Примечание. Значения в скобках — масса модуля с тормозом		





а)

Рис. 11.1. Интеллектуальный мехатронный модуль SIMODRIVE POSMO A. Интеллектуальный мехатронный модуль SIMODRIVE POSMO SI фирмы SIEMENS (рис. 11.2) предназначен для реализации движений по одной управляемой координате при децентрализованном управлении мехатронной системой.

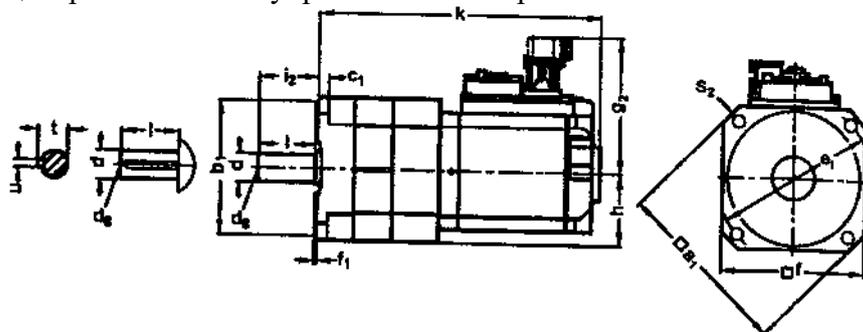


Рис. 11.2. Интеллектуальный мехатронный модуль SIMODRIVE POSMO SI.

В состав модуля входят следующие элементы:

- вентильный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов (напряжение питания 600 В);
- преобразователь движения и тормозное устройство;
- блок силовой электроники;
- встроенный фотоимпульсный датчик (ФИД);
- вентилятор для принудительного охлаждения;
- управляющее устройство, включающее управляющий контроллер, блоки позиционирования и программирования, а также коммуникационный интерфейс для шины PROFIBUS.

Геометрические параметры и технические характеристики интеллектуального мехатронного модуля SIMODRIVE POSMO SI приведены в табл. 11.2 и 11.3 соответственно.

Таблица 11.2

Геометрические параметры интеллектуального мехатронного модуля SIMODRIVE POSMO SI

Двигатель		Геометрические параметры															
Тип	Размер	a1	b1	c1	e1	f	f1	q2		h1	i2	k	Dв	d	I	t	u
								Штекер прямой	Штекер угловой								
6SN2463	63	133	110	10	130	126	35	179	174,8	62	50	349	24	M8	45	27	8
6SN246	80	18	13	10	16	15	3,	193,5	198,3	77,5	35	35	3	M	5	3	10

3		6	0	3	5	5	5			5	8	7 39 5	2	12	0	6	
6SN250 0	100	24 0	18 0	1 3	21 5	19 2	4	194	189,8	9 6	8 0	37 9	3 8	M 12	7 5	4 1	10

Таблица 11.3

Технические характеристики интеллектуального мехатронного модуля SIMODRIVE  
**POSMO SI**

Тип двигателя	Номинальная мощность P, кВт	Номинальная частота вращения n <sub>n</sub> , об/мин	Номинальный момент T <sub>n</sub> , Нм	Момент инерции ротора без/с тормозом Jд-КН, кгм <sup>2</sup>	Номинальный ток I, А	Номинальное напряжение питания U, В	Масса без тормоза/с тормозом T, кг
1FK6	2,1 3,7 2,8 5,3 6	3000	4,0 6,0 6,8 10,5 12	8,6/9,5 16,1/17,0 15,0/18,0 27,3/30,3 55,3/63,2	3 5,2 3,9 7,4 8,2	600	12,0/12,5 16,3/16,8 16,3/17,8 21,0/22,5 23,9/26,3

Функциональные возможности модуля:

- позиционирование по одной оси с возможностью свободного программирования последовательности движений;
- использование в качестве ведомого устройства (Slave) в сети PROFIBUS-DP с быстрым циклическим обменом данными с ведущим устройством (Master);
- интерполяционный вид движения совместно с другими приводами благодаря иерархической системе управления с контроллером движения и шиной PROFIBUS-DP;
- встроенная система измерения абсолютных значений перемещений;
  - быстрый ввод в эксплуатацию всех приводов на шине PROFIBUS-DP благодаря специальной программе SimoCom U, работающей под Windows 95/98/NT.

Фирма SIEMENS, производитель данных модулей, отмечает их следующие достоинства:

- минимизация затрат потребителя на стойку управления благодаря размещению модуля непосредственно в машине;
- быстрая установка машины благодаря установке модуля и объединению коммуникационных и силовых шин;
- непосредственное подключение сигналов с помощью 4 клемм, которые настраиваются как входы или выходы, установка модульной, удобной для использования, штекерной техники и стандартных кабелей;
- вставляемая крышка подключений с интегрированным переключателем адреса PROFIBUS-DP позволяет отключать модуль или приводной контур без прерывания других связей;
- быстрая диагностика благодаря светодиодам, показывающим неисправность и готовность к работе, а также передачи информации по шине PROFIBUS-DP и использованию специальной программы SimoCom U;
- быстрая замена модулей с помощью карты памяти (Memory Card).

## 12. Энергетический расчет универсального мехатронного модуля

### 12.1. Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при незначительных динамических нагрузках

Рассмотрим методику расчета универсального мехатронного модуля при незначительных динамических нагрузках, когда силы инерции нагрузки значительно меньше внешних сил, действующих на ММ. В этом случае основными исходными данными являются:

- структурная схема мехатронного модуля;
- приложенная внешняя нагрузка  $M_H$  (осевая сила  $F_H$  или вращающий момент  $T_H$ );
- требуемая скорость  $\Omega_{\text{вых}}$  (линейная  $v_{\text{вых}}$  или угловая  $w_{\text{вых}}$ ) выходного звена мехатронного модуля.

Для мехатронного модуля поступательного движения требуемую мощность электродвигателя, Вт, определяют по формуле:

$$P = \frac{F_H \cdot v_{\text{вых}}}{\eta} K_{\text{дин}} \quad (12.1)$$

где  $F_H$  — усилие сопротивления на выходном звене мехатронного модуля, Н;  $v_{\text{вых}}$  — линейная скорость выходного звена мехатронного модуля, м/с;  $\eta$  — коэффициент полезного действия мехатронного модуля;  $K_{\text{дин}} = 1,1 \dots 1,3$  — коэффициент запаса, учитывающий влияние динамических нагрузок в период разгона и торможения.

Для мехатронного модуля вращательного движения требуемую мощность электродвигателя, Вт, определяют:

$$P = T_H \frac{w_{\text{вых}}}{\eta} K_{\text{дин}} \quad (12.2)$$

или

$$P = T_H \frac{w_{\text{вых}}}{9,55 \cdot \eta} K_{\text{дин}}$$

где  $T_H$  — момент сопротивления на выходном звене мехатронного модуля, Нм;  $w_{\text{вых}}$  — угловая скорость выходного звена мехатронного модуля,  $\text{с}^{-1}$ ;  $n$  — частота вращения выходного звена мехатронного модуля, об/мин.

Так как электродвигатели одной и той же мощности имеют разные номинальные вращающие моменты  $T_{\text{ном}}$ , то необходимо определить требуемый момент двигателя, Нм:

$$T_{\text{д.тр.}} = \frac{T_H}{u \cdot \eta} \quad (12.3)$$

где  $u$  — передаточное отношение преобразователя движения (см. п. 12.3).

Окончательно тип электродвигателя выбирают по каталогам исходя из условий:

$$\left\{ P_{\text{д}} \geq P \quad (12.4) \right.$$

$$\left. T_{\text{ном}} \geq T_{\text{д.тр.}} \quad (12.5) \right.$$

Предварительный выбор вентильного бесконтактного моментного электродвигателя серии ДБМ осуществляют для мехатронного модуля без преобразователя движения по пусковому моменту  $T_p$ , равному статическому синхронизирующему моменту  $T_c$  (табл. 12.1), для мехатронного модуля с преобразователем движения по приведенной выше методике.

Т а б л и ц а 12.1

Технические характеристики и геометрические параметры электродвигателей серии ДБМ

Тип двигателя	Номинальный момент $T_n$ , Нм	Статический синхронный момент $T_{ст}$ , Нм	Частота вращения холостого хода $n_{хх}$ , об/мин	Пусковой ток фазы I, А	Предельный ток обмотки статора $I_m$ , А	Момент инерции ротора $J_{р}$ , кгм <sup>2</sup>	Длина L, мм	Диаметр корпуса D, мм	Диаметр вала d, мм	Масса m, кг
Статор пазовый										
ДБМ50-0,04-2-2	0,04	0,080	2440	0,84	5	0,0055	30	50	12	0,2
ДБМ50-0,04-4-2	0,04	0,157	4880	3,25	10	0,0055	30	50	12	0,2
ДБМ70-0,16-1-2	0,16	0,39	987	1,62	10	0,07	34	70	23	0,35
ДБМ70-0,16-2-2	0,16	0,77	1975	6,38	20	0,07	34	70	23	0,35
ДБМ100-0,4-0,6-2	0,4	0,84	690	2,45	15	0,27	33	100	48	0,6
ДБМ100-0,4-1,2-2	0,4	1,67	1390	9,80	30	0,27	33	100	48	0,6
ДБМ120-1-0,2-2	1	1,19	240	1,25	12,5	1,0	42	120	60	1,3
ДБМ120-1-0,4-2	1	2,38	485	5,00	25	1,0	42	120	60	1,3
ДБМ120-1-0,8-2	1	4,47	970	18,00	50	1,0	42	120	60	1,3
ДБМ120-1,6-0,4-3	1,6	4,2	473	8,1	45	1,5	52	120	60	1,8
ДБМ150-4-0,3-2	4	6,7	323	9,6	60	3,0	55	150	72	3,0
ДБМ150-4-0,6-2	4	13,1	646	37,5	120	3,0	55	150	72	3,0
ДБМ150-4-1,5-3	4	47,3	1750	32,0	320	3,0	55	150	72	3,0
ДБМ 185-6-0,2-2	6	11,5	195	10,2	60	9,0	60	185	66	5,4
ДБМ 185-6-0,4-2	6	23,1	390	41,0	120	9,0	60	185	66	5,4
ДБМ185-16-0,15-2	16	28,0	143	18,4	110	15	85	185	66	9,2
ДБМ185-16-0,3-2	16	56,0	286	73,8	220	15	85	185	66	9,2
Статор гладкий										
ДБМ40-0,01-4,5-3	0,01	0,026	4570	0,48	1,25	0,0055	26	40	12	0,12
ДБМ40-0,01-9-3	0,01	0,051	9150	1,93	2,5	0,0055	26	40	12	0,12
ДБМ63-0,06-3-2	0,06	0,13	2950	1,63	10	0,07	28	63	23	0,32
ДБМ85-0,16-2-2	0,16	0,305	2040	2,70	20	0,27	36	85	48	0,54
ДБМ85-0,16-2-3	0,16	0,36	1900	2,70	7,5	0,27	36	85	48	0,54
ДБМ105-0,4-0,75-3	0,4	0,92	965	3,46	9,0	1,0	38	105	60	0,98
ДБМ105-0,6-1-2	0,6	1,62	917	6,30	30	1,5	46	105	60	1,3
ДБМ105-0,6-0,5-3	0,6	1,17	600	2,70	8,75	1,5	46	105	60	1
ДБМ130-1,6-0,5-2	1,6	1,74	457	3,37	40	3,0	54	130	72	2,5

Для мехатронных модулей, работающих в повторно-кратковременном режиме должна быть задана циклограмма нагружения (рис.12.1).

В этом случае учитывая, что время их разгона и торможения значительно меньше времени установившегося движения, можно определить значение требуемой среднеквадратичной статической мощности, приведенной к валу двигателя, Вт:

$$P_C = \frac{\sqrt{\sum_{K=1}^n \left( P_{CK} \cdot \frac{W_{НОМ}}{W_{PK}} \right)^2} \cdot t_{PK}^2}{\sum_{K=1}^n \beta_{wk} \cdot t_{PK}} \cdot K_{дин} \quad (12.6)$$

где  $P_{CK}$  — требуемая статическая мощность двигателя на  $K$ -м рабочем участке нагрузочной циклограммы двигателя, Вт.

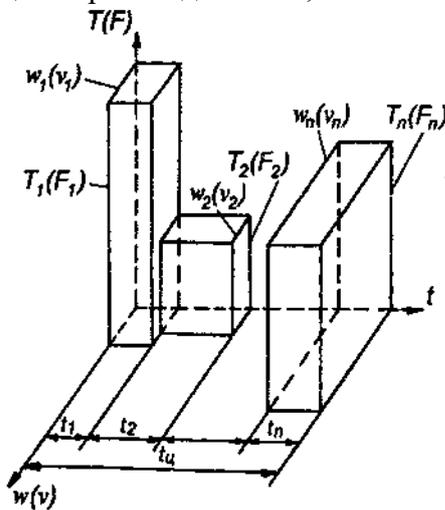


Рис. 12.1. Циклограмма нагружения

Для мехатронного модуля поступательного движения:

$$P_{CK} = \frac{F_{HK} \cdot v_K}{\eta},$$

где  $F_{HK}$  — сила сопротивления на  $K$ -м рабочем участке циклограммы, Н;  $v_K$  — линейная скорость выходного звена мехатронного модуля на  $K$ -м рабочем участке циклограммы, м/с.

Для мехатронного модуля вращательного движения

$$P_{CK} = T_{HK} \frac{w_K}{\eta} \quad \text{или} \quad P_{CK} = T_{HK} \frac{n_K}{9,55 \cdot \eta},$$

где  $T_{HK}$  — момент сопротивления на  $K$ -м рабочем участке циклограммы, Н-м;  $n_K$  — частота вращения выходного звена мехатронного модуля на  $K$ -м рабочем участке циклограммы, об/мин;  $w_K$  — угловая скорость выходного звена мехатронного модуля на  $K$ -м рабочем участке циклограммы, с<sup>-1</sup>;  $K$  — число включенных состояний двигателя за цикл;  $w_{НОМ}$  — номинальная скорость вращения вала двигателя, с<sup>-1</sup>;  $w_{PK}$  — рабочая скорость вращения вала двигателя на  $K$ -м рабочем участке циклограммы, с<sup>-1</sup>;  $t_{PK}$  — длительность  $K$ -го рабочего участка циклограммы, с;  $\beta_{wk}$  — коэффициент, учитывающий теплоотдачу при понижении скорости вращения двигателя по отношению к номинальной. Такое понижение скорости может быть вызвано условиями обеспечения требуемого технологического процесса:

$$\beta_{wk} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \frac{w_{PK}}{w_{НОМ}}$$

где  $\beta_0 = 0,7 \dots 0,78$  — для двигателей закрытого исполнения. Вычисляем требуемый номинальный момент двигателя:

$$T_{д.тр.} = \frac{T_{HK \max}}{u \cdot \eta}, \quad (12.7)$$

где  $T_{HK \max}$  — максимальный момент сопротивления на  $K$ -м рабочем участке циклограммы нагружения, Н-м;

Тип электродвигателя выбирают по каталогам исходя из условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\partial} \geq P_c \\ T_{ном} \geq T_{\partial.тр.} \end{array} \right. \quad (12.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{ном} \geq T_{\partial.тр.} \end{array} \right. \quad (12.9)$$

### 12.2. Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при значительных динамических нагрузках

Исходными данными при расчете универсального мехатронного модуля при значительных динамических нагрузках являются:

- структурная схема мехатронного модуля;
- приложенная внешняя нагрузка  $M_H$  ( $T_H$  или  $F_H$ );
- требуемая скорость  $\Omega_{вых}$  ( $\omega_{вых}$  или  $v_{вых}$ ) выходного звена мехатронного модуля;
- момент инерции  $J_H$  (масса  $m_H$ ) объекта управления;
- требуемое ускорение  $E_{вых}$  (угловое  $\square \Omega_{вых}$  или линейное  $a_{вых}$ ) выходного звена мехатронного модуля.

Так как длительность разгона и торможения значительно меньше периода установившегося движения, то динамические нагрузки оказывают влияние на работу двигателя очень короткий промежуток времени. Поэтому мощность двигателя и его предварительный выбор можно осуществить по методике, изложенной выше при отсутствии динамических нагрузок.

Влияние динамических нагрузок на величину вращающего момента двигателя может быть значительным. Поэтому необходимо определить требуемый момент двигателя с учетом динамических нагрузок:

$$T_{\partial.тр.макс} = \frac{T_H + T_{дин}}{u \cdot \eta} \quad (12.10)$$

где  $T_{дин}$  - динамический момент, вызванный ускоренным движением вращающихся частей мехатронного модуля и объекта управления, приведенный к выходному звену, Н·м:

$$T_{дин} = (J_{\partial} \cdot u^2 + J_{н\partial} + J_H) \varepsilon_{вых}; \quad (12.11)$$

$J_{д}$  — момент инерции ротора двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $J_{пд}$  - момент инерции вращающихся частей преобразователя движения, кгм<sup>2</sup>:

$$J_{н\partial} \approx (0,1...0,3)J_{\partial}u^2 \quad (12.12)$$

$J_H$  - момент инерции объекта управления, кгм<sup>2</sup>.

Окончательно тип электродвигателя выбирают по стандартам исходя из условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\partial} \geq P_c \\ T_{ном} \geq T_{\partial.тр.} \end{array} \right. \quad (12.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{ном} \geq T_{\partial.тр.} \end{array} \right. \quad (12.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\partial.макс} \geq T_{\partial.тр.макс} \end{array} \right. \quad (12.15)$$

где  $T_{д.макс}$  - максимальный момент электродвигателя (задается в стандартах). При отсутствии данных приближенно можно принимать:

$$T_{\partial.тр.макс} \approx (2,0...2,2)T_{ном} \quad (12.16)$$

В случае не выполнения указанных условий, необходимо вы брать двигатель с большим максимальным вращающим моментом.

### 12.3. Передаточное отношение преобразователя движения

Передаточное отношение преобразователя движения универсального мехатронного модуля может быть определено по формуле

$$u = \frac{\Omega_{ном}}{\Omega_{вых}} = \frac{M_H}{M_{\partial.тр.} \cdot \eta} \quad (12.17)$$

где  $\Omega_{ном}$  - номинальная скорость двигателя;  $\Omega_{вых}$  - скорость выходного звена преобразователя движения;  $M_H$  - нагрузка сопротивления на выходном звене преобразователя движения;  $M_{\partial.тр}$  - требуемое усилие на выходном звене двигателя;  $\eta$  - коэффициент полезного действия мехатронного модуля.

В зависимости от характера движения выходного звена двигателя и преобразователя движения  $\Omega$  и  $M$  могут принимать следующие значения:

$$\Omega = \begin{cases} \omega - \text{при угловом движении} \\ v - \text{при линейном движении} \end{cases}$$

$$M = \begin{cases} T - \text{при угловом движении} \\ F - \text{при линейном движении} \end{cases}$$

Следует отметить, что передаточное отношение в общем случае имеет размерность. Так, при преобразовании вращательного движения в поступательное размерность передаточного отношения ( $1/m$ ), при преобразовании поступательного движения во вращательное размерность передаточного отношения ( $m$ ).

Для мехатронного модуля вращательного движения передаточное отношение находят по формуле:

$$u = \frac{\omega_{ном}}{\omega_{вых}} = \frac{T_H}{T_{д.тр.} \cdot \eta} \quad (12.18)$$

где  $\omega_{ном}$  — номинальная угловая скорость двигателя,  $c^{-1}$ ;  $\omega_{вых}$  — угловая скорость выходного звена преобразователя движения,  $c^{-1}$ ;  $T_{д.тр.}$  — требуемый вращающий момент на валу двигателя, Нм;  $T_H$  — момент сопротивления, Нм, на выходном звене преобразователя движения.

Для мехатронного модуля при преобразовании вращательного движения вала двигателя в поступательное движение выходного звена:

$$u = \frac{\omega_{ном}}{v_{вых}} = \frac{F_H}{T_{д.тр.} \cdot \eta} \quad (12.19)$$

где  $v_{вых}$  — линейная скорость выходного звена мехатронного модуля, м/с;  $F_H$  — сила сопротивления, Н, на выходном звене.

Для мехатронного модуля при преобразовании поступательного движения подвижного звена двигателя во вращательное движение выходного звена:

$$u = \frac{v_{ном}}{\omega_{вых}} = \frac{T_H}{F_{д.тр.} \cdot \eta}, \quad (12.20)$$

где  $F_{д.тр.}$  — требуемая сила на подвижном звене двигателя линейного перемещения, Н;  $v_{ном}$  — номинальная линейная скорость подвижного звена двигателя, м/с.

#### 12.4. Оптимизация выбора силовых элементов

Выбор силовых элементов (двигателя и преобразователя движения) мехатронного модуля может быть осуществлен неоднозначно. Поэтому при их проектировании следует стремиться найти оптимальное решение. Для этого необходимо выбрать критерий оценки их качества. Оптимальным считается проектный вариант, которому соответствует экстремальное значение этого критерия.

В инженерной практике в качестве критериев оптимизации применяют различные показатели:

- время перемещения выходного звена на заданное расстояние;
- время согласования скорости выходного звена с заданным значением;
- минимизация массы и габаритов мехатронного модуля;
- энергия, потребляемая мехатронным модулем при выполнении типовых движений.

Результат проектирования в значительной степени зависит от того, насколько удачно разработчик выберет необходимый критерий.

Рассмотрим проектирование мехатронного модуля при котором двигатель развивает максимально возможное ускорение  $\varepsilon_{max}$  выходного звена. Такой выбор критерия оптимизации ориентирован на мехатронные модули, работающие с большими ускорениями в составе высокопроизводительного оборудования. Для осуществления поставленной задачи необходимо определить оптимальное передаточное отношение преобразователя движения:

$$u = \frac{T_H}{T_{\max} \cdot \eta} + \sqrt{\left(\frac{T_H}{T_{\max} \cdot \eta}\right)^2 + \frac{J_n}{J_{\text{д.л.д}}}} \quad (12.21)$$

При этом требуемый максимальный момент двигателя определяют в виде:

$$T_{\text{д.т.р.макс}} = \frac{2}{\eta} \sqrt{J_{\text{д.л.д}} \cdot \varepsilon_{\max} (J_n \varepsilon_{\max} + T_H)} \quad (12.22)$$

где  $J_{\text{д.л.д}}$  — момент инерции ротора двигателя и приведенный к валу двигателя момент инерции преобразователя движения

$$J_{\text{д.л.д}} \approx (1,1 \dots 1,3) J_{\text{д}} \quad (12.23)$$

Для выбора типа электродвигателя необходимо выполнение условия:

$$T_{\text{д.макс}} \geq T_{\text{д.т.р.макс}} \quad (12.24)$$

Если условие (12.24) не выполняется, необходимо выбрать двигатель с большим максимальным вращающим моментом.

Для выбранного двигателя и преобразователя движения с оптимальным передаточным отношением необходимо, чтобы выполнялось также условие:

$$w_{\text{вых.опт}} = \frac{w_{\text{н.о.м}}}{u_{\text{опт}}} \geq w_{\text{вых}} \quad (12.25)$$

Если условие (12.25) не выполняется, необходимо выбрать двигатель с большими скоростными возможностями и провести перерасчет мехатронного модуля.

### 13. Преобразователи движения

Передача движения от двигателя к выходному звену мехатронного модуля может быть обеспечена с помощью различных преобразователей движения (передач), структура и конструктивные особенности которых зависят от типа двигателя, вида перемещения выходного звена и способа его расположения.

Преобразователи движения предназначены для преобразования одного вида движения в другое, согласования скоростей и вращающих моментов двигателя и выходного звена. Для преобразования движения используют винтовые, реечные, цепные, тросовые передачи, а также передачи зубчатым ремнем, мальтийские механизмы. В связи с тем, что электродвигатели в основном высокооборотные, а рабочие скорости выходных звеньев мехатронных модулей невелики, в них для согласования скоростей используют понижающие передачи: зубчатые цилиндрические и конические, червячные, планетарные, волновые. Тип преобразователя движения выбирают, исходя из сложности его конструкции, коэффициента полезного действия, люфта в передаче, габаритных размеров и массы, свойств самоторможения, жесткости, удобства компоновки, технологичности, долговечности, стоимости и т.п. Преобразователи движения оказывают существенное влияние на качество работы мехатронного модуля.

#### 13.1. Реечная передача

Реечная передача предназначена для преобразования вращательного движения шестерни в поступательное движение рейки и, наоборот, поступательного движения рейки во вращательное движение шестерни.

Основными звеньями реечной передачи (рис. 13.1) являются шестерня 1 и зубчатая рейка 2, представляющая собой сектор зубчатого цилиндрического колеса, диаметры делительной и однотипных соосных поверхностей которого бесконечно велики, вследствие чего эти поверхности являются параллельными поверхностями, а концентрические окружности — параллельными прямыми

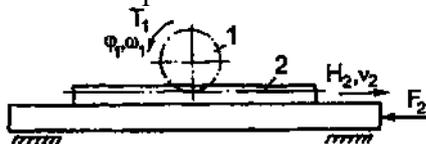


Рис 13.1

*Материалы передачи.* Основными материалами, применяемыми для изготовления зубчатых колес и реек, являются углеродистые и легированные стали. Наиболее часто используемые материалы приведены в табл. 13.1.

Т а б л и ц а 13.1

Механические характеристики сталей				
А. Нормализованные (Н), улучшенные (У) и объемно-закаленные стали (03)				
Марка стали	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Твердость	Термообработка
1	2	3	4	5
40	600	320	192-228	У
	600-700	320	167-194 НВ	Н
	650-750	350	180-207 НВ	У
45	700-800	400	194-222 НВ	У
	750-850	450	207-236 НВ	У
	800-900	550	223-250 НВ	У
	850-950	600	236-263 НВ	У
50	700-800	370-420	212-235 НВ	У
50Г	800	550	241-285 НВ	У
35Х	650	450	187 НВ	У
	700-800	400	200-230 НВ	

	750-850	500	215-243 HB	У
40Х	800-900	550	230-257 HB	У
	850-950	600	243-271 HB	У
	900-1000	700	257-285 HB	У
40НХ	850-950	600	250-280 HB	У
	900-1000	700	265-290 HB	У
20ХН3А	1000	850	293-341 HB	У
38ХА	900	800	269-321 HB	У
37ХН3А	1100	950	321-387 HB	У
40ХНМА	1100	950	293-375 HB	У
45	1000	750	38-42 HRC	03
50	620	340	48-52 HRC	03
Б. Поверхностно-закаленные (ПЗ), цементируемые (ЦМ), азотированные (А) и цианированные (Ц) стали				
45	600	340	53-55 HRC	ПЗ
40Х	1000	850	52-56 HRC	ПЗ
40ХН	800	500	51-57 HRC	ПЗ
20Х	800	650	<u>20-32 HRC</u> 57-63 HRC	ЦМ,3
18ХГТ	1150	950	<u>332-375 HB</u> 56-62 HRC	ЦМ,3
12ХН3А	1000	800	<u>26-42 HRC</u> 56-63 HRC	ЦМ,3
12ХН3А	1000	850	<u>260-400 HB</u> 58-63 HRC	ЦМ,3
12Х2Н4А	1200	1000	<u>280-400 HB</u> 60-65 HRC	ЦМ,3
20Х2Н4А	1400	1200	<u>300-400 HB</u> 60-65 HRC	ЦМ,3
38ХМЮА	1000	850	30-34 HRC	А
40Х	900	650	<u>60 HRC</u> 48-56 HRC	Ц, 3
40ХН	920	700	50-54 HRC	Ц, 3
Примечание: в числителе указана твердость сердцевины, в знаменателе - поверхности				

### 13.2. Кинематический расчет передачи.

При преобразовании вращательного движения шестерни в поступательное движение рейки (рис. 13.1) угол поворота шестерни равен:

$$\varphi_1 = \frac{2H_2}{d_1} = \frac{H_2 \cdot 360^\circ}{\pi d_1}$$

Угловая скорость шестерни, с<sup>-1</sup>:

$$w_1 = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot v_2}{d_1}$$

Передаточное отношение, м<sup>-1</sup>:

$$u_{ВП} = \frac{w_1}{v_1} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot v_2}{d_1 \cdot v_1} \quad (13.1)$$

Передаточное отношение реечной передачи при преобразовании вращательного движения в поступательное рекомендуют принимать  $u_{ВП} = 10 \dots 200$  1/м.

При преобразовании поступательного движения рейки во вращательное движение шестерни (рис. 13.2) перемещение рейки равно:



Рис 13 2

$$H_2 = \frac{d_1 \varphi_1}{2} = \frac{\varphi_1 \pi d_1}{360^\circ}$$

где  $d_1$  - делительный диаметр шестерни, мм ;  $\varphi_1$  - угол поворота шестерни.

Линейная скорость рейки, м/с:

$$v_2 = \frac{w_1 \cdot d_1}{2 \cdot 10^3} = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \cdot 10^3}$$

где  $w_1$  - угловая скорость шестерни,  $c^{-1}$ ;  $n_1$  — частота вращения шестерни, об/мин.

Передаточное отношение, м :

$$u_{ВП} = \frac{v_2}{w_1} = \frac{w_1 \cdot d_1}{2 \cdot 10^3} = \frac{d_1}{2 \cdot 10^3} \quad (13.2)$$

передаточное отношение реечной передачи рекомендуют принимать равным  $u_{ПВ} = 0,005 \dots 0,1$  м.

### 13.3. Допускаемые контактные и изгибные напряжения.

Допускаемые контактные и изгибные напряжения определяют по формуле:

$$[\sigma]_{H(F)} = \frac{\sigma_{H(F)limb}}{S_{H(F)}} \cdot K_{H(F)L} \cdot K_{H(F)C} \quad (13.3)$$

где индекс  $H$  относится к контактным напряжениям, индекс  $F$  к изгибным;  $\sigma_{limb}$  - предел выносливости поверхностей зубьев, соответствующий базовому числу циклов перемены напряжений (табл. 4.2).  $S$  — коэффициент безопасности. При нормализации, улучшении и объемной закалке зубьев  $S_H=1,1$  и  $S_F=1,75$ ; при азотировании, цементации, цианировании  $S_H=1,2$  и  $S_F=1,55$ ;  $K_C$  — коэффициент, учитывающий реверсивность нагрузки. При неререверсивной нагрузке  $K_{HC} = K_{FC} = 1,0$ ; при реверсивной нагрузке -  $K_{HC}=1,0$  и  $K_{FC}=0,7 \dots 0,8$ .

$K_L$  - коэффициент долговечности, учитывающий влияние срока службы и режима нагрузки передачи:

$$K_L = \sqrt{\frac{N_0}{N_E}}$$

$m$  — показатель степени. При расчете на контактную прочность зубьев  $m=3$ , при расчете на изгиб при твердости зубьев  $HB \leq 350$  принимают  $m=6$ , при твердости зубьев  $HB > 350$  принимают  $m=9$ .  $N_0$  — базовое число циклов изменения напряжений (табл. 13.3). Для контактных напряжений:

$$N_{H0} \approx (HB)^3 \quad (13.4)$$

Т а б л и ц а 13.2

Предел контактной и изгибной выносливости			
Твердость зубьев, HB, HRC	Вид термообработки	Предел контактной выносливости $\sigma_{Hlimb}$ , МПа	Предел изгибной выносливости $\sigma_{Flimb}$ , МПа
HB ≤ 350	Нормализация, улучшение	2HB+70	1.8HB
HRC=35...45	Объемная закалка	18HRC+150	550
HRC=45...63	Закалка ТВЧ	17HRC+200	550...650
HRC=55...63	Цементирование	23HRC	750
	Нитроцементиро-		750...1000

	вание	
--	-------	--

$N_E$  - эквивалентное число циклов изменения напряжений. При переменных режимах нагружения (рис. 13.3) вращающим моментом или осевой силой эквивалентное число циклов изменения напряжений за один технологический цикл определяют по формулам:

$$N_E = \frac{C}{60} \sum_{i=1}^k \left( \frac{T_i}{T_{\max}} \right)^m \cdot n_i \cdot t_i$$

$$N_E = \frac{10^3 C}{\pi d_1} \sum_{i=1}^k \left( \frac{F_i}{F_{\max}} \right)^m \cdot v_i \cdot t_i$$

где  $C$  - число реек, находящихся в зацеплении с шестерней;  $T_i$  - вращающий момент на шестерне на  $i$ -м участке циклограммы нагружения, Н мм;  $F_i$  - осевая сила на рейке на  $i$ -м участке циклограммы нагружения, Н;  $T_{\max}$  - максимальный вращающий момент на шестерне по циклограмме нагружения, Н·мм;  $F_{\max}$  - максимальная осевая сила на рейке по циклограмме нагружения, Н;  $n_i$  — частота вращения шестерни на  $i$ -м участке нагружения, об/мин;  $v_i$  - линейная скорость рейки на  $i$ -м участке нагружения, м/с;  $t_i$  — длительность  $i$ -го участка нагружения, с;  $d_1$  — делительный диаметр шестерни, мм;  $k$  — число участков нагружения

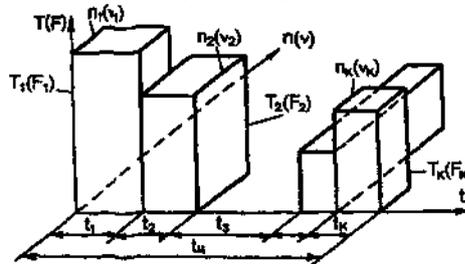


Рис 13.3

Т а б л и ц а 13.3

Базовое число циклов  $N_0$  изменения напряжений, млн. циклов

Твердость поверхности зубьев									
HB	200	250	300	350	400	450	500	550	600
HRC	20	25	33	36	42	47	52	56	59
$N_{H0}$	10	12,5	25	35	50	65	85	110	150
$N_{F0}$	4								

За весь срок работы передачи:

$$N_E = 60 \cdot C \cdot \frac{L_h}{t_{II}} \sum_{i=1}^k \left( \frac{T_i}{T_{\max}} \right)^m \cdot n_i \cdot t_i$$

$$N_E = \frac{36 \cdot 10^5}{\pi d_1} C \cdot \frac{L_h}{t_{II}} \sum_{i=1}^k \left( \frac{F_i}{F_{\max}} \right)^m \cdot v_i \cdot t_i$$

где  $L_h$  - долговечность работы передачи, ч;  $t_{II}$  - длительность одного технологического цикла, с:

$$t_{II} = \sum_{i=1}^k t_i$$

постоянном режиме нагружения формулы для определения эквивалентного числа циклов нагружения принимают вид:

$$N_E = 60 \cdot C \cdot L_h \cdot n$$

$$N_E = \frac{36 \cdot 10^5}{\pi d_1} C \cdot v \cdot L_h$$

Для зубчатых колес и реек из нормализованных и улучшенных сталей твердостью  $HB < 350$  коэффициенты долговечности находятся в пределах  $K_{HL} = 1 \dots 2,6$  и  $K_{FL} = 1,0 \dots 2,0$ . Для колес с поверхностной закалкой, азотированием и цементацией при твердости  $HB > 350$  коэффициенты долговечности принимают значения  $K_{HL} = 1,0 \dots 1,8$  и  $K_{FL} = 1 \dots 1,6$ ; для длительно работающих передач, у которых  $N_E > N_0$ , коэффициенты долговечности равны  $K_{HL} = K_{FL} = 1$ .

#### 13.4. Геометрический расчет передачи.

Расчет геометрических параметров реечной передачи начинают с определения делительного диаметра шестерни.

Рассмотрим преобразование вращательного движения шестерни в поступательное движение рейки (рис. 13.1). Исходными данными для расчета передачи являются: сила сопротивления  $F_2$  на рейке, перемещение  $H_2$  и линейная скорость  $v_2$  рейки. В этом случае делительный диаметр шестерни 1 на основании условия (13.1) равен, мм:

$$d_1 = \frac{2 \cdot 10^3}{u_{ВП}} \quad (13.5)$$

Делительный диаметр шестерни можно также найти из условия контактной прочности зубьев, мм:

$$d_1 \geq K_d \sqrt{\frac{F_2 \cdot E_{ПП} \cdot K_{H\beta}}{\psi_{bd} [\sigma]_H^2}} \quad (13.6)$$

где  $K_d$  - коэффициент равный для прямозубых передач 1,12, для косозубых передач -1,0;  $F_2$  - сила сопротивления на рейке, Н;  $K_{H\beta}$  - коэффициент, учитывающий неравномерность нагрузки по ширине зуба, определяют по таблице 4.8;  $\psi_{bd}$  - коэффициент ширины зубчатого венца, равный 0,2... 1,6. В мехатронных модулях желательно принимать  $\psi_{bd} = 0,2 \dots 0,8$ ;  $E_{ПП}$  - приведенный модуль упругости материалов шестерни и рейки, МПа:

$$E_{ПП} = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$$

$E_1$  и  $E_2$  - модули упругости первого рода материалов шестерни и рейки соответственно, МПа;  $[\sigma]_H$  — допустимое контактное напряжение, МПа, определяемое по формуле (13.3).

Для обеспечения требуемого передаточного отношения необходимо, чтобы делительный диаметр шестерни, полученный по формуле (13.5), был больше делительного диаметра, найденного по формуле (13.6). Этого можно достичь, применяя соответствующие материалы и варьируя коэффициентом  $\psi_{bd}$ .

Вращающий момент на шестерне, Н·мм:  $T_1 = F_2 d_1 / 2$ .

Иногда более удобным является способ, когда значение делительного диаметра  $d_1$  шестерни, полученное по формуле (13.5), подставляют в зависимость (13.6) и находят значение допустимого контактного напряжения:

$$[\sigma]_H \geq \frac{K_d \cdot u_{ВП}}{2 \cdot 10^3} \sqrt{\frac{F_2 \cdot E_{ПП} \cdot K_{H\beta}}{\psi_{bd}}}$$

Затем по формуле (13.3) вычисляют предел контактной выносливости поверхностей зубьев:

$$\sigma_{H(F)limb} \geq \frac{[\sigma]_H \cdot S_H}{K_{HL} \cdot K_{HC}}$$

и используя табл. 13.2 определяют твердость материала зубьев.

Коэффициент долговечности  $K_{HL}^B$  в первом приближении определяют при базовом числе циклов изменения напряжений  $N_{H0} = 10^7$  циклов.

После нахождения твердости материала методом последовательных приближений, используя табл. 13.3, находят более точные значения  $N_{H0} > K_{HL}$  и  $HB$  или  $HRC$ .

Например, для стали, подвергнутой нормализации, улучшению

$$\sigma_{H(F)limb} = 2HB + 70$$

Откуда

$$HB \geq \frac{\sigma_{H(F)limb} - 70}{2}$$

Если окажется, что полученная твердость  $HB \leq 350$ , то использованная формула для расчета твердости верна. Если твердость  $HB > 350$ , то для ее вычисления необходимо взять из табл. 4.2 следующую формулу:

$$\sigma_{H(F)limb} = 18HRC + 150$$

Откуда

$$HRC \geq \frac{\sigma_{H(F)limb} - 150}{18}$$

Далее по табл. 4.1 находят марку стали, вид ее термообработки и механические характеристики.

Следует отметить, что при таком расчете для изготовления шестерни и рейки исключается группа сталей, твердость которых меньше расчетной.

Определяем модуль зубьев (для косозубых передач — нормальный модуль) из условия изгибной прочности зубьев:

$$m \geq \frac{K_m \cdot F_2}{\psi_{bd} \cdot d_1 [\sigma]_F} \quad (13.7)$$

где коэффициент  $K_m$  равен для прямозубых колес 6,6; косозубых — 5,8; шевронных — 5,2.

Полученное значение модуля зубьев округляют до стандартного значения (табл. 13.4).

Т а б л и ц а 13.4

Значения модуля  $m$ , мм

1-й ряд	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0
2-й ряд	0,22; 0,28; 0,35; 0,45; 0,55; 0,7 0,9; 1,125; 1,375; 1,75; 2,25; 2,75; 3,5; [4,5; 5,5; 7; 9

Находим число зубьев шестерни

$$z_1 = \frac{d_1 \cdot \cos \beta}{m} \quad (13.8)$$

где  $\beta$  - угол наклона зубьев, град.

Полученное значение числа зубьев округляют до целого и уточняют делительный диаметр шестерни

$$d_1 = z_1 m / \cos \beta$$

перемещение рейки, ее скорость и передаточное отношение.

По значению линейной скорости рейки (окружной скорости шестерни) назначают степень точности реечной передачи (табл. 4.5)

Для шестерни, нарезанной без смещения, диаметр окружности вершин зубьев, мм:

$$d_{a1} = d_1 + 2m,$$

диаметр окружности впадин зубьев, мм:

$$d_{f1} = d_1 - 2,5m.$$

Толщина зуба шестерни по делительной окружности, мм, равная толщине зуба рейки по средней прямой, мм:

$$S_1 = S_2 = 0,5 \pi m.$$

Нормальный шаг зубьев шестерни и рейки, мм:

$$P_1 = P_2 = \pi m.$$

Для косозубой передачи - торцовый шаг, мм:

$$P_{t1} = P_{t2} = \frac{\pi m}{\cos \beta}$$

Минимальная длина нарезанной части рейки, мм:

$$L_{2\min} = H_2 + (2 \dots 4) P_{t2}$$

Минимальное число зубьев рейки:

$$z_{2\min} = \frac{L_{2\min}}{P_{t2}} + 0,5 \quad (13.9)$$

Число зубьев рейки округляют до целого значения.

Уточняют минимальную длину нарезанной части рейки

$$L_{2\min} = (z_{2\min} - 0,5) P_{t2} \quad (13.10)$$

Ширина зубчатого венца рейки, мм:

$$b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1$$

Ширина шестерни, мм:

$$b_1 = b_2 + 0,6 \sqrt{b_2}$$

Размеры поперечного сечения рейки можно определить из условия прочности при растяжении (сжатии):

$$\sigma = \frac{F_2}{A} \leq [\sigma]_p = \frac{\sigma_{TP}}{[n]_{TP}}$$

Т а б л и ц а 13.5

Степень точности реечных зубчатых передач

Степень точности не ниже	Скорость рейки не более,		Примечание
	прямозубая	косозубая	
6 (высокоточная)	15	30	Высокоточные передачи, механизмы точной механики, мехатроники и робототехники _____
7 (точная)	10	15	Скоростные передачи при умеренных нагрузках, высоконагруженные передачи при высоких скоростях
8 (средней точности)	6	10	Передачи общего назначения в машиностроении, не требующие особой точности
9 (пониженной точности)	2	4	Тихоходные передачи с пониженными требованиями к точности

Откуда площадь поперечного сечения рейки равна:

$$A \geq \frac{F_2}{[\sigma]_p} = \frac{F_2 [n]_{TP}}{\sigma_{TP}} \quad (13.11)$$

где  $[\sigma]_p$  — допускаемое напряжение растяжения материала рейки;  $\sigma_{TP}$  — предел текучести материала рейки при растяжении;  $[n]_{TP}$  — допускаемый коэффициент запаса по текучести при растяжении, равный 1,5.. 2,0.

Задаваясь формой поперечного сечения рейки можно найти ее размеры.

Если поперечное сечение рейки прямоугольное с шириной зубчатого венца  $b_2$ , то ее толщина будет равна:

$$\delta \geq \frac{F_2 [n]_{TP}}{b_2 \cdot [\sigma]_{TP}}$$

Рейку проверяют на устойчивость по формулам Л. Эйлера или Ф.А. Ясинского.

Проверить рейку (или винты) на устойчивость можно также с помощью коэффициента  $\varphi$  понижения допускаемого напряжения. При этом расчет на устойчивость заменяют расчетом на сжатие, но со сниженным допускаемым напряжением:

$$\sigma_c = \frac{F_2}{A} \leq \varphi[\sigma]_c$$

Коэффициент  $\varphi$  определяют по табл. 13.6.

Т а б л и ц а 13.6

$\lambda$	Значения коэффициента $\varphi$	
	Материал	
	Ст.0, Ст.1, Ст.2, Ст.3, Ст.4	Ст.5
0	1,00	1,00
10	0,99	0,98
20	0,96	0,95
30	0,94	0,92
40	0,92	0,89
50	0,89	0,86
60	0,86	0,82
70	0,81	0,76
80	0,75	0,70
90	0,69	0,62
100	0,60	0,51
110	0,52	0,43
120	0,45	0,36
130	0,40	0,33
140	0,36	0,29
150	0,32	0,26
160	0,29	0,24
170	0,26	0,21
180	0,23	0,19
190	0,21	0,17
200	0,19	0,16

В случае невыполнения условия устойчивости, толщину рейки необходимо увеличить.

Рассмотрим преобразование поступательного движения рейки во вращательное движение шестерни (рис. 13.2). Исходными данными для расчета являются: момент сопротивления на шестерне  $T_1$ , угол поворота  $\varphi_1$  и угловая скорость  $\omega_1$  шестерни. Расчет геометрических параметров передачи начинают с определения делительного диаметра шестерни, мм

$$d_1 = 2 \cdot 10^3 u_{ПВ} \quad (13.12)$$

Также делительный диаметр шестерни можно найти из условия контактной прочности зубьев, мм:

$$d_1 \geq 1,2 \cdot K_d \sqrt[3]{\frac{T_1 \cdot E_{ПП} \cdot K_{H\beta}}{\psi_{bd} [\sigma]_H^2}} \quad (13.13)$$

где  $T_1$  — момент сопротивления на шестерне, Н·мм.

Требуемое передаточное отношение можно выполнить, если делительный диаметр шестерни, найденный по формуле (13.12), больше делительного диаметра, полученного по формуле (13.13). Этого достигают, применяя соответствующие материалы и изменяя коэффициент  $\psi_{bd}$ .

Также можно использовать методику, предложенную для расчета реечной передачи при преобразовании вращательного движения шестерни в поступательное движение рейки.

В рассматриваемом случае допускаемое контактное напряжение равно:

$$[\sigma]_H \geq \frac{1,3 \cdot K_d}{d_1} \sqrt{\frac{K_d \cdot T_1 \cdot E_{\text{ПП}} \cdot K_{H\beta}}{d_1 \cdot \psi_{bd}}}$$

Осевая сила, действующая на рейку, Н:

$$F_2 = \frac{2T_1}{d_1} \quad (13.14)$$

Модуль зубьев (для косозубых передач — нормальный модуль), мм:

$$m \geq \frac{K_m \cdot F_2}{\psi_{bd} \cdot d_1 [\sigma]_F}$$

*13.5. Проверочный расчет зубьев шестерни и рейки на выносливость по контактным напряжениям.*

При проверочном расчете определяют контактные напряжения, возникающие в местах соприкосновения зубьев шестерни и рейки, и сравнивают их с допускаемыми контактными напряжениями:

$$\sigma_H \leq [\sigma]_H \quad (13.15)$$

Контактные напряжения определяют по условию, МПа:

$$\sigma_H = z_H \cdot z_M \cdot z_\varepsilon \sqrt{\frac{W_{Ht}}{d_1}}, \quad (13.16)$$

где  $z_H$  - коэффициент, учитывающий форму сопряженных поверхностей зубьев:

$$z_H = \sqrt{\frac{2 \cos^2 \beta}{\sin 2\alpha_w}},$$

$\alpha_w$  - угол зацепления при смещении шестерни и рейки, град;  $\alpha = 20^\circ$  - угол зацепления при отсутствии смещения шестерни и рейки, град. При  $\alpha_w = \beta$  получим  $z_H = 1,76 \cdot \cos \beta$ ;  $\beta$  — угол наклона зубьев;  $z_M$  — коэффициент, учитывающий механические свойства материалов сопряженных шестерни и рейки:

$$z_M = \sqrt{\frac{E_{np}}{\pi(1-\mu)^2}}$$

$E_{np}$  — приведенный модуль упругости, МПа:

$$E_{\text{ПП}} = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$$

свойства материалов сопряженных шестерни и рейки:

где  $E_1$  и  $E_2$  — модули упругости первого рода материалов шестерни и рейки. Для стали  $E_1=E_2=(2,0...2,2)10^5$  МПа;  $\varepsilon$  - коэффициент Пуассона. Для стали  $\mu=0,3$ .

Таким образом, для стальных шестерни и рейки:

$$z_M = 275 \text{ МПа}^{\frac{1}{2}}$$

$z_\varepsilon$  — коэффициент, учитывающий суммарную длину контактных линий. Для прямозубых и косозубых колес при  $\varepsilon_\beta < 0,9$ :

$$z_\varepsilon = \sqrt{\frac{4 - \varepsilon_\alpha}{3}}$$

для косозубых колес при  $\varepsilon_\beta \geq 0,9$  и шевронных колес:

$$z_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}}$$

где  $\varepsilon_\beta$  - коэффициент осевого перекрытия:

$$\varepsilon_\beta = \frac{b_1 \cdot \sin \beta}{\pi m} = \frac{\psi_{bd} \cdot z_1 \cdot \sin \beta}{\pi},$$

$\varepsilon_\alpha$  — коэффициент торцового перекрытия:

$$\varepsilon_{\alpha} = \left( 1,88 - 3,2 \frac{1}{z_1} \right) \cdot \cos \beta$$

$W_{Ht}$  - удельная расчетная окружная сила, Н/мм:

$$W_{Ht} = \frac{2T_1 \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\nu}}{d_1 \cdot b_1},$$

где  $K_{H\alpha}$  - коэффициент, учитывающий распределение нагрузки между зубьями. Для прямозубых передач  $K_{H\beta\alpha}=1$ . Для косозубых и шевронных передач коэффициент  $K_{H\alpha}$  определяют по табл. 13.7.

Т а б л и ц а 13.7

Значения коэффициента  $K_{H\alpha}$

Скорость рейки $v_2$ , м/с	Степень точности по нормам плавности				
	5	6	7	8	□
2,5	1	1,01	1,03	1,05	1,13
5	1	1,02	1,05	1,09	1,16
10	1,01	1,03	1,07	1,13	—
15	1,01	1,04	1,09	—	—
20	1,02	1,05	1,12	—	—
25	1,02	1,06	—	—	—

$K_{H\beta}$  - коэффициент, учитывающий неравномерность нагрузки по ширине зуба, определяют по табл. 4.8;  $K_{H\nu}$  - коэффициент, учитывающий динамическую нагрузку, возникающую в зацеплении, определяют по табл. 13.9.

Т а б л и ц а 13.8

Значения коэффициентов  $K_{H\beta}$  и  $K_{F\beta}$

Расположение шестерни относительно опор, тип опор	Твердость, НВ	$K_{H\beta}$				$K_{F\beta}$			
		$\psi_{bd}$				$\psi_{bd}$			
		0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
Консольное, опоры шарикоподшипники	<350	1,08	1,17	1,28	...	1,16	1,37	1,64	....
	>350	1,22	1,44	.....	.....	11,33	1,70		....
Консольное, опоры роликподшипники	<350	1,06	1,12	1,19	1,27	1,10	1,22	1,38	1,57
	>350	1,10	1,25	1,45	.....	1,20	1,44	1,71	.....
Симметричное	<350	1,01	1,02	1,03	1,04	1,01	1,03	1,05	1,07
	>350	1,01	1,02	1,04	1,07	1,02	1,04	1,08	1,14
Несимметричное	<350	1,03	1,05	1,07	1,09	1,05	1,10	1,17	1,25
	>350	1,06	1,12	1,20	1,29	1,09	1,18	1,30	1,43

Т а б л и ц а 13.9

Значения коэффициента  $K_{H\nu}$

Степень точности	Твердость поверхностей зубьев	Скорость рейки $V_2$ , м/с					
		1	2	4	6	8	10
6	а	1,03	1,06	1,12	1,17	1,23	1,28
		1,01	1,02	1,03	1,04	1,06	1,07
	б	1,02	1,04	1,07	1,10	1,15	1,18
		1,00	1,00	1,02	1,02	1,03	1,04
7	а	1,04	1,07	1,14	1,21	1,29	1,36
		1,02	1,03	1,05	1,06	1,07	1,08
	б	1,03	1,05	1,09	1,14	0,19	1,24
		1,00	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04
8	а	1,04	1,08	1,16	1,24	1,32	1,40

		1,01	1,02	1,04	1,06	1,07	1,08
	б	1.03	1.06	1.10	1.16	1.22	1.26
		1,01	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
9	a	1.05	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
		1,01	1,03	1,05	1,07	1,09	1,12
	б	1.04	1.07	1.13	1.20	1.26	1.32
		1,01	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
Примечания:							
1. Твердость поверхностей зубьев:							
$a \begin{cases} H_1 \leq 350HB; & H_2 \leq 350HB; \\ H_1 \geq 45HRC; & H_2 \leq 350HB; \end{cases}$							
б $H_1 \geq 45 HRC$ $H_2 \geq 45 HRC$							
2. В числителе приведены данные для прямозубых колес, в знаменателе для косозубых							

Условие прочности на контактную выносливость

$$\frac{\sigma_H}{[\sigma]_H} = 0,95 \dots 1,0 \quad (13.17)$$

При невыполнении условия прочности необходимо ввести поправку на рабочую ширину зубчатого венца:

$$b'_1 = b_1 \left( \frac{\sigma_H}{[\sigma]_H} \right)^2 \quad (13.18)$$

Значение  $b'_1$  принимают по ГОСТ 6636-69. Затем определяют новое значение коэффициента  $\psi_{bd} = \frac{b'_1}{d_1}$  и повторяют расчет на выносливость. Вычисляют новые значения ширины шестерни и рейки.

*13.6. Проверочный расчет зубьев шестерни и рейки на выносливость по напряжениям изгиба.*

Условие выносливости зубьев шестерни и рейки по напряжениям изгиба  $\sigma_F$  имеет вид:

$$\sigma_F = 0,9 Y_F \frac{T_2 \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \cdot K_{Fv}}{b_1 \cdot m} \leq [\sigma]_F \quad (13.19)$$

где  $K_{F\alpha}$  - коэффициент, учитывающий распределение нагрузки между зубьями шестерни и рейки. Для прямозубых передач и косозубых с  $\varepsilon_\beta \leq 1$  принимают  $K_{F\alpha} = 1$ . Для косозубых передач с  $\varepsilon_\beta > 1$  и шевронных передач:

$$K_{F\alpha} = \frac{[4 + (\varepsilon_\alpha - 1)(n' - 5)]}{4\varepsilon_\alpha}$$

где  $n'$  - степень точности передачи по нормам плавности работы. Если степень точности грубее 9-й, то  $n'=9$ , если выше 5-й то  $n'=5$ .  $K_{F\beta}$  - коэффициент, учитывающий неравномерность нагрузки по длине зуба, определяют по таблице 4.8;  $K_{Fv}$  - коэффициент динамической нагрузки выбирают по таблице 4.10;  $Y_F$  - коэффициент Формы зуба. Для рейки он равен 3,78, для шестерни определяют зависимости от эквивалентного числа ее зубьев по

$$z_{1v} = \frac{z_1}{\cos \beta}$$

табл. 4.11. Для прямозубых колес:  $z_{1v} = z_1$ .

Изгибное напряжение  $\sigma_F$  определяют для шестерни или рейки в зависимости от того, чье отношение  $\frac{[\sigma]_F}{Y_F}$  меньше.

*Проверочный расчет зубьев шестерни и рейки при перегрузке.*

При расчете на выносливость не учитывают кратковременные перегрузки (например, пусковые и случайные), которые ввиду их малого числа циклов не вызывают усталости. Кратковременные перегрузки ( $T_{пик}$ ,  $F_{пик}$ ), не учтенные при расчете на выносливость, могут привести к потере статической прочности зубьев при перегрузке.

Условие статической прочности зубьев при кратковременной перегрузке моментом  $T_{пик}$ :

$$\sigma_{H \max} = \sigma_H \sqrt{\frac{T_{пик}}{T_{\max}}} \leq [\sigma]_{H \max} \quad (13.20)$$

где  $\sigma_H$  - расчетное контактное напряжение;  $T_{\max}$  - максимальный момент по циклограмме нагружения или расчетный максимальный момент;  $[\sigma]_{H \max}$  — предельное допускаемое контактное напряжение.

Т а б л и ц а 13.10

Значения коэффициента  $K_{FV}$

Степень точности	Твердость поверхностей зубьев	Скорость рейки $v_2$ , м/с					
		1	2	4	6	8	10
6	а	<u>1.06</u> 1,02	<u>1.13</u> 1,05	<u>1.26</u> 1.10	<u>1.40</u> 1,15	<u>1.53</u> 1,20	<u>1.67</u> 1,25
	б	<u>1.02</u> 1,01	<u>1.04</u> 1,02	<u>1.08</u> 1,03	<u>1.11</u> 1,04	<u>1.14</u> 1,06	<u>1.17</u> 1,07
7	а	<u>1.08</u> 1,03	<u>1.16</u> 1,06	<u>1.33</u> 1,11	<u>1.50</u> 1,16	<u>1.67</u> 1,22	<u>1.80</u> 1,27
	б	<u>1.03</u> 1,01	<u>1.05</u> 1,02	<u>1.09</u> 1,03	<u>1.13</u> 1,05	<u>1.17</u> 1,07	<u>1.22</u> 1,08
8	а	<u>1.10</u> 1,03	<u>1.20</u> 1,06	<u>1.38</u> 1.11	<u>1.58</u> 1,17	<u>1.78</u> 1,23	<u>1.96</u> 1,29
	б	<u>1.04</u> 1,01	<u>1.06</u> 1,02	<u>1.12</u> 1,03	<u>1.16</u> 1,05	<u>1.21</u> 1,07	<u>1.26</u> 1,08
9	а	<u>1.13</u> 1,04	<u>1.28</u> 1,07	<u>1.50</u> 1,14	<u>1.77</u> 1,21	<u>1.98</u> 1,28	<u>1.25</u> 1,35
	б	<u>1.04</u> 1,01	<u>1.07</u> 1,02	<u>1.14</u> 1,04	<u>1.21</u> 1,06	<u>1.27</u> 1,08	<u>1.34</u> 1,09

Примечания:  
 1. Твердость поверхностей зубьев:  
 а)  $\begin{cases} H_1 \leq 350HB; & H_2 \leq 350HB; \\ H_1 \geq 45HRC; & H_2 \leq 350HB; \end{cases}$   
 б)  $H_1 \geq 45 HRC \quad H_2 \geq 45 HRC$   
 2. В числителе приведены данные для прямозубых колес, в знаменателе для косозубых

При нормализации, улучшении или объемной закалке зубьев  $[\sigma]_{H \max} = 2,8\sigma_T$ ;  $\sigma_T$  — предел текучести материала зубьев; при цементации, закалке ТВЧ и азотировании  $[\sigma]_{H \max} = 40HRC$ .

Аналогично определяют максимальные напряжения изгиба:

$$\sigma_{F \max} = \sigma_F \frac{T_{пик}}{T_{\max}} \leq [\sigma]_{F \max} \quad (13.21)$$

где  $\sigma_F$  — расчетное изгибное напряжение;  $[\sigma]_{F \max}$  — предельное допускаемое напряжение при изгибе. При твердости зубьев  $HB \leq 350$   $[\sigma]_{F \max} \approx 0,8\sigma_T$ , при  $HB > 350$   $[\sigma]_{F \max} \approx 0,8\sigma_B$ ;  $\sigma_B$  - предел прочности материала зубьев.

Т а б л и ц а 13.11

Значения коэффициента формы зуба  $Y_F$  при коэффициенте смещения  $x=0$ 

$z_v$	17	18	19	20	21	22	24	25	28	30
$Y_F$	4,30	4,25	4,18	4,13	4,10	4,08	4,03	3,97	3,90	~3,87
$z_v$	32	35	40	45	50	60	80	100	150	рейка
$Y_F$	3,84	3,80	3,76	3,75	3,73	3,73	3,74	3,75	3,76	3,78

## 14. Расчет параметров двигателя и редуктора скипового подъемника

Для электромеханических систем управления характерна тесная взаимосвязь электромеханической части с энергетическим каналом питания и каналом управления, что обуславливает ожидаемые характеристики проектируемого устройства часто в равной степени всеми функциональными звеньями. Управляемые комплексы с электрическим приводом (система, состоящая из двигателя и связанных с ним устройств приведения в движение одного или нескольких исполнительных механизмов, входящих в состав мехатронной системы) получили название электромеханических систем.

Создание нового образца мехатронной системы обычно сопровождается использованием в разнообразных вариантах гибких технологических решений. Разновидностью этого принципа является модульный подход. Модули могут легко соединяться, образуя сложные технические системы, разъединяться, заменяться с целью формирования ТС с другими компонентами и техническими характеристиками при необходимости модернизации, ремонта. В общем случае модуль характеризуется конструктивной и технологической завершенностью, обладает строго фиксированными параметрами (функциональными характеристиками, геометрическими размерами), принадлежащими заранее установленным параметрическим типоразмерным рядам.

### 14.1. Исходные данные для расчета

Разработать систему управления электроприводом скипового подъемника наклонной шахты, обеспечивающую следующие проектные технические характеристики

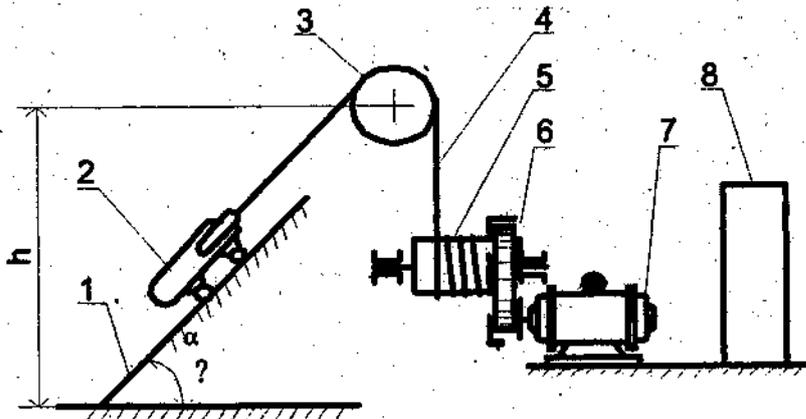


Рис. 14.1. — Функциональная схема скипового подъемника: 1 - рельсовое полотно; 2 - скип; 3 - направляющее колесо; 4 - канат; 5 - барабан; 6 - редуктор; 7 - электродвигатель; 8 - щит управления

Масса груза 190 кг;

- вес скипа  $G_{СК} = 2000 \text{ Н}$ ;
- диаметр колеса скипа  $D_K = 0,25 \text{ м}$ ;
- диаметр цапфы осей колес  $D_{Ц} = 0,06 \text{ м}$ ;
- высота подъема  $h = 70 \text{ м}$ ;
- скорость подъема скипа  $V_n = 2,2 \text{ м/с}$ ;
- скорость спуска скипа  $V_c = 2,3 \text{ м/с}$ ;
- скорость вращения двигателя  $n_d = 1500 \text{ об/мин.}$ ;
- время паузы после спуска и подъема равно  $t_0 = 25 \text{ с}$ ;
- коэффициент трения в цапфе  $f_{Ц} = 0,1$ ;
- коэффициент трения качения колеса по рельсу  $f = 0,06$ ;
- коэффициент, учитывающий трение реборды колеса о рельс,  $K = 1,35$ ;
- угол наклона рельсового полотна  $\alpha = 45^\circ$ ;
- коэффициент полезного действия барабана и передачи  $\eta = 0,93$ ;
- приведенный к валу двигателя маховой момент, обусловленный массами барабана, направляющего колеса, каната и редуктора, составляет  $2,1 \text{ кГ} \cdot \text{м}^2$ .

- время переходного процесса замкнутой системы  $[t_{\text{пер}}] = 0,15\text{с}$ ;
- перерегулирование  $\sigma[\sigma\%] = 50-60\%$ .

В качестве усилительно-преобразовательного устройства применить ШИП-преобразователь (или тиристорный преобразователь ТП в зависимости от варианта) с управлением от микро ЭВМ (PIC-контроллера) или другого программируемого устройства, задающего режим работы электропривода скипового подъемника.

#### 14.2. Расчетно-конструкторская часть

Расчет основных усилий, моментов, действующих в системе:

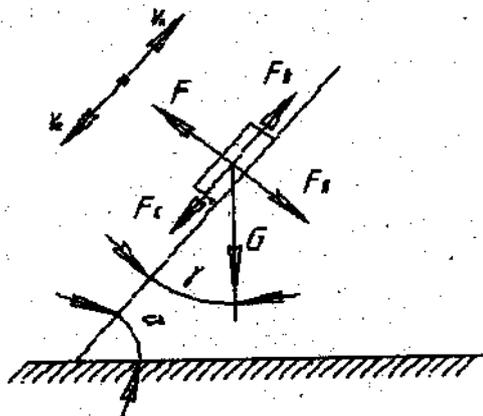


Рис.14.2. Силы, действующие на скап

14.2.1. Сила, действующая на канат, обусловленная весом скапа с грузом

$$F_{\text{кан}} = G \cdot \sin \alpha \quad (14.1)$$

где  $G$  — вес скапа с грузом,  $G = 3863,9 \text{ Н}$ ;  $\alpha$  — угол наклона  $\alpha = 45^\circ$ .

$$F_{\text{кан}} = (2000 + 190 \cdot 9,81) \cdot \sin 45^\circ = 2732,2 \text{ Н}$$

14.2.2. Сила, действующая на колеса скапа

$$F_{\text{кол}} = G \cdot \cos \alpha \quad (14.2)$$

$$F_{\text{кол}} = (2000 + 190 \cdot 9,81) \cdot \cos 45^\circ = 2732,2 \text{ Н}$$

14.2.3. Сила, действующая на канат, обусловленная трением реборд и колес о рельсы и трением в цапфах колес

$$F_{\text{тр}} = K \cdot \frac{F_{\text{кол}}}{R_k} \cdot (\mu + r_{\text{ц}} + f) \quad (14.3)$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий трение реборды колеса о рельс,  $K = 1,35$ ;  $R_k$  — радиус колеса,  $R_k = 12,5 \text{ см}$ ;  $\mu$  — коэффициент трения в цапфе,  $\mu = 0,1$ ;  $r_{\text{ц}}$  — радиус цапфы,  $r_{\text{ц}} = 3 \text{ см}$ ;  $f$  — коэффициент трения качения колеса по рельсу,  $f = 0,06 \text{ см}$ .

14.2.4. Суммарная сила, действующая на канат

$$F_{\text{тяг}} = F_{\text{кан}} + F_{\text{тр}} \quad (14.4)$$

$$F_{\text{тяг}} = 2732,2 + 106,23 = 2838,41 \text{ Н};$$

14.2.5. Приведенный к валу двигателя статический момент

$$M_C = F_{\text{тяги}} \cdot \frac{v_{\text{п}}}{\omega_{\text{д}}} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (14.5)$$

где  $v_{\text{п}}$  — скорость подъема,  $v_{\text{п}} = 2,2 \text{ м/с}$ ;  $\omega_{\text{д}}$  — угловая скорость вращения двигателя,  $\omega_{\text{д}} = 157 \text{ рад/с}$ ;  $\eta$  — КПД  $\eta = 0,93$ .

$$M_C = 2838,41 \cdot \frac{2,2}{0,93} \cdot \frac{1}{0,93} = 42,75 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

14.2.6. Приведенный к валу двигателя момент инерции от поступательно движущихся масс скапа с грузом

$$J_n = \frac{G}{g} \cdot \left( \frac{v_{II}}{\omega_d} \right)^2 \quad (14.6)$$

$$J_n = \frac{3863,9}{9,81} \cdot \left( \frac{2,2}{157} \right)^2 = 0,0773 \text{ кГ} \cdot \text{м}^2$$

14.2.7. Суммарный маховый момент скипового подъемника, приведенный к валу двигателя

$$GD_{\Sigma}^2 = J_n \cdot 4 \cdot g + GD^2 \quad (14.7)$$

$$GD_{\Sigma}^2 = 0,0773 \cdot 4 \cdot 9,81 + 2,1 = 5,13 \text{ кГ} \cdot \text{м}^2$$

### 14.3. Расчет мощности двигателя скипового подъемника

Спуск и подъем скипа производятся с различной скоростью. Паузы после спуска и подъема равны 25 с. каждая. Для учета потерь при пуске и торможении эквивалентная мощность электродвигателя, определяемая статической нагрузкой, должна быть увеличена на 15%.

14.3.1. Полезное усилие в тросе при подъеме нагруженного скида

$$F_{\text{кол}} = (G_{\text{ск}} + G_z) \cdot \sin \alpha \quad (14.8)$$

$$F_{\text{кол}} = (2000 + 190 \cdot 9,81) \cdot \sin 45^\circ = 2732,2 \text{ Н}$$

14.3.2. Дополнительное усилие, необходимое для преодоления трения качения, составит

$$F_{\text{кач}} = (G_{\text{ск}} + G_z) \cdot \cos \alpha \cdot \frac{f}{0,5 \cdot d_k} \quad (14.9)$$

$$F_{\text{кач}} = (2000 + 190 \cdot 9,81) \cdot \cos 45^\circ \cdot \frac{0,06}{0,5 \cdot 25} = 13,12 \text{ Н}$$

14.3.3. Дополнительное усилие, необходимое для преодоления трения скольжения в цапфах

$$F_{\text{ск}} = (G_{\text{ск}} + G_z) \cdot \mu \cdot \frac{d_u}{d_k} \quad (14.10)$$

$$F_{\text{ск}} = (2000 + 1863,9) \cdot 0,1 \cdot \frac{6}{25} = 92,74 \text{ Н}$$

14.3.4. Дополнительное усилие в тросе, обусловленное трением при подъеме скипа с учетом трения в ребордах

$$F_{\text{мп}} = K \cdot (F_{\text{кач}} + F_{\text{ск}}) \quad (14.11)$$

$$F_{\text{мп}} = 1,35 \cdot (13,12 + 92,74) = 142,9 \text{ Н}$$

14.3.5. Полное усилие в тросе при подъеме груза

$$F = F_{\text{кол}} + F_{\text{мп}} \quad (14.12)$$

$$F = 2732,2 + 142,9 = 2875,1 \text{ Н}$$

14.3.6. Мощность, развиваемая двигателем при подъеме

$$P_n = \frac{F \cdot v_n}{1 \cdot 10^3 \cdot \eta} \quad (14.13)$$

$$P_n = \frac{2875,1 \cdot 2,2}{1 \cdot 10^3 \cdot 0,93} = 6,8 \text{ кВт}$$

14.3.7. Время подъема скипа

$$t_n = \frac{h}{v_{II} \cdot \sin \alpha} \quad (14.14)$$

$$t_n = \frac{70}{2,2 \cdot \sin 45^\circ} = 45 \text{ с.}$$

14.3.8. Полезное усилие в тросе при спуске порожнего скипа

$$F'_{кол} = -G_{ск} \cdot \sin \alpha \quad (14.15)$$

$$F'_{кол} = -2000 \cdot \sin 45^\circ = -1414,21H$$

14.3.9. Усилие, необходимое для преодоления трения качения

$$F'_{кач} = G_{ск} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{f}{0,5 \cdot d_k} \quad (14.16)$$

$$F'_{кач} = 2000 \cdot \cos 45^\circ \cdot \frac{0,06}{0,5 \cdot 25} = 6,8H$$

14.3.10. Усилие, необходимое для преодоления трения скольжения в цапфах

$$F'_{ск} = G_{ск} \cdot \mu \cdot \frac{d_y}{d_k} \quad (14.17)$$

$$F'_{ск} = G_{ск} \cdot \mu \cdot \frac{d_y}{d_k}$$

$$F'_{ск} = 2000 \cdot 0,1 \cdot \frac{6}{25} = 48H$$

14.3.11. Усилие в тросе, обусловленное трением при спуске порожнего скипа с учетом трения в ребордах

$$F'_{мп} = K \cdot (F'_{кач} + F'_{ск}) \quad (14.18)$$

$$F_{тр} = 1,35 \cdot (6,8 + 48) = 73,96 H.$$

14.3.12. Полное усилие в тросе при спуске порожнего скипа

$$F' = F'_{кол} + F'_{мп} \quad (14.12)$$

$$F = -1414,2 + 73,96 = -1340,25H$$

14.3.13. Мощность двигателя при спуске порожнего скипа

$$P_{сн} = \frac{F' \cdot v_n \cdot \eta}{1 \cdot 10^3} \quad (14.19)$$

$$P_n = \frac{-1340,25 \cdot 2,3 \cdot 0,93}{1 \cdot 10^3} = -2,87кВт$$

14.3.14. Время спуска порожнего скипа, с.

$$t_c = \frac{h}{v_{сн} \cdot \sin \alpha} \quad (14.20)$$

$$t_c = \frac{70}{2,3 \cdot \sin 45^\circ} = 43,04с.$$

Построение графика расходуемой мощности на валу двигателя, при помощи которого можно определить эквивалентную мощность.

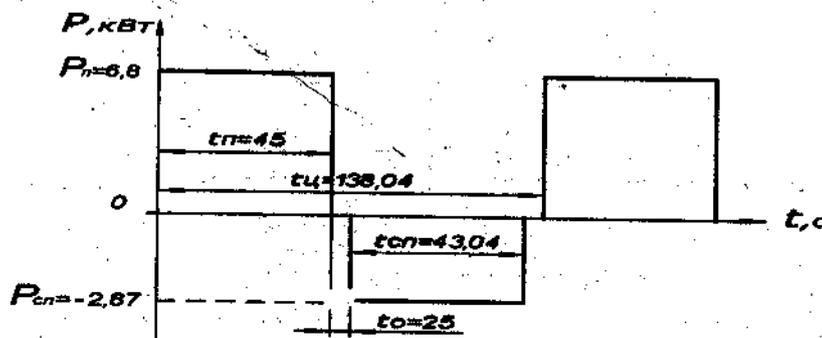


Рис. 14.3. График расходуемой мощности на валу двигателя

14.3.15. Эквивалентная мощность

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_n^2 \cdot t_n \cdot P_{\text{сн}}^2 \cdot t_n}{t_n + t_0 + t_{\text{сн}} + t_0}} \quad (14.21)$$

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{6,8^2 \cdot 45 \cdot 2,87^2 \cdot 43,04}{45 + 25 + 43,04 + 25}} = 4,2 \text{ кВт}$$

14.3.16. Номинальная мощность двигателя

$$P_n = 1,4 \cdot P_{\text{экв}} \quad (14.22)$$

$P_n = 1,4 \cdot 4,2 = 5,88 \text{ кВт}$ , что позволяет принять  $P_n = 6 \text{ кВт}$

#### 14.4. Выбор двигателя

14.4.1. Предварительный выбор двигателя обычно производят из справочной литературы по результатам расчета номинальной мощности.

Таблица 14.1.

Параметры выбранных двигателей

Тип двигателя	U <sub>ном</sub>	n <sub>ном</sub>	P <sub>н</sub>	R <sub>я</sub>	I <sub>ном</sub>	η
	В	Об/мин	кВт	Ом	А	-
П-41	220	3000	6	0,193	33	0,825
П-51	220	1500	6	0,34	33	0,825
2ПН160ЛУ4	220	1000	6	0,34	32,6	0,835
П-62	220	750	6	0,351	39,5	0,81

Окончательно требуется выбрать только один из четырех двигателей. Для этого необходимо построить энергетические характеристики каждого, а затем (по необходимым условиям и параметрам) выбрать соответствующий тип двигателя скипа-подъемника.

14.4.2. Определение характеристик двигателя. Для построения энергетической характеристики каждого двигателя необходимо рассчитать следующие параметры:

- номинальную угловую скорость двигателя

$$\Omega_n = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (14.23)$$

где n — номинальная частота вращения двигателя.

$$\Omega_{П-41} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314,159 \text{ рад/с}$$

$$\Omega_{П-51} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157,08 \text{ рад/с}$$

$$\Omega_{2ПН160ЛУ4} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,72 \text{ рад/с}$$

$$\Omega_{П-62} = \frac{\pi \cdot 750}{30} = 78,54 \text{ рад/с}$$

- номинальный вращающий момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\Omega_n \cdot \eta} \quad (14.24)$$

$$M_{НП-41} = \frac{6000}{314,159 \cdot 0,825} = 23,15 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{НП-51} = \frac{6000}{157,08 \cdot 0,825} = 46,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{2ПН160ЛУ4} = \frac{6000}{104,72 \cdot 0,825} = 68,62 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{НП-62}} = \frac{6000}{78,54 \cdot 0,825} = 94,31 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Так как двигатель постоянного тока допускается перегружать по току в 2-2,5 раза, то значение расчетного крутящего момента можно принять равным  $M_{\text{макс}} = (2-2,5) \cdot M_{\text{ном}}$ .

14.4.3. Построение характеристик выполняется в координатах  $\Omega$  (рад/с),  $P_{\text{энерг}}$  (Вт)

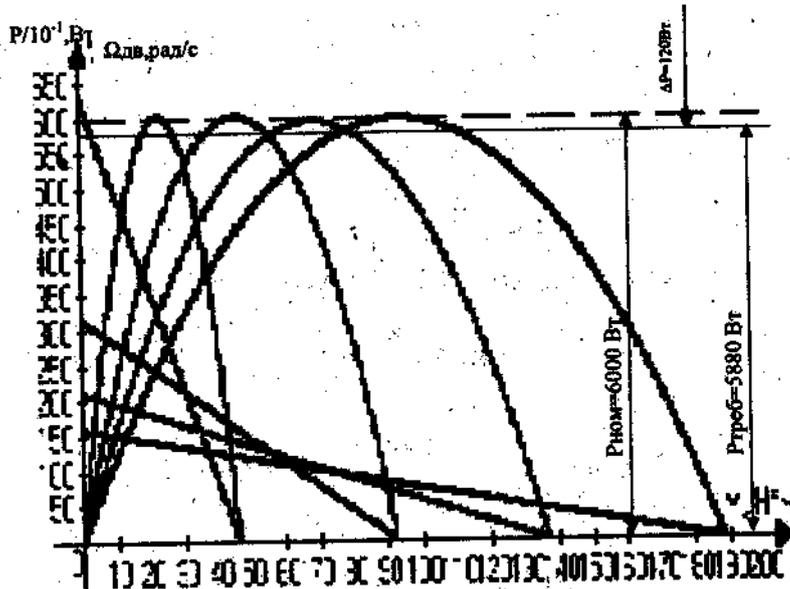


Рис. 14.4. — Энергетические характеристики двигателей,  $P_{\text{ном}} = 6 \text{ кВт}$

14.4.4. Определение требуемых характеристик скипа-подъемника:

требуемый момент для подъема груженого скипа

$$M_{\text{треб}} = G \cdot \frac{D_{\text{бар}}}{2} \quad (14.25)$$

где  $G$  — вес скипа с грузом,  $G = 3863,9 \text{ Н}$ ;  $D_{\text{бар}}$  — диаметр барабана,  $D_{\text{бар}} = 0,4 - 0,5 \text{ м}$ .

$$M_{\text{треб}} = 3863,9 \cdot \frac{0,42}{2} = 811,42 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

• требуемая угловая скорость для подъема груженого скипа

$$\Omega_{\text{треб}} = \frac{2 \cdot V_n}{D_{\text{бар}}}, \quad (14.26)$$

где  $V_n$  — линейная скорость подъема,  $V_n = 2,2 \text{ м/с}$ .

$$\Omega_{\text{треб}} = \frac{2 \cdot 2,2}{0,42} = 10,48 \text{ рад/с}$$

14.4.5. Расчет ориентировочного значения передаточного числа редуктора

$$i'_{\text{ред}} = \frac{M_{\text{треб}}}{M_{\text{дв}}} \quad (14.27)$$

$$i'_{\text{ред1}} = \frac{811,42}{23,15} = 35,08. \quad i'_{\text{ред2}} = \frac{811,42}{46,3} = 17,53$$

$$i'_{\text{ред3}} = \frac{811,42}{68,62} = 11,82. \quad i'_{\text{ред4}} = \frac{811,42}{94,31} = 8,6$$

14.4.6. Определение ожидаемой линейной скорости на выходе редуктора с ориентировочным передаточным числом

$$V'_{\text{ред}} = \frac{\Omega_{\text{треб}}}{i'_{\text{ред}}} \cdot \frac{D_{\text{бар}}}{2} \quad (14.28)$$

$$V'_{ред1} = \frac{314,16}{35,08} \cdot \frac{0,42}{2} = 1,88 \text{ м/с}$$

$$V'_{ред2} = \frac{175,08}{17,53} \cdot \frac{0,42}{2} = 1,88 \text{ м/с}$$

$$V'_{ред3} = \frac{104,72}{11,8} \cdot \frac{0,42}{2} = 1,86 \text{ м/с}$$

$$V'_{ред4} = \frac{78,54}{8,6} \cdot \frac{0,42}{2} = 1,91 \text{ м/с}$$

Так как все значения линейных скоростей перемещения скипа, получаемых после редуктора, значительно меньше требуемой скорости подъема  $V_{п} = 2,2$  м/с, то необходимо применить двигатель с большей мощностью и произвести корректировку реальных передаточных чисел выбранных редукторов.

#### 14.4.7. Корректировка мощности выбранного двигателя

Исходя из массогабаритных параметров, требований, предъявляемых к разрабатываемой ЭМС и ограничений, связанных с выбором редуктора (максимальная скорость вращения быстроходного вала ряда редукторов ограничена 2000 об/мин), выбираем двигатели номинальной мощностью 8 кВт и с максимальной частотой вращения до 1500 об/мин. [6]

Таблица 14.2.

Номинальные параметры выбранных двигателей

Тип двигателя	$U_{ном}$	$n_{ном}$	$P_{н}$	$R_{я}$	$I_{ном}$	$\eta$
	В	Об/мин	кВт	Ом	А	-
П-52	220	1500	8	0,198	43	0,845
2ПФ160LY4	220	1000	8	0,12	43	0,85
П-71	220	750	8	0,443	39,5	0,755

Окончательно требуется выбрать только один из двигателей. Для этого необходимо построить энергетические характеристики для каждого из них, а затем по графику выбрать соответствующий двигатель по требуемым параметрам подъемника.

#### 14.4.8. Определение параметров для построения характеристик двигателя

Для построения энергетических характеристик для каждого двигателя необходимо рассчитать следующие параметры:

- номинальная угловая скорость двигателя

$$\Omega_n = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (14.23)$$

где  $n$  — номинальная частота вращения двигателя.

$$\Omega_{П-52} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157,08 \text{ рад/с}$$

$$\Omega_{ПН160LY} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,72 \text{ рад/с}$$

$$\Omega_{П-71} = \frac{\pi \cdot 750}{30} = 78,54 \text{ рад/с}$$

- номинальный вращательный момент двигателя

$$M_H = \frac{P_H}{\Omega_H \cdot \eta} \quad (14.24)$$

$$M_{НП-52} = \frac{8000}{157,08 \cdot 0,845} = 60,27 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{НПН160LY} = \frac{8000}{104,72 \cdot 0,85} = 89,88 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{НП-62}} = \frac{8000}{78,54 \cdot 0,755} = 134,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Так как двигатель постоянного тока допускает перегрузку по току в 2-2,5 раза, то принимаем максимальный крутящий момент также с кратностью  $M_{\text{макс}} = (2-2,5) \cdot M_{\text{ном}}$

14. 4. 9. На рис. 14.5. приведены доработанные энергетические характеристики ДПТ в координатах  $\Omega$  ( $M$ ), Рэnerg (М).

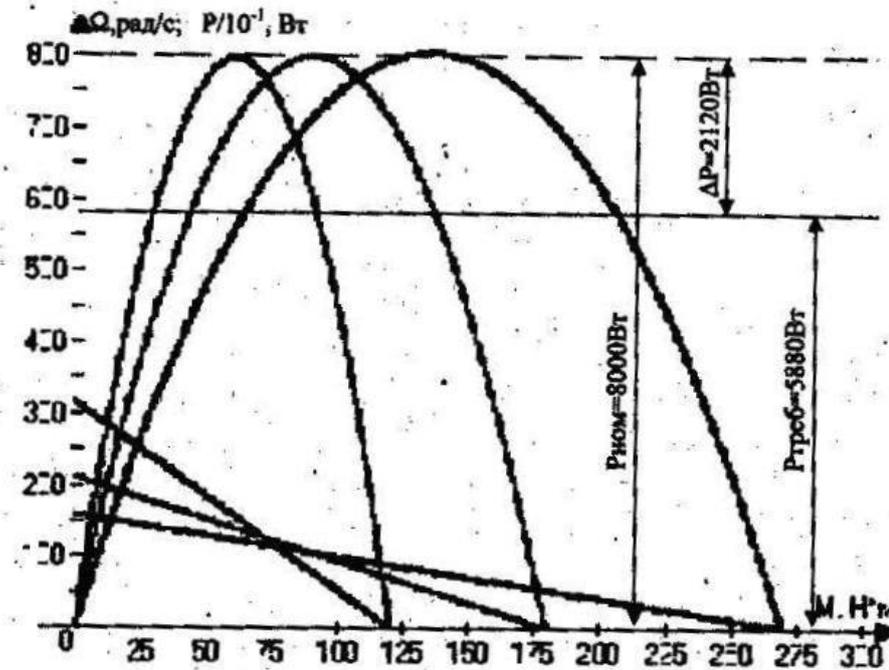


Рис. 14.5. Энергетические характеристики двигателей с  $P_{\text{ном}}=8 \text{ кВт}$

14.4.10. Расчет ориентировочного значения передаточного числа редуктора:

$$i'_{ред} = \frac{M_{\text{треб}}}{M_{\text{дв}}} \quad (14.27)$$

$$i'_{ред1} = \frac{811,42}{60,27} = 13,46 \cdot i'_{ред2} = \frac{811,42}{89,88} = 9,02$$

$$i'_{ред3} = \frac{811,42}{134,91} = 6,014.$$

14.4.11. Определение полученной линейной скорости после редуктора с ориентировочным передаточным числом

$$V'_{ред} = \frac{\Omega_{\text{треб}}}{i'_{ред}} \cdot \frac{D_{\text{бар}}}{2} \quad (14.28)$$

$$V'_{ред1} = \frac{157,08}{13,46} \cdot \frac{0,42}{2} = 2,45 \text{ м/с}$$

$$V'_{ред2} = \frac{104,72}{9,02} \cdot \frac{0,42}{2} = 2,44 \text{ м/с}$$

$$V'_{ред3} = \frac{78,54}{6,014} \cdot \frac{0,42}{2} = 2,47 \text{ м/с}$$

Полученные значения скоростей удовлетворяют принятому условию:

$$V'_{ред} > V_{\text{подъема}}$$

14.4.12 Определение реального передаточного числа и пересчет линейной скорости перемещения скипа с учетом редуктора

Реальное передаточное число выбирается из ряда (для цилиндрических двухступенчатых редукторов): 8; 10; 12, 5; 16; 20; 25; 31.5; 40.

Соответственно выбираем для каждого двигателя ближайшее наибольшее передаточное число.

Для ДПТ П-52 принимаем  $i_{ред} = 16$ ; для ДПТ 2ПФ160LY4 —  $i_{ред} = 10$ ; для ДПТ П-71 —  $i_{ред} = 8$ .

Пересчитаем линейные скорости

$$V_{ред} = \frac{\Omega_H \cdot D_{бар}}{i_{ред} \cdot 2} \quad (14.29)$$

$$V_{ред1} = \frac{157,08 \cdot 0,42}{16 \cdot 2} = 2,062 м/с$$

$$V_{ред2} = \frac{104,72 \cdot 0,42}{10 \cdot 2} = 2,199 м/с$$

$$V_{ред3} = \frac{78,54 \cdot 0,42}{8 \cdot 2} = 2,062 м/с.$$

Исходя из, ранее перечисленных ограничений и оптимальных параметров системы, выбираем двигатель (ДПТ типа 2ПФ160LY4) со следующими параметрами:

- напряжение  $U_{я ном} = 220 В$ ;
- номинальная мощность  $P_{ном} = 8000 Вт$ ;
- номинальный ток якоря  $I_{я} = 43 А$ ;
- КПД  $\eta = 85\%$ ;
- момент инерции якоря двигателя  $J_{дв} = 0,65 кГ \cdot м^2$ ;
- сопротивление якорной обмотки  $R_{я ном} = 0,12 Ом$ ;
- индуктивность якорной обмотки  $L_{я} = 2,2 \cdot 10^{-3}$ .

#### 2.4. Выбор редуктора

##### 14.5 Выбор редуктора

Выбор редуктора осуществляется по параметрам выбранного двигателя и рассчитанным характеристикам:  $i = 10$ ,  $P_{ном} = 8 кВт$ ,  $M_{тр} = 811,42 Н \cdot м$ ; а также геометрическим размерам проектируемого узла, если они указаны в задании.

Для мехатронной системы редуктор является конструктивным элементом, что необходимо учитывать при формировании массогабаритных параметров.

Выбираем редуктор цилиндрический двухступенчатый горизонтальный с зацеплением Новикова типа 1Ц2У-160 с основными параметрами:

1. Крутящий момент на тихоходном валу, Н·м:
  - минимальный ..... 750
  - максимальный ..... 1250
2. Передаваемая мощность, кВт
  - минимальная ..... 5,75
  - максимальная ..... 10,5
3. Допускаемая радиальная консольная нагрузка, приложенная к середине посадочной части тихоходного вала, Н:
  - минимальная ..... 1000
  - максимальная ..... 1450
4. Допускаемая радиальная консольная нагрузка, приложенная к середине посадочной части быстроходного вала, Н:
  - минимальная ..... 9000
  - максимальная ..... 12500
5. Номинальное передаточное число ..... 10
6. КПД, %, не менее ..... 97
7. Межосевое расстояние, мм ..... 160
8. Частота вращения быстроходного вала, об/мин, не более ..... 1800

## 15. Расчет широтно-импульсного преобразователя (ШИП)

### 15.1. Исходные данные для расчета

Рассчитаем транзисторный ШИП для управления двигателем постоянного тока ДПТ (типа 2ПФ160ЛУ4) по цепи якоря в динамическом режиме.

Данные двигателя:

- номинальное напряжение  $U_H = 220$  В;
- номинальная мощность  $P_H = 8000$  Вт;
- номинальный ток якоря  $I_H = 43$  А;
- номинальная частота вращения  $n = 1000$  об/мин;
- момент инерции якоря двигателя  $J_{дв} = 0,65$  кг·м<sup>2</sup>;
- сопротивление якорной обмотки  $R_я = 0,12$  Ом;
- индуктивность якорной обмотки  $L_я = 2,2 \cdot 10^{-3}$ .

Для получения линейных характеристик по каналу управления примем для ШИП симметричный закон коммутации силовых ключей  $\gamma_0 = 0,5$ .

С учетом номинального напряжения  $U_H$ , потерь на силовых ключах в режиме насыщения  $AU_K$  и необходимости 20%-го запаса по напряжению, выбираем источник питания с напряжением

$$U = 1,2 \cdot U_H + 2 \cdot U_K, \quad (15.1)$$

где  $U_K$  — потеря напряжения на насыщенном силовом ключе,  $U_K = 5$  В.

$$U = 1,2 \cdot 220 + 2 \cdot 5 = 274 \text{ В.}$$

Ток якоря двигателя в динамических режимах может превышать  $I_H$  в 2,5-4 раза, поэтому расчетный ток силового транзисторного ключа принимаем

$$I_H = 4 \cdot 43 = 172 \text{ А.}$$

### 15.2 Выбор силовых полупроводниковых элементов

Выбираем для транзисторного ключа IGBT-модуль M2TKI-200-06 со следующими параметрами:

- напряжение коллектор-эмиттер,  $U_{КТ}$ , В .....600
- напряжение насыщения коллектор-эмиттер,  $U_{КТнас}$ , В..... 2,2
- максимальный ток коллектора,  $I_{Кмакс}$ , А.....200
- импульсный ток коллектора,  $I_{КИ}$ , А.....400
- время включения,  $t_{вкл}$ , с ..... $0,07 \cdot 10^{-6}$
- время выключения,  $t_{выкл}$ , с ..... $0,22 \cdot 10^{-6}$
- мощность рассеяния на коллекторе,  $P_{рК}$ , Вт..... 1000
- тепловое сопротивление «переход-корпус»,  $R_{Теп}$ , °С/Вт .....0,35

Выбираем диод, шунтирующий IGBT-модуль в соответствии с [4,9], например, диод Д161-200 со следующими параметрами:

- действующий ток,  $I_{VD}$ , А.....200
- пороговое напряжение,  $U_0$ , В.....1,35
- динамическое сопротивление,  $R_{VD}$ , Ом .....0,002
- сопротивление при типовом охладителе и естественном охлаждении,  $R_{VDТ}$ , °С/Вт.....0,55
- максимальная температура структуры,  $\Theta_{рп}$ , °С ..... 140

### 15.3. Определение оптимальной частоты коммутации ШИП [16]

В связи с применением ненасыщенного ключа коэффициент форсировок на включение и отключение транзисторов принимается:  $K_1=1$  и  $K_2=1$ .

Длительность фронта и спада коллекторного тока силового ключа по паспортным данным силового IGBT-модуля принимают:

$$t_+ = 0,07 \text{ мкс} = 0,07 \cdot 10^{-6} \text{ с;}$$

$$t_- = 0,22 \text{ мкс} = 0,22 \cdot 10^{-6} \text{ с;}$$

Определяют оптимальную частоту коммутации ШИП:

$$f_{onm} = K_f \sqrt[3]{\frac{\alpha_k \cdot R_{я}^2}{L_{я}^2 \cdot (t_+ + t_-)}}, \quad (15.2)$$

где  $K_f = 0,382$  для ШИП с симметричным законом коммутации;

$$\alpha_k = \frac{U}{R_{я} \cdot I_H}, \quad (15.3)$$

$$\alpha_k = \frac{274}{0,12 \cdot 43} = 53,101$$

$$f_{onm} = 0,332 \cdot \sqrt[3]{\frac{53,101 \cdot 0,12^2}{(2,2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot ((0,07 + 0,22) \cdot 10^{-6})}} = 2712 \text{ Гц}$$

Принимаем частоту коммутации  $f_k = 2700$  Гц.

#### 15.4 Определение постоянных и базовых величин, необходимых для расчета электромагнитных нагрузок энергетического канала

Конструктивная постоянная двигателя:

$$C_0 = \frac{U_H - I_H \cdot R_{я}}{\omega_H} \quad (15.4)$$

$$C_0 = \frac{220 - 43 \cdot 0,12}{104,72} = 2,012 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$$

Базовая скорость:

$$\omega_{\sigma} = \frac{U}{C_0} \quad (15.5)$$

$$\omega_{\sigma} = \frac{274}{2,012} = 136,173 \text{ рад/с}$$

Базовый ток:

$$I_{\sigma} = \frac{U}{R_{я}} \quad (15.6)$$

$$I_{\sigma} = \frac{274}{0,12} = 1,269 \cdot 10^3 \text{ А}$$

Базовый момент

$$M_{\sigma} = C_0 \cdot I_{\sigma} \quad (15.7)$$

$$M_{\sigma} = 2,012 \cdot 1269 = 2552 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Учитывая, что ШИП с симметричным управлением не искажает естественных механических характеристик двигателя, определяем относительную продолжительность включения в номинальном режиме:

$$\gamma_H = \frac{\left(\frac{U_H}{U}\right) + 1}{2} \quad (15.8)$$

$$\gamma_H = \frac{\left(\frac{220}{274}\right) + 1}{2} = 0,901$$

Относительная скорость в номинальном режиме:

$$\varpi = \frac{\omega_H}{\omega_{\sigma}} = \frac{104,72}{136,173} = 0,769 \quad (15.9)$$

Относительная электромагнитная постоянная времени:

$$\tau_H = \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}} \cdot T} \quad (15.10)$$

где  $T$  — период коммутации;

$$T = \frac{1}{f_k} = \frac{1}{2700} = 3,704 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (15.11)$$

$$\tau_H = \frac{2,2 \cdot 10^{-3}}{0,12 \cdot 3,704 \cdot 10^{-4}} = 27,5$$

На естественной механической характеристике ДПТ для максимального тока двигателя в динамическом режиме ( $I_{\text{макс}} = 172 \text{ А}$ ) определяем частоту вращения

$$\omega_M = \frac{U_H - I_{\text{тк}} \cdot R_{\text{Я}}}{C_o} = \frac{220 - 172 \cdot 0,12}{2,012} = 90,872 \quad (15.12)$$

а также относительное значение этой скорости

$$\varpi_M = \frac{\omega_H}{\omega_o} = \frac{90,872}{136,173} = 0,667 \quad (15.13)$$

#### 15.5. Среднее значение тока двигателя

$$I_{\text{нсп}} = 2 \cdot \gamma_H - 1 - \varpi_M = 2 \cdot 0,901 - 1 - 0,667 = 0,136 \quad (15.14)$$

$$I_{\text{нсп}} = I_o \cdot I_{\text{нсп}} = 1269 \cdot 0,136 = 172 \text{ А} \quad (15.15)$$

#### 15.6. Действующее значение тока двигателя

$$I_{\text{нд}} = \sqrt{(1 + \varpi_M)^2 - 4 \cdot \varpi_M \cdot \gamma_H - 4 \cdot \tau_H \cdot \frac{(b-1)(a1^2 - b1^{-1} - 1)}{1 - a1^2}}, \quad (15.16)$$

где

$$a1 = e^{-\left(\frac{1}{2 \cdot \tau_H}\right)} = e^{-\left(\frac{1}{2 \cdot 27,5}\right)} = 0,982; \quad b1 = e^{-\frac{\gamma_H}{\tau_H}} = e^{-\frac{0,901}{27,5}} = 0,968$$

$$I_{\text{нд}} = \sqrt{(1 + 0,667)^2 - 4 \cdot 0,667 \cdot 0,901 - 4 \cdot 27,5 \cdot \frac{(0,968 - 1)(0,982^2 - 0,968^{-1} - 1)}{1 - 0,982^2}} = 0,1361$$

$$I_{\text{нд}} = I_o \cdot \bar{I}_{\text{нд}} = 1269 \cdot 0,1361 = 172,016 \text{ А} \quad (15.17)$$

15.7. Значение среднего тока транзисторного ключа при максимальном токе двигателя составит

$$\bar{I}_{\text{мсп}} = (1 - \varpi_M) \cdot \gamma_H - 2 \cdot \tau_H \cdot \left( \frac{(b-1)(a1^2 - b1^{-1} - 1)}{1 - a1^2} \right) \quad (15.18)$$

$$\bar{I}_{\text{мсп}} = (1 - 0,667) \cdot 0,901 - 2 \cdot 27,5 \cdot \left( \frac{(0,968 - 1)(0,982^2 - 0,968^{-1} - 1)}{1 - 0,982^2} \right) = 0,122$$

$$I_{\text{мсп}} = I_o \cdot \bar{I}_{\text{мсп}} = 1269 \cdot 0,122 = 155,053 \text{ А} \quad (15.19)$$

#### 15.8. Значение действующего тока транзисторного ключа

Значение действующего тока транзисторного ключа определяют как

$$I_{\text{мд}} = \sqrt{(1 + \varpi_M)^2 \cdot \gamma_H - 4 \cdot (1 - \varpi_M) \cdot \tau_H \cdot \frac{(b-1)(a1^2 - b1^{-1} - 1)}{1 - a1^2} - 2 \cdot \tau_H \cdot \frac{(b-1)(a1^2 - b1^{-1} - 1)^2}{(1 - a1^2)^2}} \quad (15.20)$$

$$I_{m0} = \sqrt{(1+0,67)^2 \cdot 0,9 - 4 \cdot (1-0,67) \cdot 27,5 \cdot \frac{(0,968-1)(0,982^2 - 0,968^{-1} - 1)}{1-0,982^2}} - 2 \cdot \frac{(0,968-1)(0,982^2 - 0,968^{-1} - 1)^2}{(1-0,982^2)^2} = 0,129$$

$$I_{m0} = I_{\bar{\sigma}} \cdot \bar{I}_{m0} = 1269 \cdot 0,129 = 163,324 \text{ A} \quad (15.21)$$

15.9. Среднее значение тока шунтирующего диода

$$\bar{I}_{vdc} = - \left( (1 - \varpi_M) \cdot (1 - \gamma_H) - 4 \cdot (1 - \varpi_M) - 2 \cdot \tau_H \cdot \left( \frac{(b-1) \cdot (a1^2 - b1^{-1} - 1)}{1 - a1^2} \right) \right) \quad (15.22)$$

$$\bar{I}_{vdc} = - \left( (1 - 0,667) \cdot (1 - 0,901) - 4 \cdot (1 - 0,667) - 2 \cdot 27,5 \cdot \left( \frac{(0,982-1) \cdot (0,982^2 - 0,968^{-1} - 1)}{1 - 0,982^2} \right) \right) = 0,145$$

$$I_{vdc} = I_{\bar{\sigma}} \cdot \bar{I}_{vdc} = 1269 \cdot 0,145 = 183,779 \text{ A} \quad (15.21)$$

15.10. Значение действующего тока шунтирующего диода

$$I_{vdd} = \sqrt{(1 + \varpi_M)^2 \cdot (1 - \gamma_H) - 4 \cdot (1 - \varpi_M) \cdot \tau_H \cdot \frac{(b-1)(a1^2 - b1^{-1} - 1)}{1 - a1^2} - 2 \cdot \tau_H \cdot \frac{(b-1)(a1^2 - b1^{-1} - 1)^2}{(1 - a1^2)^2}} \quad (15.22)$$

$$I_{m0} = \sqrt{(1+0,67)^2 (1-0,901) - 4 \cdot (1-0,667) \cdot 27,5 \cdot \frac{(0,968-1)(0,982^2 - 0,968^{-1} - 1)}{1-0,982^2}} - 2 \cdot 27,5 \cdot \frac{(0,968-1)(0,982^2 - 0,968^{-1} - 1)^2}{(1-0,982^2)^2} = 0,228$$

$$I_{vdd} = I_{\bar{\sigma}} \cdot \bar{I}_{vdd} = 1269 \cdot 0,228 = 289,34 \text{ A} \quad (15.23)$$

15.11. Потери энергии в силовом транзисторном ключе

Потери энергии в силовом транзисторном ключе определяют как

$$P_{mp} = (1 + 2 \cdot \alpha_k \cdot K'_\alpha) \cdot I_k \cdot U \cdot f_k \cdot \frac{t_+ - t_-}{2} + I_{mk}^2 \cdot \eta_{mp} \quad (15.24)$$

где

$$\alpha_k = \frac{I_{\bar{\sigma}}}{I_{mk}} = \frac{1269}{172} = 7,375; \quad (15.25)$$

$$K'_\alpha = 0,116 \cdot \frac{\alpha_k}{\tau_H} = 0,116 \cdot \frac{7,375}{27,5} = 0,031; \quad (15.26)$$

$$\eta_{mp} = \frac{U_{кtnac}}{I_{mk}} = \frac{2,2}{172} = 0,013 \text{ — сопротивление насыщенного ключа} \quad (15.27)$$

$$P_{mp} = (1 + 2 \cdot 7,375 \cdot 0,031) \cdot 172 \cdot 274 \cdot 2700 \cdot \frac{(0,07 + 0,22) \cdot 10^{-6}}{2} + 175^2 \cdot 0,013 = 405,317$$

Полученная величина потерь меньше допустимой мощности рассеяния на коллекторе силового IGBT-модуля.

15.12. Определение потерь мощности в шунтирующем диоде осуществляют по выражению

$$P_{vd} = U_0 \cdot I_{vdc} + I_{vdc}^2 \cdot R_{VD} = 1,35 \cdot 183,779 + 183,779^2 \cdot 0,002 = 315,651 \quad (15.28)$$

15.13. Максимальную температуру структуры диода

Максимальную температуру структуры диода определяют из условия, что температура окружающей среды не превышает  $\Theta_{окр} = 50^\circ\text{C}$

$$\Theta'_{pn} = \Theta_{окр} + P_{vd} \cdot R_{VDT} = 50 + 315,651 \cdot 0,35 = 223,608^\circ\text{C} \quad (15.29)$$

Так как  $\Theta'_{pn} > [\Theta_{pn}] = 140^\circ\text{C}$ , то требуется дополнительное охлаждение диодов для обеспечения соответствующих температурных режимов. В этом случае следует произвести дополнительно расчет радиаторов, выбрать тип охладителя.

#### 15.14. Расчет суммарных дополнительных потерь в системе ШИП-ДПТ

Расчет суммарных дополнительных потерь в системе ШИП-ДПТ в относительных единицах производится по выражению

$$\begin{aligned} \Delta P_{дон} &= \frac{0,118 \cdot \alpha_k}{\tau_n^2} + \frac{(t_+ + t_-) \cdot f_k}{2 \cdot \tau_n} \cdot (1 + 0,232 \cdot \alpha_k) \quad (15.30) \\ &= \frac{0,118 \cdot 7,375}{27,5^2} + \frac{(0,07 + 0,22) \cdot 2700 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 27,5} \cdot (1 + 0,232 \cdot 7,375) = 1,189 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

#### 15.15. Абсолютные дополнительные потери

Абсолютные дополнительные потери определяют как

$$\Delta P_{дон} = I_{mk} \cdot U_n \cdot \Delta P_{дон} = 172 \cdot 220 \cdot 1,189 \cdot 10^{-3} = 45,005 \text{ Вт} \quad (15.31)$$

#### 15.16. Основные потери в цепи якоря двигателя

Основные потери в цепи якоря двигателя составляют

$$\Delta P_{осн} = I_{mk}^2 \cdot R_{я} = 172^2 \cdot 0,12 = 3,55 \cdot 10^3 \text{ Вт} \quad (15.32)$$

#### 15.17. Потери мощности в цепи якоря двигателя

$$\Delta P = \Delta P_{осн} + \Delta P_{дон} = 3,55 \cdot 10^3 + 45 = 3,595 \cdot 10^3 \text{ Вт} \quad (15.33)$$

## 16. Электромагнитные тормозные устройства

Для торможения подвижных звеньев используют управляемые электромагнитные тормозные устройства, в которых источником создания тормозящего момента или усилия является электромагнитное поле, воздействующее прямо на движущиеся элементы (электромагнитные, индукционные и гистерезисные тормоза) или косвенно через порошкообразный сухой или жидкий наполнитель (электромагнитные порошковые тормоза и тормоза с ферромагнитными жидкостями).

По принципу действия и устройству электромагнитные тормозные устройства индукционного и гистерезисного типов аналогичны электрическим двигателям, в которых ротор или статор неподвижен. Взаимодействие между подвижной и неподвижной частями тормоза осуществляется через электромагнитное поле, создаваемое катушкой управления (возбуждения).

По принципу действия электромагнитные тормозные устройства с порошковым и жидким наполнителями, аналогичны, соответственно, фрикционным тормозам и гидравлическим тормозным устройствам дроссельного регулирования. Действие электромагнитного порошкового тормоза фрикционного типа основано на свойстве сухого или взвешенного в масле ферромагнитного порошка увеличивать в магнитном поле свою вязкость и прочно прилипать к поверхности магнитной системы.[9]

При относительном сдвиге рабочих поверхностей тормоза возникает сопротивление сдвигу от трения намагниченных частиц порошка между собой. Наибольший сдвиг испытывают частицы, находящиеся в середине слоя. Сдвиг частиц относительно поверхностей, к которым они прилипают, отсутствует и, следовательно, рабочие поверхности не изнашиваются. При отсутствии магнитного поля сопротивление сдвига порошка и взвеси падает и практически элементы тормоза не связаны друг с другом.

Взвесь ферромагнитного порошка в кремнийорганическом или минеральном масле меняет свою вязкость в магнитном поле, благодаря чему при ее дросселировании достигается эффект переменного гидравлического сопротивления. Регулированием сопротивления дросселя при помощи электромагнитного поля обеспечивают требуемый закон изменения силы торможения.

В (рис. 16.1) диски 1 соединены с помощью шлицевого соединения с полумуфтой 2, а тормозные диски 3-е полумуфтой 4. Зазор между дисками 1 и 3 рекомендуют принимать  $\delta = 0,3 \dots 0,5$  мм. Диски имеют осевую подвижность. Под действием пружины 5 они смещаются и приходят в соприкосновение друг с другом, образуя фрикционные пары.

Число фрикционных пар, необходимое для затормаживания подвижного звена, нагруженного вращающим моментом  $\Gamma$ , находят из условия износостойкости:

$$q = \frac{2KT}{\pi D_{cp}^3 f \cdot \psi \cdot Z} \leq [q]$$

по формуле:

$$Z \geq \frac{2KT}{\pi D_{cp}^3 f \cdot \psi \cdot [q]},$$

где  $q$  - давление на трущихся поверхностях;  $K=1,25 \dots 1,5$  - коэффициент, учитывающий эксплуатационные условия;  $D_{cp}$  — средний диаметр кольца контакта дисков:

$$D_{cp} = \frac{D_H + D_B}{2} = \frac{D_B}{1 - \psi};$$

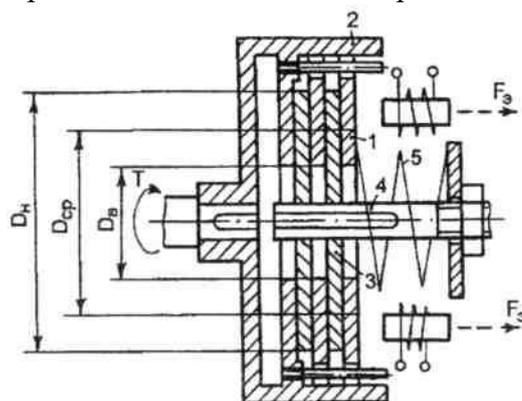


Рис. 16.1. Дисковый электромагнитный тормоз.

$D_H$  — наружный диаметр кольца контакта дисков:  $D_H = D_{cp}(1 + \psi) = (3...5)d$ ,

$d$  — диаметр вала подвижного звена;  $D_B$  - внутренний диаметр кольца контакта дисков:  
 $D_B = (0,5...0,6)D_H$ ,

$\psi$  — коэффициент рабочей ширины дисков:  $\psi = \frac{D_{cp} - D_B}{D_{cp}} = \frac{b}{D_{cp}}$

Принимают  $\psi=0,33...0,11$ , что соответствует  $D_B/D_H=(0,5...0,8)$ . Чаще всего  $\psi=0,25$ ;  $b$  — рабочая ширина дисков:

$$b = \frac{D_H - D_B}{2} = \psi \cdot D_{cp},$$

$[q]$  — допустимое давление на трущихся поверхностях (табл. 16.1);  $f$  — коэффициент трения скольжения материалов дисков (табл. 16.1).

Таблица 16.1

Допускаемые давление и коэффициент трения

Материалы фрикционных пар	Конусный тормоз		Дисковый тормоз	
	$[q]$ , МПа	$f(f_1)$	$[q]$ , МПа	$f(f_1)$
Закаленная сталь	—	—	2...4	0,1
Сталь-чугун	3...4	0,15	2...3	0,15
Сталь-бронза	5...6	0,05	4...5	0,05
Сталь-ферродо	1...2	0,3	2...2,5	0,3
Сталь-текстолит	4...5	0,2	5...6	0,2

Полученное число  $Z$  округляют до целого числа. Число дисков в ведомой части тормоза:

$$Z_{BM} = \frac{Z}{2} + 1,$$

в ведущей части:  $Z_{ВЦ} = \frac{Z}{2}$

Необходимая сила пружины при числе  $Z$  пар тормозных поверхностей равна:

$$F_{np} = cx = \frac{3KT}{Zf} \cdot \frac{D_H^2 - D_B^2}{D_H^3 - D_B^3}$$

где  $c$  - жесткость пружины;  $x$  - деформация пружины.

Растормаживание осуществляют с помощью электромагнитов, суммарное усилие которых должно быть больше силы пружины:

$$nF_3 > F_{np}$$

где  $F_3$  ~ усилие одного электромагнита;  $n$  - число электромагнитов.

Рассмотрим устройство и принцип действия электромагнитного порошкового тормоза (рис. 16.2). Он состоит из корпуса 1, сердечника 2 и крышки 4, выполненных из стали. Тонкостенный малоинерционный стальной цилиндрический ротор 9 укреплен на выходном валу, установленном в подшипниках 6.

На сердечнике намотана обмотка возбуждения 3. Полость, образованная корпусом и сердечником, в которой расположен ротор, заполнена ферромагнитным порошком. Уплотнение подшипников от проникновения

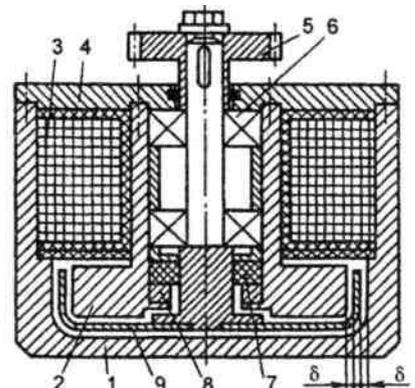


Рис.16.2. Электромагнитный

порошковый тормоз  
 масла фетрового кольца 7 и постоянного кольцевого магнита 8. Связь тормоза с подвижными элементами мехатронного модуля движения осуществляют при помощи шестерни 5.

Под действием электромагнитного поля, создаваемого катушкой управления, расположенный в зазорах порошок группируется и уплотняется. При сдвиге поверхностей ротора относительно стенок корпуса возникает сопротивление, обусловленное трением намагниченных частиц порошка. Удельное усилие сдвига, определяющее тормозной момент, зависит от магнитной индукции в рабочем зазоре, состава порошка и ряда конструктивных параметров тормоза. Развиваемый тормозной момент практически прямо пропорционален току управления и почти не зависит от скорости скольжения. Тормоз с наружным диаметром 100 мм способен развить тормозной момент до 20 Нм при предельных окружных скоростях порядка 10...15 м/с. Остаточный момент при отсутствии тока управления составляет не более 0,5% от номинального момента.

Тормозной момент электромагнитного порошкового тормоза определяют по формуле, Нм :

$$T_{TP} = \frac{\pi K_p \cdot K_B \cdot m \cdot D^3 \cdot P}{2}$$

где  $K_p$  — коэффициент режима работы, равный 1,0 при жесткой фиксации подвижных элементов и 0,7...0,9 - при их проскальзывании;  $D$  — средний диаметр тормоза по рабочим зазорам, мм;  $K_B = \frac{b}{D}$  - коэффициент относительной ширины рабочего зазора;  $m$  — число рабочих зазоров (число слоев порошка);  $P$  — удельная сила сцепления в рабочем зазоре, МПа:

$$P = K_M \cdot K_v \cdot K_3 \cdot K_{II} \cdot B_3^{\Pi},$$

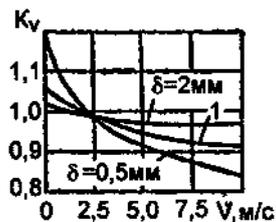
$K_M$  — коэффициент, зависящий от материала наполнителя. Для карбонильного железа и масла, если железо в смеси по объему составляет 0,3...0,45  $K_M=1$  для карбонильного чистого железа с содержанием его в смеси по объему 0,65 —  $K_M=1,4$ ; для карбонильного железа и окиси цинка при содержании железа в смеси по объему 0,5...0,65 —  $K_M = 1,1$ ; для карбонильного железа и двуокиси кремния с тем же содержанием железа -  $K_M=1$ ;  $K_v$  - коэффициент, учитывающий линейную скорость движения частиц в зазоре и зависящий также от величины зазора (рис. 16.3,а);  $K_3$  — коэффициент, учитывающий влияние числа рабочих зазоров на плотность наполнителя; при числе зазоров 1, 2, 4, 6, 8 коэффициент  $K_3$  соответственно равен 1; 0,95; 0,9; 0,8; 0,7;  $K_{II}$  и  $\Pi$  — величины, зависящие от плотности наполнителя и размера зазора (рис. 16.3,б);  $\delta$  - рабочий зазор равный 0,5...3,0 мм.

Намагничивающую силу  $J_w$  (ампер-витки), необходимую для создания индукции  $B_3$ , определяют по формуле:

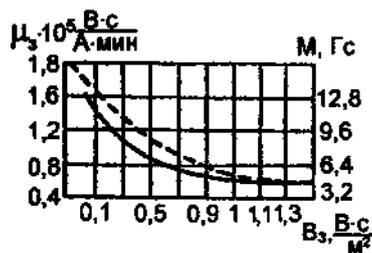
$$J_w = \frac{B_3(m\delta + \alpha)}{\mu_3}$$

где  $\mu_3$  - магнитная проницаемость зазора (рис. 16.3,в). Штриховая кривая соответствует сухому наполнителю;  $\alpha$  - коэффициент, зависящий от индукции  $B_3$  и величины коэффициента  $K_B$  (рис. 16.3,г).

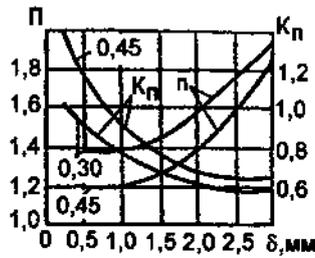
В проектировочных расчетах можно принимать  $P=0,03...0,17$  МПа (большие значения  $P$  соответствуют меньшим значениям  $\delta$ )



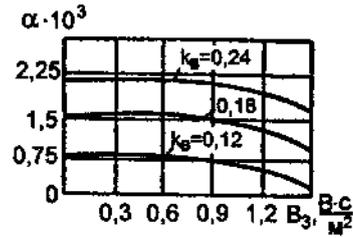
а



б



В



Г

Рис. 16.3. Параметры наполнителя и характеристика зазора

На рис. 16. 4. изображены схемы четырех типов порошковых электромагнитных тормозов, а в табл. 16.3 основные их размеры:

Т а б л и ц а 16.3

'Основные размеры порошковых электромагнитных тормозов

Обозначение размера	Схема		
	а, б	в	г
В	$(0,12...0,3) D$	$(0,12...0,3) D$	$0,4D$
$D_B$	$0,75D$	$\sim D$	$1,25D$
$D_{cp}$	$0,85D$	$1,15D$	$1,40D$
$D_H$	$\sqrt{D(D+4b)}$	$\sqrt{D(1,5D+4b)}$	$\sqrt{D(2,7D+4b)}$

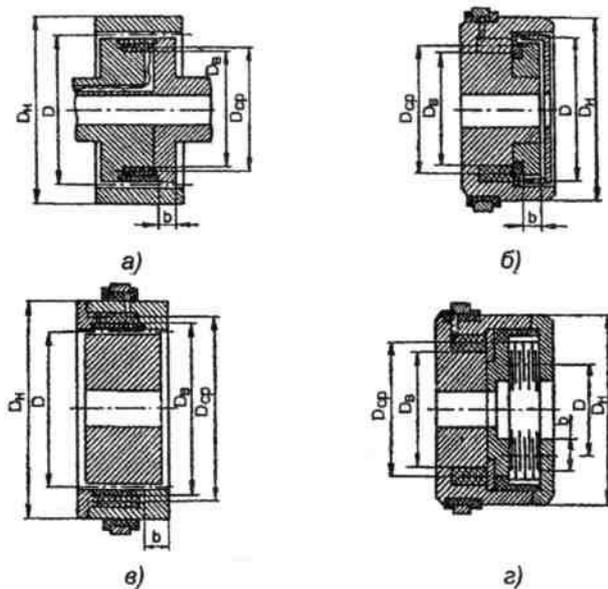


Рис. 16.4. Типы порошковых электромагнитных тормозов

Электромагнитное тормозное устройство с ферромагнитной жидкостью дроссельного типа (рис. 16.5) состоит из гидроцилиндра 2, поршня 7 с катушкой возбуждения 6 и штока 1, возвратной пружины 9, плавающего поршня 4, поджатого пружиной 3. Рабочая 8 и компенсационная 5 полости заполнены ферромагнитной жидкостью. Цилиндр, поршень и шток выполнены из магнитного материала. Обмотки возбуждения проложены в пазах на поршне и соединены последовательно.

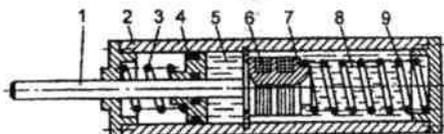


Рис. 16.5. Электромагнитное тормозное устройство

При движении поршня жидкость перетекает из одной полости в другую через узкий кольцевой канал между внутренней цилиндрической поверхностью гильзы цилиндра и поршнем. При отсутствии тока

управления гидравлическое сопротивление канала, зависящее от его геометрических размеров и от вязкости намагниченной жидкости, определяет величину тормозного усилия и скорость поршня. Управление тормозным устройством сводится к изменению вязкости, а следовательно и гидравлического сопротивления, путем создания в кольцевом канале радиального магнитного поля заданной напряженности. Последнее возникает под действием тока управления через обмотку возбуждения и концентрируется в зазоре магнитопровода, т.е. между поршнем и цилиндром.

Рассмотренное устройство может быть использовано и в качестве двустороннего, для чего следует снабдить поршень вторым штоком и убрать возвратную пружину.

## 17. Расчет и выбор параметров сглаживающего фильтра

Для снижения пульсации выпрямленного напряжения на выходе преобразователя-выпрямителя устанавливается сглаживающий фильтр. Эффективность сглаживающего фильтра оценивают по его способности уменьшать амплитуду пульсации, т.е. по значению коэффициента сглаживания  $q_c$ .

### 17.1. Расчет коэффициента сглаживания

$$q_c = \frac{\frac{U'_{(1)m}}{U'_\delta}}{\frac{U''_{(1)m}}{U_\delta}} \quad (17.1)$$

где  $U'_{(1)m}$ ,  $U'_\delta$  — амплитуда основной гармоники пульсаций и постоянная составляющая напряжения на входе фильтра  $U'_{(1)m} = 183,6$  В,  $U'_\delta = 274$  В;  $U''_{(1)m}$ ,  $U_\delta$  — амплитуда основной гармоники пульсаций и постоянная сглаживающая напряжения на выходе фильтра,  $U''_{(1)m} = 1$  В,  $U_\delta = 274$  В.

$$q_c = \frac{\frac{U'_{(1)m}}{U'_\delta}}{\frac{U''_{(1)m}}{U_\delta}} = \frac{\frac{183,6}{274}}{\frac{1}{274}} = 182,24$$

### 17.2. Выбор схемы фильтра

В соответствии с рекомендациями выбираем Г-образный LC-фильтр. Определяем, произведение  $L_\delta \cdot C$

$$L_\delta \cdot C = \frac{q_c + 1}{(m_n \cdot \omega_c)^2} \quad (17.2)$$

где  $m_n$  — частота пульсаций выпрямленного напряжения,  $m_n = 100$  Гц;

$$\omega_c = 314,16 \text{ рад/с} \quad L_\delta \cdot C = \frac{182,24 + 1}{(100 \cdot 314,16)^2} = 1,86 \cdot 10^{-7}$$

### 17.3. Определение минимального значения индуктивности дросселя

$$L_{\delta, \text{мин}} = \frac{2 \cdot R_{нагр}}{(m_n^2 - 1) \cdot m_n \cdot \omega_c} = \frac{2 \cdot 1,5}{(100^2 - 1) \cdot 100 \cdot 314,16} = 9,55 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$$

По рассчитанному значению  $L_{\delta, \text{мин}}$  выбираем стандартный дроссель фильтра ДПМ 200-1000 со следующими параметрами:

- индуктивность дросселя  $L_\delta$ ,  $10^{-6}$  Гн..... 1000
- номинальный постоянный ток, А .....200

### 17.4. Расчет емкости конденсатора фильтра

$$C = \frac{L_\delta \cdot C}{L_\delta} = \frac{1,86 \cdot 10^{-7}}{1 \cdot 10^{-3}} = 1,86 \cdot 10^{-4} \text{ Ф} \quad (17.3)$$

### 17.5. Рабочее напряжение конденсатора

Рабочее напряжение конденсатора при проектировании выбирается больше значения выпрямленного напряжения из выражения

$$U_{сраб} = 1,11 \cdot \sqrt{2} \cdot U_\delta = 1,11 \cdot \sqrt{2} \cdot 272 = 427 \text{ В} \quad (17.4)$$

По рассчитанному значению емкости  $C$  и рабочему напряжению выбираем конденсатор К50-78-450В — 220мкФ  $\pm 20\%$ .

## 18. Кинематическая погрешность цилиндрической зубчатой передачи

Точность работы мехатронного модуля оценивают его погрешностью, т.е. разностью между действительным и расчетным положениями выходного звена. Основными причинами возникновения погрешности мехатронного модуля являются погрешности систем управления и двигателя, кинематические погрешности, мертвые ход и упругие деформации элементов его преобразователей движения.[10]

Из-за наличия погрешностей изготовления зубчатых колес и сборки передачи угол  $\varphi_2$  поворота ведомого колеса реальной зубчаток передачи отличается от угла поворота ведомого колеса идеального механизма при одном и том же значении угла  $\varphi_1$  поворота ведущего зубчатого колеса (рис. 18.1):

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1}{u_{12}} - \frac{\delta\psi}{R_2} = \frac{\varphi_1}{u_{12}} - \delta\varphi_2, \quad (18.1)$$

где  $u_{12}$  - передаточное отношение от первого зубчатого колеса ко второму;  $\delta\psi$  - боковой зазор между зубьями ведущего и ведомого зубчатых колес;  $R_2$  - радиус ведомого зубчатого колеса;  $\delta\varphi_2$  - погрешность положения ведомого колеса.

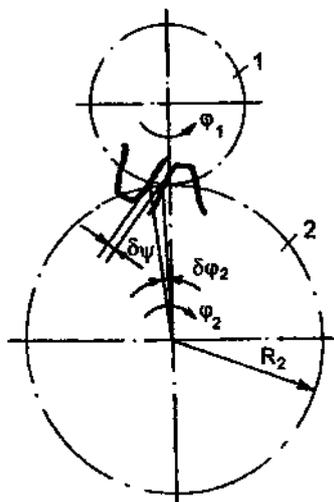


Рис. 18.1. Погрешности изготовления и сборки зубчатых колес

Алгебраическую разность между погрешностями положения ведомого колеса, вызванную погрешностями изготовления и сборки передачи, называют кинематической погрешностью передачи.

Кинематическую погрешность цилиндрической зубчатой передачи определяют методом максимума-минимума и вероятностным методом.

При расчете по методу максимума-минимума минимальное значение кинематической погрешности  $F'_{i0min}$  зубчатой цилиндрической передачи по дуге делительной окружности ведомого

$$F'_{i0min} = AK_s(F'_{i1} + F'_{i2}) \quad (18.2)$$

Максимальное значение кинематической погрешности, мкм:

$$F'_{i0max} = K \left[ \sqrt{(F'_{i1})^2 + (E_{\Sigma M1})^2 + (F'_{i2})^2 + (E_{\Sigma M2})^2} \right], \quad (18.3)$$

где  $A$  - коэффициент, учитывающий степень точности передачи. Для зубчатой передачи 7-й и 8-й степеней точности  $A=0,71$ , для остальных степеней точности  $A=0,62$ ;  $K_s$  и  $K$  - коэффициенты фазовой компенсации, принимаемые в зависимости от передаточного отношения  $u$  по табл. 18.1;  $F'_i$  - допуск, мкм, на кинематическую погрешность колеса:

$$F'_i = F_p + f_f$$

$F_p$  - допуск, мкм, на накопленную погрешность шага зубчатого колеса,  $f_f$  - допуск на погрешность профиля зуба;  $E_{\Sigma M}$  — суммарная приведенная погрешность монтажа, мкм:

$$E_{\Sigma M} = \sqrt{\left(\frac{e_r \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta}\right)^2 + (e_a \cdot \operatorname{tg} \beta)^2}$$

где  $\alpha = 20^\circ$  — угол зацепления, град;  $\beta$  - угол наклона линии зуба, град;  $e_r = F_r$  - монтажное радиальное биение зубчатого колеса, мкм:

$$e_r = 0,85 \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2}$$

$e_i$  - допуски на погрешности, создающие первичные радиальные биения колеса, мкм;  $e_a$  - монтажное осевое биение зубчатого колеса, мкм:

$$e_a = 0,85 \sqrt{\sum_{j=1}^n e_j^2}$$

$e_j$  — допуски на погрешности, создающие первичные осевые биения колеса, мкм.

В предварительных расчетах можно принимать  $e_a = 5 \dots 15$  мкм.

Т а б л и ц а 18.1

Значения коэффициентов фазовой компенсации для зубчатой передачи

$u$	$K$	$K_s$
1,0...1,5	0,98	0,30
1.5...2.0	0,85	0,76
2,0...2,5	0,83	0,75
2.5...3.0	0,93	0,74
3,0...3,5	0,97	0,75
3,5...4,0	0,96	0,80
4,0..4...5	0,96	0,90
4.5...5.0	0,96	0,87
5Д..5.5	0,98	0,85
5.5...6.0	0,96	0,88
6Д..Д5	0,97	0,94
Св. 6,5	0,98	0,99

Примечание. Для передаточных отношений, не выражаемых целым в случае числом, работы передачи в пределах больше одного оборота колеса  $K = K_s = 0,98$

При вероятностном методе расчета максимальное значение кинематической погрешности  $F'_{iop}$  цилиндрической зубчатой передачи, мкм:

$$F'_{iop} = K_p F'_{iop \max}, \quad (18.4)$$

где  $K_p$  — вероятностный коэффициент фазовой компенсации, принимаемый в зависимости от передаточного отношения  $u$  и процента риска  $P$  по табл. 18.2.

Т а б л и ц а 18.2

Значения вероятностного коэффициента фазовой компенсации  $K_p$  для зубчатых передач

P, %	Передаточное отношение $u$											
	1,0... 1 5	1,5... 2,0	2,0... 2,5	2,5... 3,0	3,0... 3,5	3,5... 4,0	4,0.. . 4,5	4,5... 5,0	5,0... 5,5	5,5... 6,0	6,0... 6,5	Св. 6,5
32	0,58	0,68	0,60	0,74	0,71	0,71	0,68	0,71	0,78	0,70	0,78	0,80
10	0,92	0,78	0,73	0,88	0,82	0,82	0,80	0,82	0,90	0,88	0,91	0,94
4,5	0,95	0,83	0,81	0,91	0,92	0,91	0,88	0,92	0,94	0,94	0,94	0,96
1,0	0,96	0,84	0,82	0,92	0,95	0,95	0,94	0,95	0,97	0,95	0,96	0,96

Пересчет значений кинематической погрешности  $F'_{iop}$ , выраженной в мкм, в угловые единицы-минуты, (...'), получим из пропорции

$$\frac{F'_{iop}}{1000\pi d_2} = \frac{\delta\varphi}{360 \cdot 60}$$

где  $d_2$  - диаметр делительной окружности ведомого зубчатого колеса, мм.

Откуда кинематическая погрешность  $\delta\varphi$  цилиндрической зубчатой передачи в угловых единицах, (...'):

$$\delta\varphi = \frac{6,88}{d_2} F'_{io} \quad (18.5)$$

Кинематическая погрешность цилиндрической зубчатой передачи в радианах, (рад):

$$\delta\varphi = \frac{2F'_{io}}{10^3 \cdot d_2} = \frac{1}{500 \cdot d_2} F'_{io} \quad (18.6)$$

### 18.1. Мертвый ход цилиндрической зубчатой передачи.

Разность положений ведомого звена для одинаковых положений ведущего звена при прямом и обратном ходах передачи называют мертвым ходом. Он проявляется в том, что при изменении направления вращения ведущего колеса ведомое некоторое время остается неподвижным.

Алгебраическую разность между погрешностями положений ведомого звена при обратном  $J_{тобр}$  и прямом  $J_{тпр}$  ходах называют погрешностью мертвого хода  $J_t$  передачи:

$$J_t = J_{тобр} - J_{тпр}$$

При расчете по методу максимума-минимума минимальное значение мертвого хода  $J_t$  цилиндрической зубчатой передачи, мкм:

$$J_{t \min} = \frac{J_{n \min}}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} \quad (18.7)$$

где  $J_{n \min}$  - гарантированный боковой зазор, мкм.

Максимальное значение мертвого хода цилиндрической зубчатой передачи, мкм:

$$J_{t \max} = 0,7(E_{HS1} + E_{HS2}) + \sqrt{0,5(T_{H1}^2 + T_{H2}^2) + 2f_a^2 + G_{r1}^2 + G_{r2}^2}, \quad (18.8)$$

где  $E_{HS1}$  и  $E_{HS2}$  - наименьшее смещение, мкм, исходного контура первого и второго колес;  $T_{H1}$  и  $T_{H2}$  - допуск, мкм, на смещение исходного контура первого и второго колес;  $\pm f_a$  - предельное отклонение, мкм, межосевого расстояния (плюс-верхнее, минус-нижнее);  $G_{r1} = e_{r1} = F_{r1}$  и  $G_{r2} = e_{r2} = F_{r2}$  - радиальный зазор (люфт), мкм, в опоре вращения первого и второго колес.

При вероятностном методе расчета максимальное значение мертвого хода, мкм:

$$J_{tp} = K_p J_{t \max} \quad (18.9)$$

Значение мертвого хода в угловых единицах - минутах, (...'):

$$J_\varphi = \frac{6,88}{d_2} J_t \quad (18.10)$$

а так же в радианах, (рад):

$$J_\varphi = \frac{1}{500 \cdot d_2} J_t \quad (18.11)$$

## 19. Датчики информации

Датчик, первичный преобразователь - элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства системы, преобразующий контролируемую величину (давление, температуру, частоту, перемещение, скорость, напряжение, электрический ток и т.п.) в сигнал, удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации, а также для воздействия им на управляемые процессы.

В состав датчика входят воспринимающий (чувствительный) орган и один или несколько промежуточных преобразователей. Часто датчик состоит только из одного воспринимающего органа (например, термopара, тензодатчик).

Выходные сигналы датчиков различают по роду энергии — электрические, механические, пневматические (реже гидравлические), и по характеру модуляции потока энергии — амплитудные, время - импульсные, частотные, фазовые, дискретные (кодовые). Наиболее распространены датчики, действие которых основано на изменении электрического сопротивления, ёмкости, индуктивности или взаимной индуктивности электрической цепи (реостатный датчик, емкостной датчик, индуктивный датчик), а также на возникновении ЭДС при воздействии контролируемых механических, акустических, тепловых, электрических, магнитных, оптических или радиационных величин (тензодатчик, датчик перемещения, пьезо-электрический датчик, датчик давления, фотоэлемент).

В соответствии с классификацией датчик относят к техническим средствам сбора и первичной обработки контрольно - измерительной информации.

Датчики являются одним из основных элементов в устройствах дистанционных измерений, телеизмерений и телесигнализации, регистрирования и управления, робототехники и мехатроники, а также в различных приборах и устройствах для измерений в физике, биологии и медицине для контроля жизнедеятельности человека, животных или растений. В связи с автоматизацией производства важнейшее значение приобрели датчики для измерения и регистрации плотности и концентрации растворов, состава и свойств веществ, динамической вязкости и текучести различных сред, влажности, прозрачности, интенсивности окраски, толщины слоя, температуры, упругости, перемещения, скорости, ускорения и других параметров, характеризующих технологические процессы. Для этого часто используют датчики, основанные на ультразвуковых, радиоволновых, оптических, радиационных и других методах измерений. Для имитации реальных условий при испытании систем автоматического регулирования и в вычислительной технике для решения задач статистическими методами применяют датчики случайных чисел.

Датчики служат для автоматического извлечения информации. Современная измерительная техника может непосредственно оценивать более 300 различных физических, химических и других величин, но этого для автоматизации ряда новых областей человеческой деятельности бывает недостаточно. Экономически целесообразное расширение номенклатуры датчиков в ГСП достигается унификацией чувствительных элементов. Чувствительные элементы, реагирующие на давление, силу, вес, скорость, ускорение, звук, свет, тепловое и радиоактивное излучения, применяют в датчиках для контроля загрузки оборудования и его рабочих режимов, качества обработки, учета выпуска изделий, контроля за их перемещениями на конвейерах, запасами и расходом материалов, заготовок, инструмента и т.д. Выходные сигналы всех этих датчиков преобразуются в стандартные электрические или пневматические сигналы.

### *19.1. Датчики положения и перемещения*

Рассмотрим специфику наиболее часто используемых в мехатронике датчиков. Невозможно представить область, где бы не применялись датчики положения и перемещения, являясь важным связующим звеном между электронной и механической частями мехатронных устройств.

Выбирая датчик, прежде всего необходимо правильно определить приоритеты по следующим критериям: чувствительность, разрешающая способность и точность, линейность,

скорость измеряемого процесса, условия применения и класс защиты, надежность, габаритные размеры, стоимость.

Необходимо учитывать, что датчик может определять абсолютное или относительное положение контролируемого объекта. Исходя из этого, существует два основных метода определения положения и измерения перемещений. При первом методе датчик вырабатывает сигнал, являющийся функцией положения одной из его частей, связанных с подвижным объектом, а изменения этого сигнала отображают перемещение. Такие датчики положения называют абсолютными. К ним относят:

- резистивные (потенциометрические) датчики;
- индуктивные датчики с подвижным сердечником;
- емкостные датчики с подвижными обкладками;
- цифровые кодовые датчики абсолютных значений.

При втором методе датчик генерирует единичный импульс на каждом элементарном перемещении, а положение определяют подсчетом суммы импульсов в зависимости от направления перемещения. Такие датчики положения называют относительными. К ним относят фотоэлектрические (оптоэлектронные) импульсные датчики положения. Достоинством таких датчиков, по сравнению с абсолютными, являются их простота и низкая стоимость, а недостатком - необходимость периодической калибровки и дальнейшей микропроцессорной обработки.

Датчики также делят на контактные и бесконтактные. В бесконтактных датчиках связь между подвижным объектом и датчиком осуществляют посредством магнитного, электромагнитного или электростатического полей, а также оптоэлектронным способом.

Датчики должны иметь конструкцию, позволяющую размещать их в мехатронных модулях движения в местах с ограниченным для установки оборудования объемом; обладать помехоустойчивостью, т.е. возможностью эксплуатации в условиях электромагнитных помех, колебаний напряжения и частоты сети, а также устойчивостью к механическим воздействиям (ударам, вибрациям) и к изменениям параметров окружающей среды (температуры, влажности и т.п.).

К наиболее простым датчикам положения, работающим по принципу «включено - выключено» относят предельные выключатели, микропереключатели, бесконтактные переключатели, фотореле, герконы, путевые датчики сигналов. С их помощью возможно осуществлять контроль пути, пройденного выходным звеном мехатронного модуля движения.

По виду выходного сигнала более сложные датчики делят на аналоговые и цифровые. Развитие цифровых мехатронных систем вызвало потребность в разработке цифровых датчиков, а также устройств сопряжения аналоговых датчиков с цифровыми устройствами. Несмотря на общеизвестные достоинства цифровых датчиков (простое сопряжение с устройствами цифровой обработки сигналов, высокая точность, необходимость только одного маломощного источника питания постоянного тока) применение их ограничено.

Поэтому до настоящего времени электромеханические аналоговые датчики не утратили возможности своего применения в цифровых мехатронных системах. Это связано с высокой степенью отработанности основных конструктивных элементов и узлов аналоговых датчиков и их высокими эксплуатационными достоинствами (высокая точность, надежность в работе, малые масса и габариты), а также с развитием техники аналого — цифрового и аналого — частотного преобразования, проявившимся в разработке миниатюрных и высокочастотных микроэлектронных АЦП и АЧП. К тому же высокочастотные аналоговые датчики электромашиного тока со вторичными преобразователями сопоставимы, а в ряде случаев, и дешевле цифровых датчиков.

### *19.2. Аналоговые датчики положения*

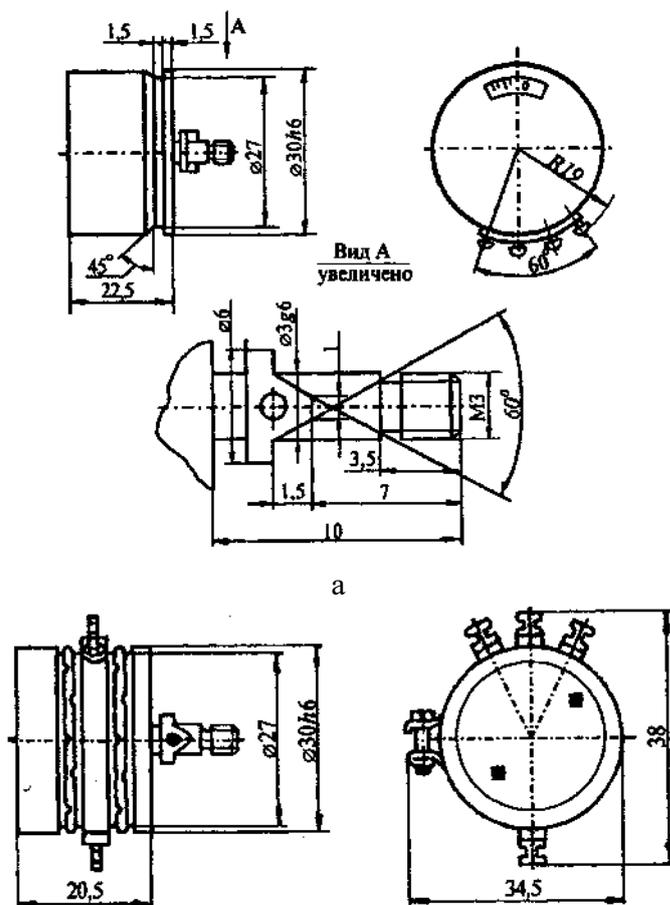
Аналоговые датчики положения нашли широкое применение в различных областях техники. В мехатронных модулях движения могут быть использованы потенциометрические датчики.

Потенциометрические датчики по физическому принципу действия являются электромеханическими реостатными устройствами, в которых выходное напряжение

изменяется пропорционально углу поворота вала. Потенциометры могут быть проволочными и пленочными. По рабочему диапазону их делят на одно- и многооборотные. Проволочные потенциометры отличаются более высокой стабильностью характеристик, но их точность и разрешающая способность ниже, чем у пленочных из-за ступенчатой характеристики, обусловленной дискретным изменением сопротивления при перемещении щетки движка. Кроме того, пленочные потенциометры имеют меньший момент трения, поэтому у них более высокие скорости вращения и более длительный срок службы. Также следует отметить, что многооборотные потенциометры точнее однооборотных.

К достоинствам потенциометрических датчиков относят высокую линейность, простую схему включения и относительно невысокую стоимость. Основные недостатки - наличие механического контакта и сравнительно небольшой срок службы.

Так как потенциометрический датчик имеет ограниченный рабочий диапазон и невысокие допустимые скорости, то его, как правило, соединяют с тихоходным валом мехатронного модуля: либо непосредственно с выходным валом, либо с промежуточным. При согласовании углов поворота валов потенциометра и мехатронного модуля, т.е. при выборе передаточного отношения кинематического преобразователя движения, необходимо наиболее полно использовать рабочий диапазон углов поворота потенциометра, не превышая их предельных значений. Скорость вращения также должны быть меньше допустимой. Если потенциометр имеет механические упоры, ограничивающие диапазон углов поворота, то во избежание его поломки запрещают прикладывать к его валу вращающий момент, больше допустимого. Для обеспечения высокой точности измерений и надежной работы датчика соединение валов потенциометра и мехатронного модуля должно быть безлюфтовым, так как люфт приводит к искажению сигнала по положению.



6



Момент трогания $M \cdot 10^{-4}$ , Н·М	24,5	-	-	19,6
Срок службы, г	3000	10000	10000	3000
Износоустойчивость, цикл	$5 \cdot 10^5$	$10^7$	$10^7$	$25 \cdot 10^3$
Масса, кг	0,030	0,035	0,045	0,140

В цифровых фотоэлектрических кодовых датчиках измеряемое непрерывное значение угла поворота вала преобразуется в цифровой двоичный (реже десятичный) код, т.е. кодовую комбинацию электрических сигналов. В таком виде они могут непосредственно поступать в ЭВМ без дополнительных преобразований.

Наибольшее распространение получили кодовые датчики, выполненные в виде кодирующего диска с фотоэлектрической (оптической) системой считывания. Диск устанавливают на валу датчика, который представляет собой стеклянное основание с кодовой маской, состоящей из кодовых дорожек, число которых равно требуемому числу разрядов выходного сигнала. На дорожке чередуются прозрачные и непрозрачные для света участки, первые имитируют 1, вторые - 0 двоичного кода. Следует отметить, что для устранения неоднозначности при считывании кодовую маску наносят в соответствии с кодом Грея (циклическим кодом), но могут быть использованы и другие коды.

Кодовые датчики, также как и потенциометрические, по величине рабочего диапазона делят на одно- и многооборотные. Они являются датчиками абсолютного отсчета.

Основное достоинство кодовых датчиков — их высокая разрешающая способность. К недостаткам следует отнести конструктивную сложность и громоздкость.

При проектировании мехатронного модуля выбор кодового датчика целесообразен в том случае, если требуется высокая точность перемещения выходного звена, система управления имеет цифровой вход и при этом нет существенных ограничений на массогабаритные показатели.

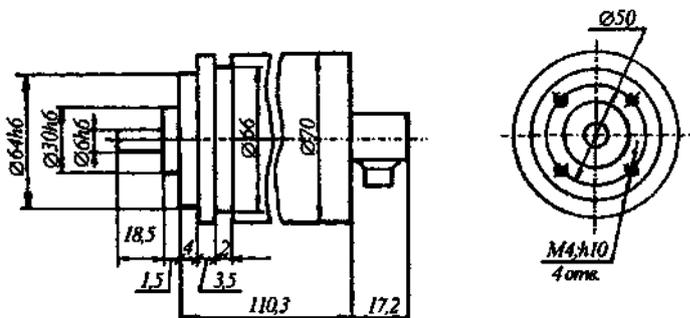


Рис. 19.2. Внешний вид кодового датчика типа ФЭП-15

Внешний вид кодового датчика типа ФЭП-15 показан на рис. 19.2, а технические характеристики приведены в таблице 19.2

Т а б л и ц а 19.2  
Технические характеристики кодового датчика типа ФЭП-15

Наименование характеристики	Значение
Вид выходного сигнала	Двоичный
Объем информации, единиц дискретности	32768 (2048 на 1 об)
Рабочий диапазон, град	0...5760
Погрешность преобразования угла за один оборот	$10^{-33}''$
Наибольшая частота вращения, об/мин	900
Масса, кг	0,8

В цифровых фотоэлектрических импульсных (фотоимпульсных) датчиках измеряемая непрерывная величина угла поворота вала преобразуется в определенное число электрических импульсов, которые в специальных схемах счета импульсов преобразуются в цифровой код.

Импульсный датчик имеет два канала и вырабатывает сигналы прямоугольной формы, сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ , что позволяет определить направление движения звена. Он не имеет ограничений по диапазону углов поворота и измеряет только приращения перемещений (относительное измерение). Для устранения ошибок, вызванных помехами, и организации абсолютного отсчета вводится синхронизирующий импульс (ноль - импульс), который подается в третий канал при каждом проходе через отсчетное положение датчика. Для определения начала отсчета необходимо применение специальных схемных решений и дополнительных калибровочных датчиков, например потенциометров, точных механических упоров с концевыми выключателями, рисок и т.п. Основным показателем импульсных датчиков является разрешающая способность. Импульсные датчики по сравнению с кодовыми имеют более простую конструкцию, но требуют специальных схем счета импульсов и калибровки.

При выборе импульсного датчика необходимо учитывать предельную скорость вращения его вала и требуемую точность позиционирования выходного звена мехатронного модуля.

Соединение валов импульсного датчика и мехатронного модуля производят с помощью специальных соединительных муфт или безлюфтового кинематического преобразователя движения.

Внешний вид импульсных датчиков типов ПУФ-МИНИ, ФЭП и ВЕ-178 показан на рис. 19.3 а и б соответственно, а технические характеристики приведены в табл. 19.3.

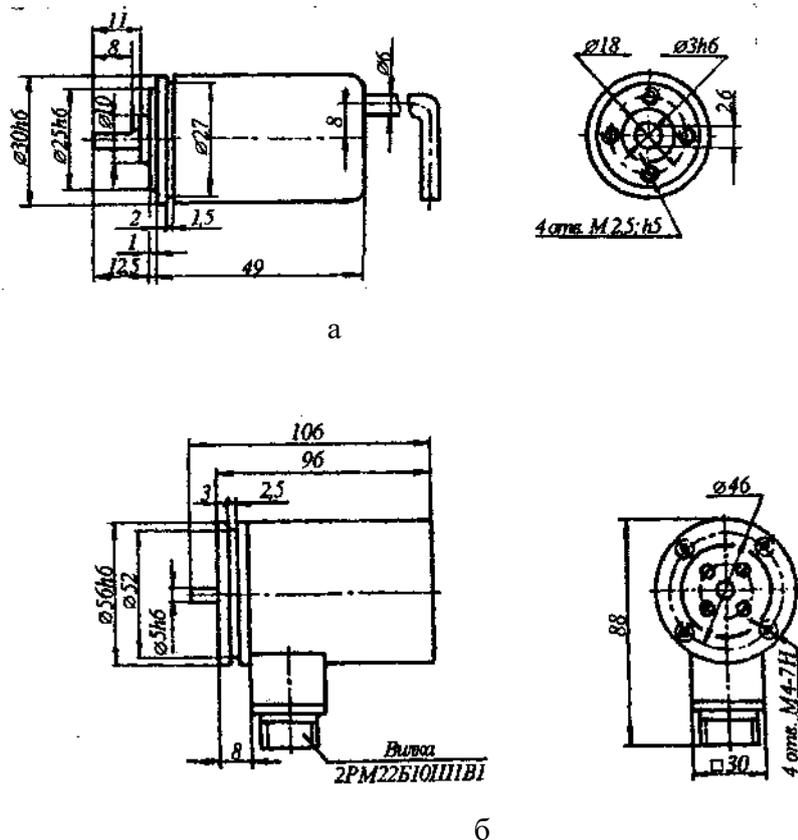


Рис. 19.3. Внешний вид импульсных датчиков

Технические характеристики фотоимпульсных датчиков

Тип датчика	Разрешающая способность, $\gamma$ дискрет/об	Систематическая погрешность за 1 оборот вала (...)	Напряжение питания, В	Напряжение выходных сигналов, В	Максимальная частота вращения вала, об/мин	Статический момент трения, Нм	Средняя наработка до отказа не менее, ч	Масса, кг
ВЕ-178	600 1000 1024 1500 2000 2500	4	$\pm 15$	«0»-1,5 «1»-15	6000 6000 6000 4000 3000 2400	0,04	8000	0,67
ФЭП-4	1000 1024 2048 2500	4	+5	«0» - 0,4 «Б» - 2,4	5000 5000 3000 3000	0,05	16000	0,65
ПДФ-7	225 250 600 625 1024 1250 1500 2000 2500	4	$\pm 15$	«0»-0 «W»-15	6000 6000 6000 6000 5800 4800 4000 3000 2400	0,03	10000	0,35
ПДФ-8	250 256 500 600 625 1024 1250 2048 2500	4	$\pm 15$	«0»-1,5 «1»- 12 $\pm$ 2,4	4000 4000 4000 4000 4000 4000 4000 2400 2400	0,01	10000	0,35
Мини ФЭП	100 128 250 500 512 1000 1 1024	4	+5	«0» - 0,4 «1» - 2,4	6000		10000	0,2

К фотоимпульсным датчикам перемещений относят преобразователи линейных и угловых перемещений ЛИР, выпускаемые Санкт-Петербургским специальным конструкторским бюро станочных информационно-измерительных систем (СКБ ИС). Они предназначены для различных моделей металлорежущих станков и обрабатывающих центров, поворотных систем, приборов, робототехнических комплексов, технологических установок, мехатронных систем и т.п.

Принцип действия преобразователей перемещений ЛИР основан на фотоэлектронном сканировании штриховых растров. В качестве осветителей используют инфракрасные светодиоды, а приемниками излучения служат кремниевые фотодиоды

Принцип действия преобразователей перемещений ЛИР основан на фотоэлектронном сканировании штриховых растров. В качестве осветителей используют инфракрасные светодиоды, а приемниками излучения служат кремниевые фотодиоды.

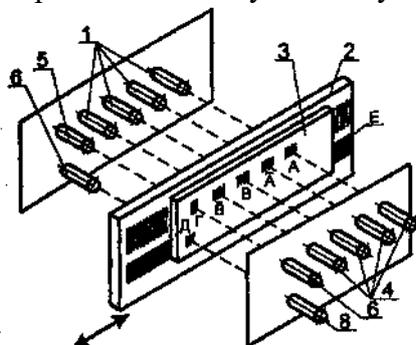


Рис. 19.8. Преобразователь линейных перемещений

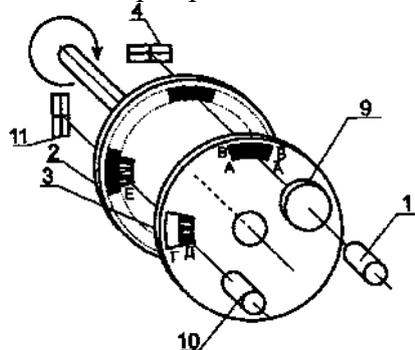


Рис. 19.9. Преобразователь угловых перемещений

Для обеспечения информации о перемещении\_ растровый анализатор имеет поле считывания «А», «А», «В», «В» с шагом растра, соответствующим шагу растра шкалы 2. Эти четыре поля считывания образуют две пары полей «А» - «А» и «В» - «В», в каждом из которых растры имеют пространственный сдвиг относительно друг друга в 1/2 шага растра, что позволяет скомпенсировать постоянную составляющую основного сигнала. Поля одной пары «А» - «А» имеют пространственный сдвиг растров относительно полей другой пары «В» - «В» в 1/4 шага растра.

В преобразователях линейных перемещений (ЛПД) (рис. 19.8) каждое поле считывания растрового анализатора индикаторной пластины 3 имеет собственный источник и приемник излучения, то есть в канале считывания задействованы по четыре светодиода 1 и фотодиода 4.

В преобразователях угловых перемещений (ПУП) (рис. 19.9) все четыре поля считывания охвачены единым параллельным световым пучком, излучаемым светодиодом 1 и сформированным конденсором 9, а фотодиод 4 имеет четыре светочувствительные площадки, включенные определенным образом.

Независимо от формы построения канала считывания, преобразователь перемещений позволяет получить два ортогонально сдвинутых токовых сигнала А и В, позволяющие определить перемещение в пределах шага растра, что дает возможность повысить разрешающую способность преобразователя и определить направление перемещения.

Оптическая схема преобразователя перемещений также содержит канал формирования референтной метки.

В преобразователях линейных перемещений растровая шкала 2 в зоне Е содержит поля референтных меток. Поле референтной метки представляет собой непериодическую (кодую) шкалу, закон формирования которой обеспечивает получение автокорреляционной

функции кода с явно выраженным максимумом. На индикаторной пластине 3 имеется поле считывания Д с кодом, инверсным по отношению к коду референтной метки шкалы, и поле диафрагмы Г, участвующей вместе со светодиодом 5 и фотодиодом 6 в выработке опорного сигнала для формируемого каналом сигнала референтной метки. При относительном перемещении растровой шкалы 2 и индикаторной пластины 3 в зоне совмещения поля референтной метки и поля считывания Д происходит модуляция светового потока, излучаемого светодиодом 1, и на выходе фотодиода 8 формируется токовый сигнал автокорреляционной функции кода референтной метки.

В преобразователях угловых перемещений сигнал референтной метки вырабатывается в общем случае один раз за оборот вала. В канале формирования референтной метки для выработки опорного сигнала и сигнала референтной метки задействованы общий светодиод 10 (рис. 19.9) и фотодиод 11, идентичный фотодиоду 4, но с другой схемой включения светочувствительных площадок. Опорный сигнал вырабатывается с помощью поля диафрагмы Г индикаторного лимба 3, а специальный код поля референтной метки Е измерительного лимба 2 и инверсный код поля считывания Д, в случае их совмещения при относительном перемещении лимбов, модулирует световой поток, что приводит к формированию на выходе фотодиода токового сигнала автокорреляционной функции кода референтной метки.

Максимальный диапазон преобразования линейных перемещений — 3220 мм, угловых - неограничен.

Преобразователи линейных перемещений выпускают 4 и 3 классов точности, а преобразователи угловых перемещений, в зависимости от моделей, — 8...3 классов точности.

Каждому  $i$  — му классу точности соответствует предельная погрешность перемещения  $\Delta_i$  — наибольшее отклонение от действительного значения между двумя любыми точками во всем диапазоне перемещения. Для преобразователей линейных перемещений  $i$  — го класса соответствует предельная погрешность, мкм:  $\Delta_4 = 5,0 + 8,0L$ ;  $\Delta_3 = 2,0 + 4,5L$ ;  $\Delta_2 = 1,0 + 2,5L$ ; для преобразователей угловых перемещений  $i$  — го класса соответствует предельная погрешность, (...):  $\Delta_8 = 300''$ ;  $\Delta_7 = 150''$ ;  $\Delta_6 = 60''$ ;  $\Delta_5 = 30''$ ;  $\Delta_4 = 7,5''$ ;  $\Delta_3 = 2,5''$ .

Преобразователи линейных перемещений имеют степень защиты IP64, IP53, IP50, преобразователи угловых перемещений - IP65, IP64, IP50 по ГОСТ 14254-80. Первая цифра шифра характеризует степень защиты от воздействия твердых тел, вторая цифра - степень защиты от воздействия воды.

Типы выходных сигналов преобразователей перемещений: синусный токовый сигнал типа СТ, синусный сигнал напряжения типа СН, прямоугольный импульсный сигнал типа ПИ.

## 20. Надежность мехатронных модулей

Надежность (общая) — свойство объекта (изделия) сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях эксплуатации.

Современные мехатронные модули состоят из различных взаимодействующих механических, электромеханических, электронных и информационных устройств. Отказ в работе хотя бы одного элемента такой сложной системы может привести к нарушению работы всего мехатронного модуля.

В теории надежности рассматривают следующие обобщенные объекты:

изделие — единица продукции, выпускаемая данным предприятием, цехом и т. д. (например подшипник, зубчатое колесо, электродвигатель, мехатронный модуль, мехатронное устройство, промышленный робот);

элемент — простейшая при данном рассмотрении составная часть изделия, состоящая из одной или нескольких деталей;

система — совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Понятия элемента и системы трансформируются друг в друга в зависимости от поставленной задачи. Мехатронный модуль при установлении его собственной надежности рассматривают как систему, состоящую из отдельных элементов — преобразователей движения, деталей и т.д., а при изучении надежности работа - как элемент.

Надежность характеризуют следующими основными состояниями и событиями.

Работоспособность — состояние изделия при котором оно способно нормально выполнять заданные функции.

Исправность - состояние изделия, при котором оно удовлетворяет всем не только основным, но и вспомогательным требованиям.

Неисправность — состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации. Различают неисправности не приводящие к отказам, и неисправности и их сочетания приводящие к отказам.

Отказ - событие, заключающееся в полной или частичной утрате работоспособности. Их делят на отказы функционирования, при которых выполнение своих функций рассматриваемым элементом или объектом прекращается (например, поломка зубьев зубчатого колеса), и отказы параметрические, при которых некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах (например, изменение точности работы мехатронного модуля). Отказы делят на внезапные (поломки от перегрузок, заедания), постепенные по развитию и внезапные по проявлению (усталостные разрушения, перегорания ламп, короткие замыкания из-за старения изоляции) и постепенные (износ, старение, коррозия, залипание).

По причинам возникновения отказы делят на конструкционные, вызванные недостатками конструкции, технологические, вызванные несовершенством или нарушением технологии, и эксплуатационные, вызванные неправильной эксплуатацией.

Отказы в соответствии со своей физической природой бывают связаны с разрушением деталей или их поверхностей (поломки, выкрашивание, износ, коррозия, старение) или не связаны с разрушением (засорение каналов подачи рабочей жидкости в гидроприводах, ослабление соединений, загрязнение или ослабление электроконтактов).

По возможности дальнейшего использования изделия отказы разделяют на полные, исключающие возможность работы изделия до их устранения, и частичные, при которых изделие может частично использоваться.

По сложности устранения различают отказы, устранимые в порядке технического обслуживания, в порядке среднего или капитального ремонта и по месту устранения - устранимые в эксплуатационных и стационарных условиях.

По времени возникновения отказы делят на приработочные, возникающие в первый период эксплуатации, связанные с отсутствием приработки и с попаданием на сборку дефектных элементов; при нормальной эксплуатации (за период до появления износных отказов); износные.

В период нормальной эксплуатации мехатронного модуля постепенные отказы еще не проявляются и надежность характеризуется внезапными отказами. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность, не зависящую от продолжительности предшествующей эксплуатации изделия:

$$\lambda(t) = \lambda = const,$$

где  $\lambda = \frac{1}{m_t}$  - постоянная интенсивность отказов;  $m_t$  — средняя наработка до отказа (обычно в часах). Тогда  $X$  выражают числом отказов в час.

В этом случае вероятность безотказной работы:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt}$$

Она подчиняется экспоненциальному закону распределения времени безотказной работы. Если, как обычно,  $\lambda t < 0,1$ , то

$$P(t) \approx 1 - \lambda t$$

Плотность распределения:

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

Значения вероятности безотказной работы в зависимости от  $\lambda(t) \cdot t \approx \frac{t}{m_t}$

$\lambda(t) \cdot t$	1	0,1	0,01	0,001	0,0001
$P(t)$	0,368	0,9	0,99	0,999	0,9999

Так как при  $\frac{t}{m_t} = 1$  вероятность  $P(t) = 0,368$ , то 63,2% отказов возникает за время  $t < m_t$  и

только 36,8% позднее. Для обеспечения вероятности безотказной работы 0,9 или 0,99 можно использовать только малую долю среднего срока службы (соответственно 0,1 или 0,01).

Если работа изделия происходит при разных режимах, а следовательно, и интенсивностях отказов  $\lambda_1$  (за время  $t_1$ ) и  $\lambda_2$  (за время  $t_2$ ), то:

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}$$

Для определения на основании опытов интенсивности отказов оценивают среднюю наработку до отказа:

$$m_t \approx \bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K t_i,$$

где  $N$  - общее число наблюдений (изделий);  $t_i$  - длительность  $i$ -го промежутка времени;  $K$  — число промежутков времени.

Тогда

$$\lambda = \frac{1}{\bar{t}}.$$

Среднее число  $n$  изделий, которое выйдет из строя к заданному моменту времени при  $\lambda t < 0,1$ :  $n \approx N \cdot \lambda t$

и среднее число  $N_p$  изделий, которые останутся работоспособными:  $N_p \approx N(1 - \lambda t)$

### 20.1. Надежность в период постепенных отказов.

Для постепенных (износных) отказов справедлив закон распределения, который дает вначале низкую плотность вероятности отказов, затем максимум и далее падение, связанное с уменьшением

ем числа элементов, оставшихся работоспособными. Наиболее универсальным, удобным и широко применяемым для практических расчетов является нормальное распределение.

Плотность распределения:

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-m)^2}{2S^2}}$$

Распределение имеет два независимых параметра: среднюю наработку до отказа (математическое ожидание):

$$m_i \approx \bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K t_i$$

и среднее квадратическое отклонение

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^K (t_i - \bar{t})^2}$$

Расстояние случайных величин удобно также характеризовать дисперсией  $D = S^2$  и коэффициентом вариации  $V = \frac{S}{\bar{t}}$

Так как интегральная функция распределения равна:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt,$$

то вероятность отказа и вероятность безотказной работы соответственно равны:

$$\begin{aligned} Q(t) &= F(t); \\ P(t) &= 1 - F(t) \end{aligned}$$

Вычисление интегралов заменяют использованием таблиц для так называемого центрированного и нормированного распределения, в котором  $m_x=0$  и  $S_x=1$ . Для этого распределения функция плотности:

$$f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}}$$

имеет одну переменную  $x$ . Функцию плотности распределения записывают в относительных координатах с началом на оси симметрии петли.

Функция распределения представляет собой интеграл от плотности распределения:

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^x f_0(x) dx$$

Из этого уравнения следует:

$$F_0(x) + F_0(-x) = 1$$

откуда

$$F_0(-x) = 1 - F_0(x)$$

Плотность распределения, вероятность отказа и вероятность безотказной работы определяют по формулам:

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{f_0(x)}{S} \\ Q(t) &= F_0(t); \\ P(t) &= 1 - F_0(t) \end{aligned}$$

где  $x = \frac{t - m_i}{S}$  - квантиль нормированного нормального распределения, обычно обозначаемая

$U_P$ ;  $f_0(x)$  и  $F_0(x)$  берут по таблицам. Например:

Таблица 20.1

$x=U_P$	0	1	2	3	4
$f_0(x)$	0,3989	0,2420	0,0540	0,0044	0,0001

$F_0(x)$	0,5	0,8413	0,9772	0,9986	0,9999
----------	-----	--------	--------	--------	--------

В табл. 20.1 приведены значения  $P(t)$  в зависимости от  $x = U_p = \frac{t - m_t}{S}$

Значение времени  $t$  при заданной вероятности безотказной работы  $P(f)$  определяют по зависимости:  $t = m_t + U_p$

Часто вместо интегральной функции распределения  $F_0(x)$  используются функцией Лапласа:

$$\Phi(x) = \int_0^x f_0(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}}$$

В этом случае:

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^0 f_0(x) dx + \int_0^x f_0(x) dx = 0,5 + \Phi(x)$$

Вероятность отказа и вероятность безотказной работы:

$$Q(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - m_t}{S}\right);$$

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{S}\right).$$

совместном действии внезапных и постепенных отказов вероятность безотказной работы изделия за период  $t$ , если до этого оно проработало время  $T$ , равно:

$$P(t) = P_B(t) \cdot P_{\Pi}(t),$$

где  $P_B(t) = e^{-\lambda t}$  — вероятность отсутствия внезапных отказов;

$$P_{\Pi}(t) = \frac{P_{\Pi}(T+t)}{P_{\Pi}(T)} \text{ — вероятность отсутствия постепенных отказов.}$$

Существуют и другие распределения случайной величины: логарифмически нормальное распределение, в котором по нормальному закону распределяется логарифм наработки, гамма- распределение, распределение Вейбулла, являющееся довольно универсальным, охватывающим путем варьирования параметров широкий диапазон случаев изменения вероятностей. Однако оперирование этими распределениями сложнее.

### 20.2. Надежность сложных систем.

Мехатронный модуль представляет собой сложную систему, состоящую из множества различных элементов, соединенных между собой различными способами. Поэтому расчет надежности ММ проводят с учетом надежности составляющих его элементов и схемы их соединения

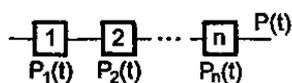


Рис. 20.1

При последовательном соединении независимых элементов (рис. 20.1) отказ одного элемента приводит к отказу всей системы.

Вероятность безотказной работы системы при последовательном соединении элементов равна произведению вероятностей безотказной работы ее отдельных:

$$P_{\Pi}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (20.1)$$

где  $P_i(t)$  — вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента системы. Если

$$P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_m(t) = P(t)$$

то

$$P_{\Pi}(t) = P^n(t)$$

Обычно вероятность безотказной работы элементов достаточно высокая. Поэтому, выразив  $P_i(t) = 1 - Q_i(t)$  и подставив в формулу (20.1), после преобразований и отбрасывания произведений малых величин, получим:

$$P_{\Pi}(t) = \prod_{i=1}^n [1 - Q_i(t)] \approx 1 - \sum_{i=1}^n Q_i(t)$$

При

$$Q_1(t) = Q_2(t) = \dots = Q_n(t) = Q(t),$$

будем иметь:

$$P_{\Pi}(t) \approx 1 - n \cdot Q(t)$$

Надежность сложных систем с последовательным соединением элементов низкая. Например, при числе элементов системы  $n=10$  с вероятностью безотказной работы каждого элемента  $P(t)=0,9$  (как подшипника качения), общая вероятность безотказной работы системы равна:

$$P_{\Pi}(t) = P_n(t) = 0,9^{10} \approx 0,35$$

При параллельном соединении независимых элементов (рис. 20.2) отказ системы происходит при отказе всех включенных параллельно элементов. В этом случае вероятность безотказной работы равна:

$$P_{\text{пар}}(t) = \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)] \approx 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - Q_i(t)$$

Если

$$P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_n(t) = P(t)$$

то

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - [1 - P_i(t)]^n = 1 - Q_i^n(t)$$

При тех же данных, что и в примере для последовательного соединения элементов вероятность безотказной работы при параллельном соединении элементов равна:

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - [1 - P_i(t)]^n = 1 - (1 - 0,9)^{10} = 1 - 0,1^{10} \approx 1$$

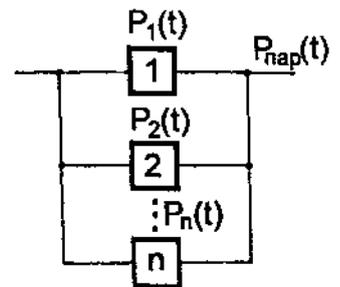


Рис. 20.2

## 21. Диагностика мехатронных систем автомобилей

Определяющее значение, которое принадлежит электронной системе в автомобиле, заставляет уделять повышенное внимание проблемам, связанным с их обслуживанием. Решение этих проблем заключается во включении функций самодиагностики в электронную систему. Реализация этих функций основана на возможностях электронных систем, уже использующихся на автомобиле для непрерывного контроля и определения неисправностей в целях хранения этой информации и диагностики.

Развитие электронных систем управления двигателем и трансмиссией привело к улучшению эксплуатационных свойств автомобиля.

На рис. 21.1 показан пример электронной системы управления трансмиссией автомобиля. На основании сигналов датчиков ЭБУ вырабатывает команды на включение и выключение сцепления. Эти команды подаются на электромагнитный клапан, который осуществляет включение и выключение привода сцепления. Для переключения передач используются два электромагнитных клапана. Сочетанием состояний «открыт-закрыт» этих двух клапанов гидравлическая система задает четыре положения передач (1, 2, 3 и повышающая передача). При переключении передач сцепление выключается, исключая последствия изменения момента, связанного с переключением передач.

Законы управления (программы) переключения передач в автоматической трансмиссии обеспечивают оптимальную передачу энергии двигателя колесам автомобиля с учетом требуемых тягово-скоростных свойств и экономии топлива. При этом программы достижения оптимальных тягово-скоростных свойств и минимального расхода топлива отличаются друг от друга, так как одновременное достижение этих целей не всегда возможно. Поэтому в зависимости от условий движения и желания водителя можно выбрать с помощью специального переключателя программу «экономия» для уменьшения расхода топлива, программу «мощность»-

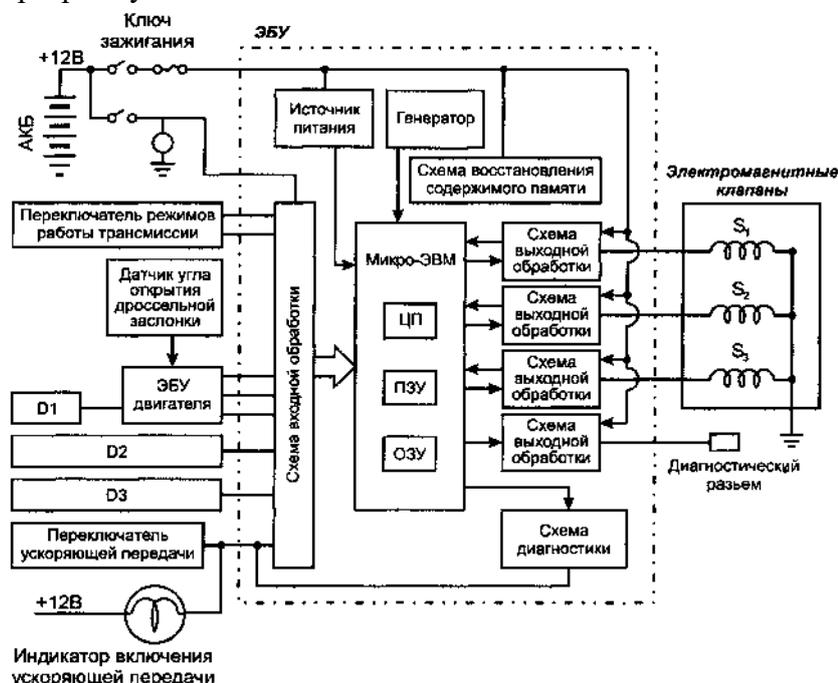


Рис.21.1 Система управления трансмиссией:  $D_1$  - датчик температуры охлаждающей жидкости;  $D_2$  - датчик скорости автомобиля, установленный в спидометре;  $D_3$  - датчик скорости автомобиля, установленный в автоматической трансмиссии



Рис.21.2. Структурная схема самодиагностики мехатронных систем автомобилей

- для улучшения тягово-скоростных свойств или программу «ручное», чтобы перейти на переключение передач водителем.

На рис. 21.2. приведена структурная схема самодиагностики мехатронных систем автомобилей.

Электронный блок управления (ECU) производит самопроверку своего функционирования следующим образом: программируемые чипы памяти снабжены тестовыми комбинациями, которые могут восстанавливаться и использоваться в целях сравнения. Для запоминающих устройств применяется сравнение с итоговыми данными испытаний для гарантии того, что все данные и программы хранятся в этих устройствах правильно.

Возможности самодиагностики включают: идентификацию системы и ECU; распознавание, хранение и считывание информации о статических и единичных нарушениях работы; считывание текущих реальных данных, включающих условия окружающей среды и спецификации; моделирование функций системы; программирование параметров системы.

Отдельные программы для испытательного блока хранятся в подключаемых модулях, в то время как корректировка и передача данных в системе осуществляются посредством интерфейса данных.

Бортовая система контроля и диагностики (БСКД), например автомобиля МАЗ, предназначена для:

- обеспечения диагностирования бортовых электронных систем по интерфейсу ISO 9141 непосредственно на автомобиле;
- контроля осевой нагрузки и режимов работы автомобиля;
- отсчета текущего времени и соответственно отображения контролируемых параметров и текущего времени на ЖК-индикаторе (экране) блока контроля, установленного на панели приборов без применения внешних устройств.

Система БСКД позволяет произвести диагностику электронных систем автомобиля (ABS/ASR, ECAS, EDC двигателя) по протоколу ISO 9141. Диагностика включает в себя чтение данных из энергонезависимой памяти электронных блоков: серийный номер блока; версия программного обеспечения блока; дата изготовления блока; чтение памяти ошибок; стирание памяти ошибок.

Процесс диагностики начинается с инициализации систем- обнаружения их в составе электрооборудования автомобиля. При успешной инициализации возможно: прочесть память ошибок; произвести стирание памяти ошибок; просмотреть данные следующей

обнаруженной системы или выйти в главное меню; изменить показания выбранного разряда; осуществить коррекцию текущего времени; произвести коррекцию текущей даты и выполнить ряд дополнительных функций.

Одной из важных особенностей двигателя MAN D2866-LF2, установленного на автомобиле МАЗ, является наличие Electronic Diesele Control(EDC) - электронной системы управления (ЭСУ) со встроенной системой диагностики. При каждом включении или выключении замка включения стартера и приборов, а также на протяжении всего периода работы двигателя с помощью ЭСУ осуществляется диагностика состояния электрических цепей и параметров встроенных датчиков (температуры, давления наддува и т. д.) и исполнительного механизма подачи топлива двигателя. В случае возникновения неисправностей или нарушения заданных параметров загорается контрольная лампа, корректируется режим работы двигателя (например, уменьшается подача топлива, снижается мощность) и записывается код неисправностей в память электронного блока управления (ЭБУ).

Коды неисправностей записываются в двух микросхемах памяти. Одна из микросхем памяти содержит коды, другая - информацию о неисправностях, которую можно считать и стереть только с помощью компьютерной контрольно-диагностической системы MAN-CATs. Стирание содержимого памяти первой микросхемы не влияет на содержание памяти второй микросхемы. Одновременно в памяти одной микросхемы может содержаться информация только о пяти неисправностях. При устранении (исчезновении) неисправности, записанной однажды в памяти микросхемы, информация о ней автоматически стирается из памяти обеих микросхем (если в течение 100 включений или выключений замка включения стартера и приборов данная неисправность не повторялась).

Простейшая диагностика неисправностей EDC может быть произведена нажатием кнопки диагностики EDC панели приборов. При этом коды неисправностей определяют по числу и длительности вспышек контрольной лампы «EDC», а виды неисправностей определяются по таблицам кодов.

Углубленная диагностика и установка параметров системы могут быть произведены с помощью компьютерной контрольно-диагностической системы (КДС) MAN-CATs.

Упрощенная диагностика неисправностей с помощью световых мигающих кодов. Диагностика неисправностей с помощью световых мигающих кодов может производиться как при работающем, так и при неработающем двигателе.

Для входа в режим диагностики необходимо в течение 3 с (но не более 10 с) нажать на кнопку диагностики EDC, а затем отпустить. Во время нажатия кнопки на щитке приборов загорается контрольная лампа «EDC», которая после отпускания кнопки гаснет (это позволяет также проверить исправность лампы). Если в системе есть неисправность, то по истечении 3 с после отпускания кнопки лампа «EDC» начинает мигать, выдавая световой код неисправности длинными (в течение 2 с) и короткими (в течение 0,5 с) вспышками. При этом сначала выдается код только одной (последней) неисправности. Для вызова кода следующей неисправности необходимо вновь нажать и отпустить кнопку диагностики EDC. Процесс вызова кодов неисправностей необходимо продолжать до тех пор, пока не повторится код, вызванный первым.

В качестве примера считывания светового кода приведена временная диаграмма (рис.21.3) кода 2-4 (неисправность выключателя холостого хода датчика положения педали подачи топлива).

После нажатия и отпускания кнопки диагностики EDC происходит следующее: пауза перед началом выдачи кода - 3 с; длинная вспышка - 2 с; пауза между вспышками - 1 с; длинная вспышка - 2 с; пауза между вспышками - 5 с; четыре короткие вспышки по 0,5 с с паузами по 0,5 с.

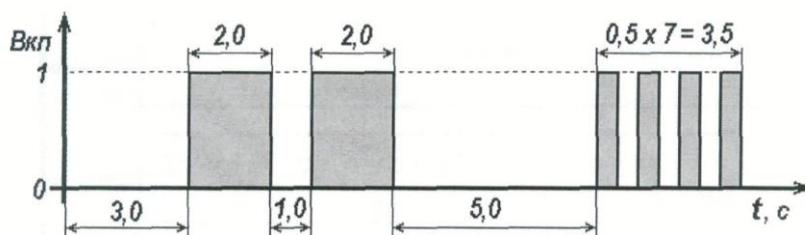


Рис.21.3. Временная диаграмма светового кода 2-4

После считывания кодов и устранения неисправностей производится очистка памяти ошибок (световых кодов). При этом все коды устраненных неисправностей стираются из памяти ЭБУ. Если после стирания в памяти остались какие-либо коды, то это означает, что какая-то неисправность не устранена и стереть ее код можно лишь после устранения неисправности.

При возникновении трудностей в определении неисправности по световым мигающим кодам проводятся анализ вероятных причин и комплексная диагностика EDC с помощью КДС MAN-CATs.

Компьютерная (углубленная) диагностика электронных систем автомобилей также может быть проведена с помощью специального компьютерно-диагностического комплекса, выполненного на базе ПЭВМ.

Работы по компьютерной диагностике могут производиться непосредственно на автомобиле (на открытых площадках), а также в сервисных центрах и мастерских по ремонту автомобилей, цехах, отделах технического контроля и лабораториях. Для обеспечения контроля работы систем на автомобиле в дорожных условиях, например при обкатке автомобиля, используется ПЭВМ типа Notebook.

Принцип компьютерной диагностики (рис.21.4) основан на следующем:

- создание и передача под управлением ПЭВМ через диагностический интерфейс (адаптер), выполненный в соответствии со стандартом ISO 9141, электрических сигналов, инициализирующих связь с конкретным электронным блоком;
- прием информации от электронного блока, поступающей по диагностическому каналу;
- преобразование информации в сигналы стандарта RS 232C;
- обработка этих данных по заданной программе и отображении результатов на экране ПЭВМ.

Линия диагностического интерфейса ISO-9141 используется для передачи команд и данных в электронный блок, а линия через адаптер - для приема данных от электронного блока, их ретрансляции и передачи по интерфейсу RS-232C в ПЭВМ. При параметрировании систем эта линия может также использоваться для передачи данных в электронный блок.

Диагностическая программа позволяет получить информацию о текущих неисправностях системы (активные неисправности), если они имеются, а также информацию о неисправностях, которые были, но в данный момент отсутствуют (пассивные неисправности). Кроме того, могут быть получены сведения о номере электронного блока, его изготовителе и дате изготовления, версии программного обеспечения, дате последнего изменения параметров.

С электронного блока системы управления двигателем могут быть считаны данные об общей наработке двигателя (суммарное число полных оборотов коленчатого вала, мото-часы работы), в том числе на холостом ходу, общем пробеге автомобиля, пробеге после последнего ТО и т. д.

В состав компьютерной контрольно-диагностической системы (КДС) MAN-CATs входят: компьютер (ПК) типа «NOTEBOOK»; интерфейсный блок ISO-9141; переходной, коммутационный блок; комплект соединительных кабелей; программное обеспечение (ПО).

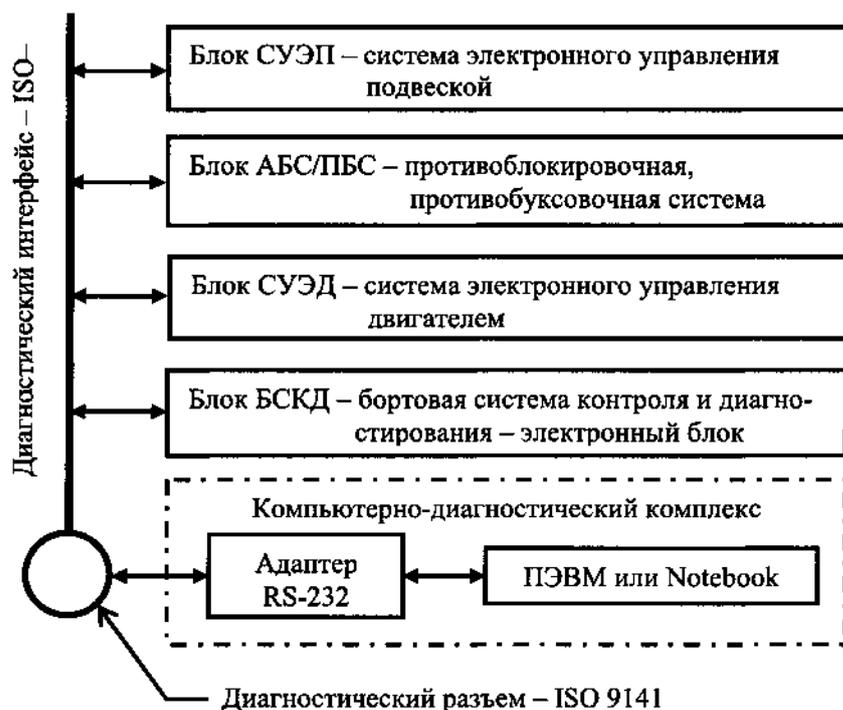


Рис.21.4. Структурная схема компьютерной диагностики мехатронных систем автомобиля МАЗ с двигателем MAN D2866-LF20

Информация о содержании версий ПО получается аналогично после выбора указанного режима

Программное обеспечение КДС совместимо с операционной системой Windows '98. В комплект программ входят инсталляционный пакет и пакет программ для электронных систем и их модификаций. Связь с ЭБУ осуществляется по каналу в соответствии со стандартом ISO-9141.

После завершения загрузки ПО на экране ПК появляется основное меню режимов: диагностика; программирование параметров в режиме EOL (end of line); инсталляция системы; информация о содержании версий ПО MAN-CATs. Выбрав требуемый режим работы, например «Мот», в режиме «Диагностика» и версию EDC, далее можно выйти в диалоговый режим с ПК, который позволяет произвести диагностику системы или программирование параметров в режиме EOL.

Инсталляция системы производится после выбора указанного режима и нажатия клавиши Enter. При этом на экране появляется информация о порядке работы с инсталляционными дискетами.

Таким образом, самодиагностика является стандартной для всех микропроцессорных систем управления. При нормальной работе функции самопроверки обеспечиваются параллельно с другими функциями, такими, как впрыск топлива и зажигание; управление подвеской; работа АБС/ЛБС и др. Самодиагностика характеризуется выполнением нескольких требований:

- 1) контроль за работой сложных систем и узлов. Все усложняющаяся конструкция двигателя делает возможности самодиагностики весьма важными для обнаружения и устранения неисправностей. Целью является интегрирование всей системы в процесс диагностики; защита узлов и деталей, подвергающихся особому риску в случае появления неисправностей. Например, можно привести защиту каталитического нейтрализатора, реагирующего на пропуски зажигания в двигателе. Система реагирует на определенную частоту появления пропусков зажигания, отключая подачу топлива в неисправный цилиндр для предотвращения перегрева нейтрализатора;
- 3) работа в аварийной ситуации осуществляется по величинам, принимаемым по «умолчанию». Например, при выходе из строя датчика нагрузки (определяющего массовый

расход воздуха), генерируется сигнал его замены, базирующийся на значениях частоты вращения коленчатого вала и положения дроссельной заслонки;

4) информация водителя о неисправностях системы диагностики с помощью индикаторных ламп, дисплеев и акустических приборов предупреждения. В США определены требования к бортовой диагностике автомобилей. В Европе разрабатываются аналогичные нормы для выявления нарушений в устройствах для снижения токсичности отработавших газов;

5) хранение точной информации. Система хранит в ЕСУ предупреждающую информацию и данные об отдельных неисправностях. Также в запоминающем устройстве хранятся данные об условиях работы двигателя на момент первоначального обнаружения ошибки. Тип и полнота информации регламентируются стандартами ISO;

доступ к хранимым ошибкам. Данные, хранящиеся в памяти системы самодиагностики во время работы автомобиля, могут быть переданы на диагностический стенд с дисплеем через последовательно подключенный многоканальный вход (порт). Необходимые для этого протоколы обмена приведены в стандартах ISO-9141 и ISO-14230;

7) наиболее простым вариантом передачи данных об ошибках является сообщение в форме мигающего кода на приборном щитке измерительной аппаратуры. Это помогает обслуживающему персоналу ускорить диагностику путем сужения поля возможных источников неисправностей.

## 22. Антиблокировочная мехатронная система тормозов (ABS) автомобиля

Антиблокировочная система тормозов предназначена для сохранения устойчивости и управляемости автомобиля при его торможении путем предотвращения блокировки колес. Сама аббревиатура ABS родилась в Германии, где еще в 1936 году инженерами компании Bosch было разработано и запатентовано дополнительное устройство, предотвращающее блокирование колес при торможении автомобиля.

Создать эффективную систему, способную практически мгновенно оценить дорожную ситуацию и соответствующе отреагировать на нее, удалось лишь в 70-х годах, когда появились микропроцессоры с высоким быстродействием. Первым серийным автомобилем, оснащаемым по желанию покупателя подобной мехатронной системой, стал "Mercedes Benz S-класса" серии W 116. С 1980 года установкой ABS на свои автомобили занимаются все ведущие мировые автопроизводители. Эта система все чаще применяется в качестве стандартного оборудования, а некоторые из функций выполняемых ею активно используются для обеспечения работы других систем комплекса активной безопасности автомобиля, таких как ASR, ESP и т.д. (им нужны те же самые датчики и управление тормозами).

При необходимости экстренной остановки транспортного средства при нажатии на педаль тормоза автомобиль, начинает замедляться, т. к. на колесо передается тормозной момент  $M_{тр}$ , реализуемый путем прижатия тормозных колодок к диску или барабану. Величина этого момента определяется приложенным к педали усилием. По мере возрастания  $M_{тр}$  автомобиль замедляется все быстрее. Однако, существует определенное значение тормозного момента, после которого действия водителя, направленные на увеличение эффективности замедления автомобиля, путем нажатия на педаль, не дают успеха. Автомобиль в этом случае будет скользить по поверхности дороги, а не катиться по ней. Максимальный тормозной момент, реализуемый колесом ( $M_{max\ tr}$ ), зависит от коэффициента сцепления колеса с дорогой, который может быть реализован им в данных дорожных условиях. Он определяется из соотношения:

$M_{max\ tr} = f \cdot R_z \cdot r$ , где

$f$  - коэффициент сцепления колеса с дорогой;  $R_z$  - нормальная составляющая реакции дороги;  $r$  - радиус качения колеса.

Если величина  $M_{тр}$ , передаваемого на колесо, достигнет значения величины, стоящей в правой части уравнения, то колесо мгновенно заблокируется. Причем бывают случаи, когда блокировка наступает даже при легком нажатии на педаль тормоза. Это происходит, например, на обледеневшей дороге. В этом случае коэффициент сцепления весьма невелик.

Для избежания подобной ситуации необходимо, чтобы постоянно, в процессе торможения автомобиля, соблюдалось неравенство:  $M_{max\ tr} < f \cdot R_z \cdot r$ . Достичь этого очень сложно, особенно если необходима экстренная его остановка. Антиблокировочная система (ABS) дает возможность водителю не задумываться о том, с какой силой давить на педаль тормоза. При любом усилии она не позволяет колесам автомобиля начать скольжение, балансируя величиной тормозного момента на грани блокировки, и никогда не переходя за эту грань. Водитель удерживает педаль тормоза нажатой, а система, то притормаживает колеса, то снова дает им раскрутиться, тем самым, обеспечивая прерывистое торможение, при котором автомобиль сохраняет свою устойчивость и управляемость.

На рис.22.1 представлена принципиальная схема антиблокировочной тормозной системы.

Основными компонентами антиблокировочной тормозной системы являются: регулятор давления, изменяющий тормозное усилие, которое прикладывается к колесу; компьютер, анализирующий изменение скорости колеса, а также обеспечивающий управление давлением в

регуляторе; датчики частоты вращения колеса, устанавливаемые в колесных узлах автомобиля.

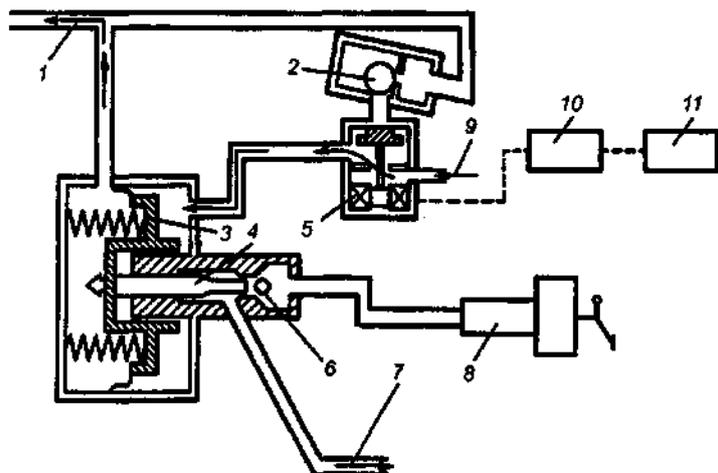


Рис.22.1. Электропневматическая схема ABS: 1 - трубопровод; 2,5 и 6 - соответственно перепускной, управляющий и редукционный клапаны; 3 - поршень; 4 - плунжер; 7 - трубопровод задних тормозных механизмов; 8 - главный тормозной цилиндр; 9 - воздухопровод; 10 - компьютер; 11 - датчик скорости колеса.

ABS включает в себя электронный блок управления, гидравлическое исполнительное устройство (модулятор) и датчики скорости вращения колес. Датчик состоит из катушки индуктивности и зубчатого ротора, прикрепляемого к вращающимся деталям. Система работает при условии поступления сигналов от всех колес, благодаря которым блок управления постоянно следит за скоростью вращения каждого из них. Свои функции современные ABS системы выполняют по следующему алгоритму: электромагнитные датчики непрерывно передают в электронный блок управления информацию о скорости вращения колес автомобиля, тот обрабатывает ее и посылает соответствующие указания на исполнительное устройство, которое непосредственно регулирует давление в тормозной системе. Как только угловая скорость колеса автомобиля уменьшается настолько, что возникает угроза блокировки ABS, блок управления подает команду на открытие электромагнитного клапана гидроагрегата, что приводит к уменьшению давления тормозной жидкости в соответствующем рабочем контуре и уменьшению тормозного момента на данном колесе. Как только датчик оповестит блок управления о том, что колесо опять набрало определенную скорость, клапан перекроется, и давление в тормозном контуре опять повысится. Далее цикл повторится, причем количество циклов в секунду для современных ABS колеблется в пределах от 10 до 15. Ощутить работу ABS можно по пульсации, передающейся на ногу водителя при нажатии на педаль тормоза.

ABS подразделяются на: двухканальные, трехканальные и четырехканальные. Двухканальные ABS имеют три датчика, устанавливаемые на передних колесах и на ведущей шестерне главной передачи, но они способны регулировать тормозное усилие только попарно, на каждой оси. В отличие от двухканальных, трехканальные регулируют давление в тормозных механизмах передних колес по отдельности. Наиболее эффективно же свою работу выполняют более дорогие четырехканальные ABS. Они имеют четыре датчика, по одному для каждого колеса, и давление, в каждом из четырех тормозных механизмов, устанавливают индивидуально.

Со времени появления ABS существует устойчивое мнение, что антиблокировочная система не многим уступает опытному водителю в способности остановить автомобиль на сложном покрытии, и вовсе незаменима для начинающих водителей.

Эффективное управление автомобилем, в том числе его торможение, зависит от сцепления колес с поверхностью дороги. При потере сцепления, при торможении с заблокированными колесами увеличивается тормозной путь, автомобиль становится неуправляемым. При торможении на скользкой поверхности опытные водители удерживают колеса на грани блокировки, используя прием прерывистого торможения. Если в движении одного из колес автомобиля оборудованного ABS появляются признаки блокировки, частота вращения становится ниже определенного критического значения, блок управления системой на основе сигнала датчика частоты вращения посылает управляющий сигнал к соленоидному распределительному клапану для прекращения роста давления тормозной жидкости в тормозном механизме для предотвращения опасности блокировки. Для создания постоянного давления в тормозной системе используется отдельный насос. Современная антиблокировочная система не просто следит за тем, чтобы то или иное колесо не было заблокировано, но еще и сравнивает работу каждого из колес и регулирует тормозные усилия таким образом, чтобы не допустить потери курсовой устойчивости. Для иллюстрации воспользуемся результатами дорожных испытаний антиблокировочной системы на двух типах покрытия. Одно покрытие с укатанным снегом имеет коэффициент сцепления 0,14, а другое, представляющее мокрый асфальт - 0,76. При создавшейся аварийной ситуации возможны следующие варианты действия водителя: работа только рулем без использования тормозов, руль и торможение.

Простейшая ситуация: торможение на прямой со скорости 40 км/ч. На асфальте водителю удастся точно дозировать тормозное усилие, так что результаты не позволяют судить о превосходстве мехатроники. При торможении на снегу, тормозной путь составил 46 метров. Торможение по всем правилам на грани блокировки дает результат 41 метр. При подключении ABS - 37,4 метра. Со скорости 60 км/час тормозной путь с ABS меньше на пять метров по сравнению с опытным водителем.

Более сложное покрытие, когда под правыми колесами лед, а под левыми асфальт при скорости 60 км/ч дает следующие результаты: с ABS- 37 м, без ABS - 41 м, но основное преимущество мехатроники не в метрах, а в устойчивости и управляемости автомобиля.

Приемы вождения с ABS и без нее разнятся. Антиблокировочная система становится, эффективной, когда превышено некоторое усилие на педали тормоза. Известно, что в экстренной ситуации водитель может развить на педали тормоза усилие до 50 кгс, при этом необходимое для блокировки колес на льду усилие на педали тормоза у современного автомобиля без ABS составляет 5-8 кгс. При помощи электроники усилие оптимизируется.

С увеличением тормозного давления колесо соответственно замедляется (рис.22.2). В точке 1 замедление колеса превышает величину, которую замедление автомобиля физически превзойти не может. Базовая скорость, соответствующая до этого скорости колеса, теперь значительно отличается от скорости колеса которая, начиная с точки 2 (превышение порога – b) существенно понижается.

В точке 2 порог замедления - b превышает. Колесо движется в зоне неустойчивого участка кривой проскальзывания  $\mu$ -  $\lambda$ . Колесо теперь достигает своей максимальной силы торможения, так, что дальнейшее увеличение тормозного момента увеличивает исключительно замедление колеса, а не транспортного средства. По этой причине тормозное движение быстро понижается и замедление колеса на короткий период времени уменьшается.

Время, требуемое для уменьшения замедления колеса, определяется гистерезисом колесного тормоза и характеристикой кривой проскальзывания  $\mu$ - $\lambda$  в неустойчивом диапазоне.

Только после прохождения гистерезиса колесного тормоза дальнейшее понижение тормозного движения ведет к снижению замедления колеса.

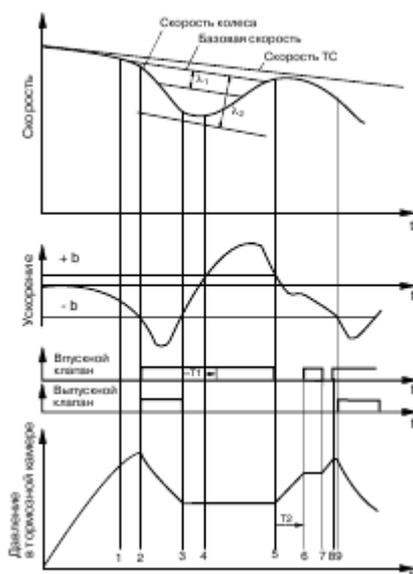


Рис. 22.2. Цикл работы ABS (с важнейшими рабочими параметрами порога замедления колеса  $-b$ , порога ускорения колеса  $+b$ , а также порога проскальзывания  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ )

В точке 3 сигнал замедления вновь находится в пределах порога  $-b$  и тормозное давление поддерживается на протяжении фиксированного времени  $T_1$  постоянным.

Как правило, ускорение колеса превышает в течение этого времени порог ускорения  $+b$  (точка 4).

На время превышения этого порога тормозное давление поддерживается постоянным.

В точке 5 преодолевается порог ускорения  $+b$ ; колесо находится в стабильной зоне кривой проскальзывания  $\mu-\lambda$ .

Теперь на определенное время  $T_2$  тормозное давление подается со значительным нарастанием для преодоления гистерезиса механизма колесного тормоза. Время  $T_2$  для первого цикла регулировки задается постоянным, а для каждого последующего цикла рассчитывается заново.

Число циклов регулировки определяется динамическими характеристиками всего регулировочного контура, состоящего из: контура управления ABS, колесного тормоза, колеса, дорожного покрытия. Схема безопасности в электронном блоке управления обеспечивает отключение ABS при ее отказе (например, обрыв провода) или при снижении напряжения питания (напряжение аккумуляторной батареи ниже 10,5 В), что индицируется загоранием контрольной лампы ABS на приборной доске. В этом случае поведение автомобиля при торможении такое же, как если бы ABS не была установлена.

В конце девяностых годов Bosch и Mercedes-Benz представили разработку, которая отличается принципиально новым уровнем развития: - электронная стабилизирующая программа (ESP). Эта система основывается на четырехканальном ABS, то есть может в отдельности управлять каждым колесом. Это предотвращает не только блокировку колес, но может инициировать и активное торможение. Во время движения прибор управления постоянно контролирует правильность курса, который был задан. Для этого датчик угла поворота рулевого колеса постоянно замеряет, насколько вывернуто рулевое колесо и следует ли автомобилю заданному курсу. Для того, что бы провести сравнение того, что есть и того, что может быть, дополнительно применяется гигрометр. Случайный занос автомобиля ESP сразу распознает и стабилизирует его, активно тормозя одно колесо.

При управлении, когда заносит переднее колесо, которое является внешним по отношению к повороту, или когда заносит заднее колесо, которое является внутренним к повороту, система мгновенно реагирует торможением.

Тормоза многих современных автомобилей оборудуют ABS с функцией "брейк эссист" (Brake Assist). Ее задача – полностью реализовать возможности тормозов. Идея Brake Assist пришла инженерам из Штутгарта после серии тестов, в ходе которых была замечена интересная тенденция: подавляющее большинство водителей, попадающих в критическую ситуацию, либо нажимали на педаль тормоза недостаточно сильно в течение всего маневра, либо увеличивали усилие лишь в самом его конце. Электронный блок "брейк эссист" улавливает момент, когда водитель совершает ошибку, и в течение долей секунды поднимает давление в тормозах до максимально эффективного значения. Похожая функция имеется в тормозах BMW, она носит название DBC (Dynamic Brake Control).

В последнее время активно внедряют в машины разных классов и противобуксовочную мехатронную систему, именуемую "Мерседесом" ASC (Acceleration Skid Control), "Ровером" – ETC (Electronic Traction Control), а "Опелем" и "Вольво" – TRACS (Traction Control System). Все они иногда объединяются под общим названием – TC и выполняют функцию ABS и наоборот: не допускают пробуксовки во время разгона.

Наконец, в списке серийного мехатронного оборудования машин и система стабилизации траектории – ESP (Electronic Stability Program) у "Мерседеса"; "Тойота" называет свой вариант VSC (Vehicle Stability Control), а "Субару" – VDC (Vehicle Dynamics Control). В опасной ситуации эти мехатронные системы притормаживают то или иное колесо, стабилизируя траекторию движения и выводя автомобиль из заноса.

В тормозах может применяться электрическая передача сигналов между педалью тормоза и исполнительным механизмом, то есть механическая связь между педалью тормоза и тормозными механизмами заменена на электрическую связь. После обработки информации поступающей с датчиков, определяющих скорость, нагрузку, поперечное ускорение автомобиля, угол поворота рулевого колеса, компьютер дает команду исполнительным механизмам, регулирующим давления в контурах тормозной системы.

При этом тормозной механизм может быть полностью электрическим или электрогидравлическим. В первом случае тормозная колодка должна выдвигаться в рабочее положение (и возвращаться в исходное положение) электрическим двигателем с винтовым приводом, использующим принцип циркуляции шариков в замкнутом пространстве для винтовых приводов колодок, чтобы минимизировать трение и достичь быстрой реакции.

В электрогидравлическом приводе электродвигатель вращает вал насоса, который создает давление в аккумуляторе тормозной жидкости. Набор соленоидных клапанов управляет потоком давления жидкости, подводимой к каждому суппорту. Действие клапана задается регулятором тормозной системы, который принимает и обрабатывает сигналы усилия на педали тормоза и датчиков движения.

Напряжение может быстро отключаться с обмоток электромагнитов модулятора. Это необходимо для того, чтобы при появлении ошибки в системе быстро и надежно перейти к режиму торможения без ABS. Новый седан Lexus GS – 430, оснащенный интегрированной системой контроля движения автомобиля VDIM (Vehicle Dynamics Integrated Management) делает торможение более эффективным и надежным. Блок VDIM включает в себя все существующие системы активной безопасности (Рис.22.3). Она получает сигналы от большого количества датчиков и после их обработки распознает намерения водителя и активирует необходимые системы безопасности, делая автомобиль устойчивым и более отзывчивым на управляющее действие водителя. При этом управляющее воздействие идет как на тормозную систему, так и на рулевое управление, предупреждая критические ситуации.

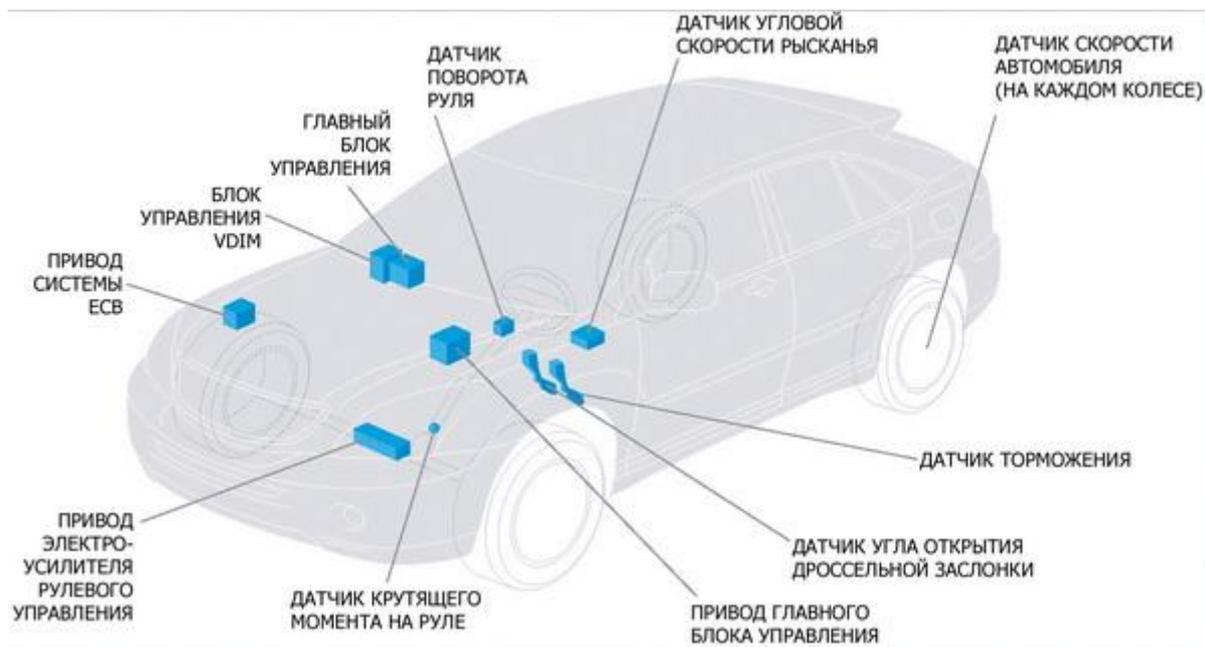


Рис.22.3. Интегрированная система контроля движения автомобиля VDIM

Электронные блоки ABS поставляются с диагностическим интерфейсом по ISO 9141 или SAE J1587.

Каждый раз, когда водитель включает зажигание, тормозная система с ABS «докладывает» о своем состоянии. Загоревшаяся на щитке приборов сигнальная лампа должна погаснуть через несколько секунд или после запуска двигателя. Если что-то не в порядке, лампа продолжает гореть либо мигает с той или иной частотой. По характеру мигания определяют вид поломки.

Отключать ABS нельзя, так как в этом случае повышается склонность к потере управляемости автомобиля и возникновению заносов.

В разных машинах чувствительность и алгоритм работы ABS отличаются. Это обусловлено особенностями программного обеспечения и конструкцией системы - быстродействием электроники и исполнительного механизма. Масса ABS первого поколения (1980 г.) составляла 6,9 кг, а масса восьмого поколения (2008 г.) – 1,2 кг.

Ограничение гидравлики до небольших закрытых контуров в каждой части автомобиля — или полный отказ от нее в целом — будет иметь большое значение. Но реальное различие появится тогда, когда тормоза будут не просто останавливать автомобиль, но и внесут существенный вклад в его устойчивость и безопасное управление.

Потенциальной проблемой в создании ABS является работа с полноприводными трансмиссиями, которые включают в себя дифференциалы повышенного трения или блокируемые. Механическое соединение через трансмиссию с колесами, которыми стремятся управлять ABS, может создавать неправильную информацию. Некоторые трансмиссии отсоединяют двигатель от задних колес, когда происходит торможение с ABS. Альтернативный подход состоит в том, чтобы использовать дополнительные датчики для более гибкой работы системы.

Таким образом, можно отметить, что существующие конструкции ABS повышают:

- устойчивость колесной машины;
- управляемость при аварийном торможении;
- устойчивость при торможении на скользкой дороге и при поворотах. Вместе с тем

они сокращают тормозной путь и снижают износ шин. Рассмотренные ABS имеют мехатронные системы, обеспечивающие три стадии работы: получение входных данных; обработка этих данных; генерирование выходных данных.

### 23. Нейронные сети в мехатронике

Понятие «искусственные нейронные сети», оформилось в 1940-х годах в основополагающих работах МакКаллога и Питтса [1], которые показали, что сети, состоящие из искусственных нейронов, способны в принципе вычислить любую арифметическую или логическую функцию.

Приблизительно в то же время Видров и Хофф [2] предложили другой обучающий алгоритм для настройки адаптивных линейных нейронных сетей. Обучающий алгоритм Видрова—Хоффа применяется и в наше время. Однослойные сети Розенблатта и Видрова имеют сходные ограничения, сужающие их область применения, что и было выявлено в книге Минского и Пайперта [3]. В 1972 г. Кохонен и Андерсон [4] независимо предложили новый тип нейронных сетей, способных функционировать в качестве памяти, обеспечивающей самоорганизующиеся отображения состояний с сохранением топологии сенсорного пространства (карта признаков). Возрождение интереса к нейронным сетям обязано, в основном, двум идеям. Первая из них состояла в применении методов механики для объяснения работы некоторого специального класса рекуррентных сетей. Вторая идея—это алгоритм обратного распространения для настройки многослойных сетей, который был открыт независимо несколькими различными исследователями. Наиболее популярной по алгоритму обратного распространения оказалась вышедшая в 1986 г. статья Рюмельхарта и МакКлеланда [5]. Этот алгоритм позволил преодолеть критические замечания Минского и Пайперта. Перспективным представляется применение нейрочипов, архитектура которых специально ориентирована на выполнение нейросетевых операций. Искусственный нейрон – это устройство, обеспечивающее вычисление функции

$$a = f(\mathbf{W}\mathbf{p} + b),$$

где  $a$ —скалярный выход нейрона,  $\mathbf{W}$ —весовая ( $1 \times m$ )-матрица-строка,

$\mathbf{p} \in \mathbb{R}^m$  —вектор-столбец входных сигналов,  $b$ —скаляр, называемый *смещением*,

$f$  —функция активации, скаляр  $z = \mathbf{W}\mathbf{p} + b$ —*чистый вход* (дискриминантная функция) нейрона. В аппаратном исполнении функцию чистого входа вычисляет адаптивный сумматор.

Указанные элементы образуют основной стандарт нейроинформатики. Вместе с тем существует много дополнений и вариаций. Например, в качестве чистого входа может применяться квадратичная функция

$$z = \sum v_{ij} p_i p_j + \sum w_i p_i + b \quad (23.1)$$

Часто используемые функции активации приведены в таблице 23.1. В её последней колонке даны краткие обозначения функций активации. Нейрон с функцией активации в виде ступеньки или симметричной ступеньки называется *перцептроном*. Кроме перечисленных, могут применяться и другие функции, например  $f(z) = \arctg z$  или  $f(z) = z/(a + |z|)$ ,  $a > 0$ .

Число входов в нейрон зависит от существа решаемой проблемы. Например, если требуется определить, лётная или нелётная стоит погода, то входами в нейрон целесообразно выбрать температуру воздуха, скорость ветра и влажность. Поэтому нейрон в данном случае будет иметь три входа.

Таблица 23.1. Стандартные функции активации

Смысл	Формула	Иконка	Имя
Ступенька	$\begin{cases} a = 0, & z < 0, \\ a = 1, & z \geq 0 \end{cases}$		hardlim
Симметричная ступенька	$\begin{cases} a = -1, & z < 0, \\ a = 1, & z \geq 0 \end{cases}$		hardlims
Линейная	$a = z$		purelin
Линейная с насыщением	$\begin{cases} a = 0, & z < 0, \\ a = z, & 0 \leq z \leq 1, \\ a = 1, & z \geq 1 \end{cases}$		satlin
Симметричная линейная с насыщением	$\begin{cases} a = -1, & z < -1, \\ a = z, & -1 \leq z \leq 1, \\ a = 1, & z \geq 1 \end{cases}$		satlins
Положительная линейная	$\begin{cases} a = 0, & z < 0, \\ a = z, & 0 \leq z \end{cases}$		poslin
Лог-сигмоид	$a = \frac{1}{1 + e^{-z}}$		logsig
Гиперболический тангенс	$a = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}$		tansig
Соревновательная	$\begin{cases} a = 1, & \text{нейрон с max } z, \\ a = 0, & \text{другие нейроны} \end{cases}$		compet

Многослойной нейронной сетью прямого распространения называется сеть, включающая набор слоёв нейронов, для которых выход каждого предыдущего слоя служит входом для последующего. Первый слой называется *входным*, а последний— *выходным*. Остальные слои называются *скрытыми*.

Пусть сеть имеет  $L$  слоёв и  $l$  — номер слоя. Тогда работа последовательной сети даётся формулами

$$\mathbf{a}^{(l)} = \mathbf{f}^{(l)}(\mathbf{W}^{(l)}\mathbf{a}^{(l-1)} + \mathbf{b}^{(l)}), \quad l = 1, \dots, L, \quad \mathbf{a}^{(0)} = \mathbf{p}, \quad \mathbf{a} = \mathbf{a}^{(L)}. \quad (23.2)$$

Здесь вектор  $\mathbf{p}$ — задаёт вход в нейронную сеть, вектор  $\mathbf{a}$  представляет собой выход или результат работы сети. По-прежнему аргументом отдельной компоненты вектор-функции активации служит соответствующий ей по номеру элемент вектора чистого входа для слоя, который содержит данный нейрон.

Можно показать, что многослойная нейронная сеть с линейными функциями активации эквивалентна однослойной линейной нейронной сети. Как будет видно из дальнейшего, многослойные сети с нелинейными функциями активации оказываются более мощными, чем однослойные. Блок зацикливания, реализованный в виде отдельного устройства, формирует входной сигнал  $\mathbf{p}(\tau)$  в соответствии с формулой

$$\mathbf{p}(\tau + 1) = \mathbf{a}(\tau). \quad (23.3)$$

Здесь предполагается, что счётчик  $\tau$  представлен дискретными шагами и может быть только целым. Этому блоку требуется при  $\tau = 0$  задать начальные данные в виде  $\mathbf{a}(0)$ .

Рекуррентная нейронная сеть—это сеть с обратной связью. Некоторые из её выходов с помощью блоков заикливания снова подаются на её входы. Рекуррентная сеть обладает возможностями, которых не было у описанных последовательных сетей.

### 23.1. Рекуррентная хэммингова сеть

Рекуррентная хэммингова сеть предназначена для того, чтобы решать задачи классификации в бинарном пространстве, где элементы векторов могут принимать значения только 1 или  $-1$ . Эта сеть включает два слоя. Первый слой работает в соответствии с формулой

$$\mathbf{a}^{(1)} = \text{purelin}(\mathbf{W}^{(1)}\mathbf{p} + \mathbf{b}^{(1)}). \quad (23.4)$$

Второй слой рекуррентный:

$$\mathbf{a}^{(2)}(0) = \mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)}(\tau + 1) = \text{poslin}(\mathbf{W}^{(2)}\mathbf{a}^{(2)}(\tau)), \quad (23.5)$$

$$\mathbf{W}^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon & \dots & -\varepsilon \\ -\varepsilon & 1 & \dots & -\varepsilon \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\varepsilon & -\varepsilon & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (23.6)$$

причём число нейронов первого слоя совпадает с числом нейронов второго слоя и  $0 < \varepsilon < 1/(n^{(2)} - 1)$ .

Цель работы хэмминговой сети состоит в том, чтобы установить, какой прототип (строка весовой матрицы  $\mathbf{W}^{(1)}$ ) ближе всего к входному вектору. Ответ получается на выходе рекуррентного слоя. Каждому прототипу отвечает один нейрон выхода. Когда рекуррентный слой сходится, остаётся только один ненулевой выходной нейрон (по принципу «победитель соревнования получает всё»).

Этот ненулевой нейрон указывает на прототип, ближайший к входному вектору.

### 23.2. Решение систем линейных уравнений.

Дана система линейных уравнений  $\mathbf{W}\mathbf{p} = \mathbf{b}$ ,  $\mathbf{W}$ —квадратная матрица размерности  $m \times m$ ,  $\mathbf{b}$ —вектор размерности  $m$ . Требуется найти значение вектора  $\mathbf{p}$ , при котором все уравнения обращаются в тождества.

Поиск решения осуществляется рекуррентной сетью

$$\mathbf{p}(0) = \mathbf{0}, \mathbf{a}(k) = \mathbf{f}(\mathbf{W}\mathbf{p}(k) - \mathbf{b}), \mathbf{p}(k + 1) = \mathbf{p}(k) - 2h\mathbf{W}^T\mathbf{a}(k), \quad (23.7)$$

где  $f(z) = \text{poslin}(z - \delta) - \text{poslin}(-z - \delta)$ . Эта сеть ищет

$$\arg \min_{\mathbf{p}} F(\mathbf{p}), F(\mathbf{p}) = \|\mathbf{a}\|^2.$$

Решение систем неравенств  $\mathbf{W}\mathbf{p} \leq \mathbf{b}$ ,  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^m$ , вполне аналогично решению системы линейных уравнений. Различие состоит лишь в выборе функции активации. Здесь  $\mathbf{a} = \text{poslin}(\mathbf{W}\mathbf{p} - \mathbf{b})$ . Сеть найдёт некоторое значение вектора  $\mathbf{p}$ , при котором все неравенства системы будут удовлетворены.

Если система несовместна, полученное значение вектора  $\mathbf{p}$  будет обеспечивать минимум функционала  $F$ .

Перейдём к способам обучения нейронных сетей. *Правило обучения* определяет закон изменения весов и смещений в нейронной сети в соответствии с целью обучения.

Из совокупности известных правил обучения нейронных сетей можно выделить три достаточно широких класса: супервизорное обучение, ассоциативное обучение и несупервизорное обучение.

В 1960 г. Видров и его аспирант Хофф предложили сеть АДАЛИН (ADaptive LInear NEuron: ADALINE) и разработали правило обучения, названное ими алгоритмом LMS (List Mean Square). Выход сети АДАЛИН выражается формулой

$$\mathbf{a} = \text{purelin}(\mathbf{W}\mathbf{p} + \mathbf{b}) = \mathbf{W}\mathbf{p} + \mathbf{b}. \quad (23.8)$$

Алгоритм LMS обучает сеть по заданному множеству образцов её правильной работы.

Вместо полного критерия качества Видров и Хофф предложили взять

$$\hat{F} = \|t(k) - a(p(k))\|^2 = \delta^2(k), \quad (23.9)$$

где пара  $[\mathbf{p}(k), \mathbf{t}(k)]$  выбирается из множества. Таким образом, роль критерия качества теперь выполняет среднеквадратичная ошибка для  $k$ -го образца. Метод градиентного спуска (обучающий алгоритм Видрова—Хоффа) принимает вид

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) + 2\alpha\delta(k)\mathbf{p}^T(k), \quad \mathbf{b}(k+1) = \mathbf{b}(k) + 2\alpha\delta(k), \quad (23.10)$$

где  $\alpha > 0$ —параметр, задающий величину шага итераций. Эту последовательность операций называют также *алгоритм LMS* или *дельта-правило*. Предъявляемые на вход сети образцы не обязаны все быть различными. Они могут повторяться сколько угодно раз, и процесс обучения сети может быть продолжен неограниченно.

### 23.3. Экстраполяция функций.

Пусть требуется выполнить экстраполяцию функции  $f(x)$  по её заданным значениям

$$f_1 = f(x_1), \dots, f_m = f(x_m). \quad (23.11)$$

Рассмотрим нейросетевую реализацию некоторых стандартных методов экстраполяции. Если узловые точки лежат равномерно на оси абсцисс,  $x_{i+1} - x_i = h$ ,  $i = 1, \dots, m-1$ , а спрогнозировать значение функции требуется для  $x = x_m + kh$ , то многочлен Лагранжа даёт

$$a_k = f(x_m + kh) = \sum_{i=1}^m w_{ki} f_i, \quad (23.12)$$

где

$$w_{ki} = \frac{(-1)^{m-i} (k+m-1)!}{(k-1)!(i-1)!(m-i)!(k+m-i)}. \quad (23.13)$$

Если прогноз требуется осуществить для  $k$  точек, расположенных равномерно с шагом  $h$ , то сеть будет иметь один слой с выходным вектором  $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_k)$ . Если прогнозируемая функция периодическая,  $f(t) = F(t+T)$ ,  $T \neq 0$ , то её лучше представить отрезком ряда Фурье. Тогда

$$f(t) \approx \sum_{i=1}^m w_i f(t_i), \quad (23.14)$$

где

$$w_i = \frac{1}{2(m-1)} \left[ 1 + \frac{\sin \tilde{N}\tau_1}{\sin \tau_1} \right], \quad w_m = \frac{1}{2(m-1)} \left[ 1 + \frac{\sin \tilde{N}\tau_m}{\sin \tau_m} \right], \quad (23.15)$$

$$w_i = \frac{1}{m-1} \left[ 1 + \frac{\sin \tilde{N}\tau}{\sin \tau} \right], \quad i = 2, \dots, m-1, \quad (23.16)$$

$$\tilde{N} = N - 0,5, \quad \tau_j = \frac{\pi(t-t_j)}{T}, \quad j = 1, \dots, m \quad (23.17)$$

Видим, что если разность  $t-t_1$  фиксирована, то и для экстраполяции по методу Фурье веса  $w_j$  оказываются не зависящими от конкретной экстраполируемой функции. Вместе с тем они будут отличаться от весов, получаемых с помощью полиномов Лагранжа. Возникает вопрос о поиске наилучшего класса функций для экстраполяции. Ответ на этот вопрос можно искать путём подбора значений весовых коэффициентов  $w_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ , минимизирующих ошибку экстраполяции на множестве различных векторов, получаемых последовательно на линейке сигнала.

Адаптивный фильтр есть комбинация линейки сигнала и сети АДАЛИН, так что выход фильтра есть

$$a_k = \text{purelin}(w_1^T p + b) = \sum_{i=1}^m w_{1i} f(k - i + 1) + b, \quad (23.18)$$

а весовые коэффициенты настраиваются алгоритмом LMS при каждом обновлении линейки. Адаптивный фильтр можно использовать во многих сферах деятельности. Алгоритм обратного распространения итерационный. Одна итерация градиентного спуска для функции  $\tilde{F}(\mathbf{x})$  включает следующие этапы.

1. Задаётся входной вектор, который проходит через сеть в прямом направлении:

$$\mathbf{a}^0 = \mathbf{p}, \mathbf{a}^{l+1} = \mathbf{f}^{l+1}(\mathbf{W}^{l+1} \mathbf{a}^l + \mathbf{b}^{l+1}), \quad l = 0, 1, \dots, L - 1, \mathbf{a} = \mathbf{a}^L. \quad (23.19)$$

2. Векторы  $\mathbf{s}^l, l = 1, \dots, L$ , распространяются через сеть в обратном направлении:

$$\mathbf{s}^L = -2 \tilde{F}'(\mathbf{z}^L)(\mathbf{t} - \mathbf{a}), \mathbf{s}^l = \tilde{F}'(\mathbf{z}^l)(\mathbf{W}^{l+1})^T \mathbf{s}^{l+1}, \quad l = L - 1, \dots, 2, 1. \quad (23.20)$$

3. Вычисляются очередные значения весовых коэффициентов и смещений по правилу

$$\mathbf{W}^l(k + 1) = \mathbf{W}^l(k) - \alpha \mathbf{s}^l \cdot (\mathbf{a}^{l-1})^T, \mathbf{b}^l(k + 1) = \mathbf{b}^l(k) - \alpha \mathbf{s}^l. \quad (23.21)$$

Предполагается, что диагональные матрицы

$$\tilde{F}'(\mathbf{z}^l) = \text{diag} \left( \frac{df_i^{(l)}}{dz_i^l} \right), \quad l = 1, \dots, L, \quad (23.22)$$

существуют для любого слоя. Поэтому функции активации типа hardlim здесь не годятся. Их следует заменить подходящими сигмоидными функциями. Непрерывный по времени вариант сети Хопфилда описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка в векторной форме

$$\varepsilon \frac{dz(t)}{dt} = -z(t) + Wa(t) + b, \quad (23.23)$$

где  $\varepsilon$ —скалярный параметр,  $\mathbf{z}, \mathbf{b} \in \mathbb{R}^m$ ,  $\mathbf{a}(t) = (a_1(t), \dots, a_m(t))$ ,  $a_i = f(z_i)$ ,

$f$ —сигмоидальная функция активации, обладающая свойством симметрии  $f(-z) = -f(z)$ ,  $\mathbf{W}$ —симметричная  $(m \times m)$ -матрица. Как сама функция  $f$ , так и обратная к ней  $f^{-1}$  предполагаются монотонно возрастающими в строгом смысле. Начальные условия задаются равенством  $\mathbf{z}(0) = \mathbf{p}$ .

Возьмём функцию

$$V(\mathbf{a}) = -\frac{1}{2} \mathbf{a}^T \mathbf{W} \mathbf{a} + \sum_{i=1}^m \left[ \int_0^{a_i} f^{-1}(u) du \right] - \mathbf{b}^T \mathbf{a}, \quad \frac{dV}{da_i} = -\varepsilon \frac{d[f^{-1}(a_i)]}{da_i} \frac{da_i}{dt}, \quad (23.24)$$

Видно, что точки покоя, для которых производная  $d\mathbf{a}/dt$  обращается в нуль, служат также стационарными точками функции  $V(\mathbf{a})$ , а в области, где функция  $f^{-1}(\mathbf{a})$  приблизительно линейна, уравнения сети обеспечивают градиентный спуск к какой-нибудь из этих точек. Из-за свойств интегральных членов имеем  $V \rightarrow +\infty$  при  $|a_i| \rightarrow 1$  для каждого  $i$ .

Отсюда заключаем, что в гиперкубе  $|a_i| < 1, i = 1, \dots, m$ , существует по крайней мере один минимум функции  $V$ .

Представим функцию активации в виде  $f(z) = \varphi(\gamma z)$ , где  $\varphi(x)$ —стандартная сигмоидальная функция, например  $\text{tansig}(x)$  (см. табл. 1). Параметр  $\gamma$  характеризует наклон функции активации в точке  $z = 0$ . При  $\gamma \rightarrow \infty$  получим

$f(z) \rightarrow \text{hardlims}(z)$ , а интегральные члены функции  $V$  в области  $-1 < a_i < 1, i = 1, \dots, m$ , стремятся к нулю. Это даёт основание для больших значений  $\gamma$  принять

$$V \approx \tilde{V}, \quad \tilde{V} = -\frac{1}{2} \mathbf{a}^T \mathbf{W} \mathbf{a} - \mathbf{b}^T \mathbf{a}, \quad -1 \leq a_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, m \quad (23.25)$$

Пусть задан набор векторов-прототипов  $\{\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N\}$ . Каждый из этих векторов имеет размерность  $m$ , а его компоненты принимают либо значение 1, либо значение  $-1$ .

Предполагается, что  $N \ll m$ , т.е. пространство состояний достаточно велико. Для того чтобы сеть сошлась к вектору-прототипу, ближайшему к входному вектору, векторы-прототипы должны быть аргументами минимумов функции  $\tilde{V}$  в области  $-1 \leq a_i \leq 1$ ,  $i = 1, \dots, m$ .

Пусть  $\mathbf{b} = 0$ . В качестве весовой возьмём матрицу оператора проектирования вектора  $\mathbf{a}$  на линейную оболочку  $\text{lin}\{\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N\}$ :

$$\mathbf{W} = \mathbf{P}(\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T, \quad \mathbf{W} = \mathbf{W}^T, \quad (23.26)$$

где  $\mathbf{P}$ —матрица, составленная из столбцов-векторов  $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N$ . Очевидно, что  $\mathbf{W} \mathbf{p}_k = \mathbf{p}_k$ ,  $k = 1, \dots, N$ , а если  $\mathbf{a} \perp \mathbf{p}_k$  для каждого  $k$ , то  $\mathbf{W} \mathbf{a} = 0$ .

Функция  $\tilde{V}$  неположительна:

$$\tilde{V} = -\frac{1}{2} \mathbf{a}^T \mathbf{W} \mathbf{a} = -\frac{1}{2} (\mathbf{W} \mathbf{a})^T (\mathbf{W} \mathbf{a}). \quad (23.27)$$

Она обращается в нуль (достигает максимума) для любого вектора  $\mathbf{a}$ , ортогонального  $\text{lin}\{\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N\}$ . Координаты концов векторов  $\mathbf{p}_k$  равны  $\pm 1$ , поэтому они лежат в вершинах куба  $-1 \leq a_i \leq 1$ . В точках  $\mathbf{p}_k$  функция  $\tilde{V}$  должна достигать минимума. Для этого необходимо, чтобы проекции всех других прототипов на любой вектор  $\mathbf{p}_k$  (с учётом их знака) не превышали длины этого вектора. Достаточным условием минимальности будет условие, чтобы проекция (с учётом её знака) любой линейной комбинации всех других прототипов, лежащей в кубе  $-1 \leq a_i \leq 1$ , не превышала длины вектора  $\mathbf{p}_k$ . Самый хороший в этом смысле вариант, когда все векторы прототипы попарно ортогональны или близки к этому.

Каждый вектор-прототип есть собственный вектор матрицы  $\mathbf{W}$ , и все они соответствуют общему собственному значению  $\lambda = 1$ . Пространство  $X$  собственных векторов матрицы  $\mathbf{W}$  есть  $\text{lin}\{\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N\}$ . Всё пространство  $\mathbb{R}^m$  можно представить как сумму двух непересекающихся множеств:  $\mathbb{R}^m = X \cup X^\perp$ , где  $X^\perp$  есть ортогональное дополнение для  $X$  и ему отвечает собственное значение  $\lambda = 0$ .

Траектории сети Хопфилда будут стремиться попасть в те углы гиперкуба  $\mathbf{a}$ :  $-1 < a_i < 1$ , которые принадлежат пространству  $X$ , если только начальная точка не попала в пространство  $X^\perp$ . В этом смысле такая сеть Хопфилда может применяться как ассоциативная компьютерная память. Вместе с тем все точки из пространства  $X^\perp$  будут стационарными точками (положениями неустойчивого равновесия) для сети. Если траектория сети попала точно на это множество, то самостоятельно выбраться оттуда она уже не сможет.

С учётом запаздывания сети Хопфилда на время  $\tau$  получим следующую динамическую систему:

$$\mathbf{a}(t) = \text{hard lim}(\mathbf{u} - 2\Delta \mathbf{u} \mathbf{W}_1 \mathbf{a}(t - \tau) - 2\mathbf{W}_2 \Delta \mathbf{u} - \Delta \mathbf{u}), \quad (23.28)$$

где  $\mathbf{u} = (u, u, \dots, u)^T$ ,  $\Delta \mathbf{u} = (\Delta u, \Delta u, \dots, \Delta u)^T$

$$\mathbf{W}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 2^{n-1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 2^{n-1} & 2^{n-2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 2^{n-1} & 2^{n-2} & \dots & 2^1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{W}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 2^{n-2} & \dots & 2^1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 2^1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 2^1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (23.29)$$

Такая рекуррентная сеть Хопфилда сходится за  $n$  шагов.

Таким образом, мехатронные системы синтезируют механическую часть, способную совершать активные действия, и электронное оборудование, управляющее системой в целом. В данном разделе представлены принципы работы некоторых структур из искусственных нейронов, позволяющих за счёт распараллеливания вычислений существенно ускорить решение типичных вычислительных задач, а также придать мехатронным системам полезные для автономной деятельности свойства искусственного интеллекта.

Для систем управления конкретными мехатронными системами методы решения указанных задач, могут быть реализованы существующими в настоящее время специализированными нейрочипами, взятыми в достаточном наборе.[15]

## 24. Математические основы измерения и анализа случайных динамических процессов мехатронных систем

Процесс, для которого характерно изменение физической величины во времени случайным образом, называют случайным. Он описывается случайной функцией времени. Когда аргумент случайной функции является пространственной переменной, то такая функция описывает случайное поле. Случайную функцию можно рассматривать как бесконечную совокупность, множество, ансамбль функций, каждая из которых представляет собой одну из возможных реализаций случайной функции.

Случайные функции обозначают большими буквами латинского алфавита:  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$ , а реализации - малыми буквами:  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ . Таким образом, случайный процесс, описываемый случайной функцией  $X(t)$  - это ансамбль, множество реализаций  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ , ...,  $x_k(t)$ , ...,  $x_\infty(t)$ .

В соответствии с тем, возможен или нет сдвиг начала отсчета вероятностных характеристик во времени, случайные процессы делят на стационарные и нестационарные.

Стационарным называется такой случайный процесс, у которого определенная группа вероятностных характеристик инвариантна во времени, т.е. не изменяется при сдвиге времени - замене аргумента  $t$  значением  $t + \tau$ , где  $\tau$  - произвольный интервал времени. Различают стационарные процессы в узком смысле и широком смысле.

Случайный процесс называют стационарным в узком смысле, если  $n$ -мерные функции распределения вероятностей ( $n$  - конечная величина произвольного порядка) не изменяются во времени, т.е. выражения для плотности распределения вероятностей любого порядка не зависят от выбора момента начала отсчета времени. Математически это означает, что для любых  $n$  и  $t$  справедливо равенство

$$p(x_1, t_1 + \tau; x_2, t_2 + \tau; \dots; x_n, t_n + \tau) = p(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n) \quad (24.1)$$

Для стационарных в широком смысле случайных процессов характерно, что математическое ожидание и дисперсия не зависят от времени, а корреляционная функция зависит лишь от разности времен.

Случайные процессы, стационарные в узком смысле, стационарны и в широком смысле, но не наоборот.

Нестационарные случайные процессы - это процессы, вероятностные характеристики которых являются функциями времени и зависят от начала отсчета.

Применительно ко многим случайным процессам допустима эргодическая гипотеза. О таких процессах говорят, что они эргодичны по отношению к определенной вероятностной характеристике. Отличительная особенность эргодического процесса заключается в том, что его вероятностные характеристики могут быть получены с вероятностью, сколь угодно близкой к единице, в результате некоторой операции усреднения по времени одной реализации достаточно большой (теоретически бесконечной) длительности.

Эргодическое свойство очень важно для исследования случайных процессов, так как позволяет усреднение по ансамблю заменять усреднением по времени.

Случайные процессы разделяют на непрерывные и дискретные в зависимости от того, непрерывен ли аргумент  $t$  по всей оси (на рассматриваемом отрезке) или принимает дискретные значения. Непрерывными (континуум значений) или квантованными могут быть и ординаты случайной функции.

Признаком классификации служит также характер распределения вероятностей случайного процесса, вид кривой плотности распределения. Различают гауссовский, релеевский процессы, процесс с равномерным распределением и т.д.

Особое место занимает гауссовский процесс, охватывающий широкий класс явлений и часто наблюдаемый в технике.

Процесс называют гауссовским, если все его  $n$ -мерные плотности распределения вероятностей подчиняются нормальному закону. Подобный закон распределения наблюдается во всех случаях, когда исследуемый процесс можно представить в виде суммы большого числа независимых или слабо зависимых слагаемых при условии отсутствия среди них таких, значения которых значительно превышают значения большинства остальных.

Основные свойства гауссовского процесса:

1. Случайный процесс исчерпывающим образом определяется законом изменения во времени математического ожидания и корреляционной функции (этим объясняется то, что корреляционная теория дает полное описание гауссовских процессов). Процессы могут отличаться друг от друга значением математического ожидания и видом корреляционной функции.

2. Стационарный в широком смысле гауссовский процесс стационарен и в узком смысле.

3. Сумма двух гауссовских процессов также представляет гауссовский процесс.

4. Некоррелированные гауссовские процессы - процессы независимые.

5. Линейные преобразования гауссовского процесса не меняют его характера.

6. Распределение вероятностной производной гауссовского стационарного процесса, описываемого непрерывной и дифференцируемой случайной функцией, также нормально.

7. Нелинейное преобразование нарушает свойство нормальности процесса.

Зависимость поведения случайной функции от ее значений в предшествующие моменты времени позволяет классифицировать случайные процессы по следующим видам:

а) белый шум - процесс, описываемый случайной функцией, последовательные значения которой статистически независимы от предыдущих значений, как бы ни были малы разделяющие их промежутки времени. Такой процесс полностью определяется одномерной плотностью распределения вероятностей;

б) марковский процесс - процесс, у которого зависимость текущего значения от предистории не распространяется далее непосредственно предшествующего момента. Вероятностные свойства случайной функции, описывающей марковский процесс, полностью определяются двумерной плотностью распределения вероятностей; в) немарковские процессы.

Основой деления случайных процессов на узкополосные и широкополосные является относительная ширина полосы частот (по отношению к средней частоте), в которой главным образом сосредоточен спектр мощности процесса.

Различают случайные, смешанные и квазидетерминированные процессы.

Случайным называют процесс, в котором отсутствуют детерминированные составляющие. От такого процесса отличают смешанный процесс, представляющий собой совокупность случайного процесса и детерминированных составляющих - периодических или аperiodических неслучайных функций времени. Типичным примером - служит аддитивная смесь шума и полезного сигнала.

Квазидетерминированные случайные процессы характеризуются тем, что их реализации описываются функциями времени определенно о вида, содержащими один или несколько случайных параметров, не зависящих от времени. В качестве примера можно привести процесс вида:  $x(t) = A \cos(\omega_0 t - \varphi)$ , где  $A$  и  $\omega_0$  - фиксированы, а  $\varphi$  - случайная фаза.

Функция распределения вероятностей случайного процесса, описываемого случайной функцией  $X(t)$  в фиксированный момент времени  $t = t_1$ , определяет вероятность того, что в указанный момент любое значение случайного процесса меньше некоторого значения (уровня)  $x$ , которое можно варьировать.

Функция распределения задается соотношением

$$F(x, t_1) = P[X(t_1) < x] \quad (24.2)$$

Для эргодического стационарного случайного процесса функция распределения может быть определена по одной реализации. Она характеризуется относительным временем пребывания значений реализации длительности  $T \rightarrow \infty$  ниже заданного уровня  $X$ .

Свойства функции распределения:

$$\begin{aligned} F(x, t) &\geq 0, \quad -\infty < x < \infty; \\ 0 < F(x, t) &< 1; \\ F(\infty, t) &= 1; F(-\infty, t) = 0 \end{aligned} \quad (24.3)$$

$F(x)$ - неубывающая функция аргумента  $x$ ; график функции повсюду непрерывен слева.

Функция распределения равномерной случайной последовательности определяется зависимостью

$$F(x, iT_0) = P[X(x, iT_0) < x] \quad (24.4)$$

Если случайная последовательность получена выборками из непрерывного случайного процесса его значений в моменты  $i T_0$ , то функция распределения случайной последовательности не отличается от функции распределения случайного процесса при условии замены  $t$  на  $i T_0$ .

Плотность распределения вероятностей случайного процесса представляет собой производную от функции распределения

$$p(x, t_1) = \frac{\partial F(x, t_1)}{\partial x} \quad (24.5)$$

При этом с точностью до бесконечно малой величины высшего порядка справедливо равенство

$$p(x, t_1)dx = P[x < X(t_1) \leq x + dx] \quad (24.6)$$

Если исследуется стационарный эргодический процесс, то

$$p(x)dx \approx P[x < x(t) \leq x + dx]$$

Основные свойства плотности вероятностей:

$$p(x, t) \geq 0, \forall x$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x, t) dx = F(x, t). \quad (24.7)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x, t) dx = 1$$

Для равномерной случайной последовательности плотность вероятностей определяется выражениями:

$$p(x, iT_0) = \frac{\partial F(x, iT_0)}{\partial x} \quad (24.8)$$

$$p(x, iT_0)dx \approx P[x < X(iT_0) \leq x + dx]$$

Математическое ожидание случайной функции  $X(t)$  -такая функция  $m_x(t)$ , значение которой при каждом данном значении аргумента  $t$  равно математическому ожиданию значения случайной функции  $X(t)$  при данном  $t$ :

$$m_x(t) = M[X(t)] \quad (24.9)$$

Математическое ожидание случайной функции представляет собой некоторую среднюю функцию, около которой группируются и относительно которой колеблются все возможные реализации случайной функции.

Для действительной случайной функции  $X(t)$  математическое ожидание может быть вычислено по формуле

$$m_x(t) = M[X(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x,t)dx \quad (24.10)$$

где  $p(X, t)$  - плотность вероятности.

У стационарных случайных процессов математическое ожидание не зависит от времени и представляет собой постоянное число. Если процесс не только стационарен, но и обладает эргодическим свойством (по отношению к математическому ожиданию), то у такого процесса среднее по ансамблю равно с вероятностью единица среднему по времени, определяемому по одной реализации:

$$M[X(t)] = \bar{X}(t) \quad (24.11)$$

причем временное среднее  $\bar{X}(t)$  находится из формулы

$$\bar{X}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)dt$$

в предположении, что предел существует.

Если исследуемый случайный процесс представляет собой электрическое напряжение или ток, то среднее значение - это постоянная составляющая напряжения или тока.

Для равномерной случайной последовательности  $X(i T_0)$  среднее по ансамблю реализаций

$$m_x(iT_0) = \int_{-\infty}^{\infty} xp(iT_0)dx \quad (24.12)$$

При условии, что случайной последовательности присуще эргодическое свойство, ее математическое ожидание может быть найдено как среднее арифметическое по времени одной реализации

$$m_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N x(iT_0), \quad (24.13)$$

если этот предел существует.

Дисперсия случайной функции  $(t)$  есть такая функция, значение которой при каждом данном значении аргумента  $t$  равно дисперсии случайной функции при этом значении аргумента

$$D_x(t) = D[X(t)] \quad (24.14)$$

Дисперсия характеризует рассеяние возможных реализаций случайной функции относительно математического ожидания. Она представляет собой центральную моментную функцию второго порядка

$$D[X(t)] = M\{[X(t) - m_x(t)]^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} [x - m_x(t)]^2 p(x,t)dx \quad (24.15)$$

Для стационарного эргодического случайного процесса выражение дисперсии принимает вид:

$$D_x = M\{[X(t)]^2 - m_x^2\} = \bar{X}^2(t) - [\bar{X}(t)]^2 \quad (24.16)$$

и характеризуется постоянным числом.

Если исследуемым случайным процессом является напряжение или ток (сопротивление нагрузки 1 Ом), то член  $\bar{X}^2(t)$  соответствует полной средней мощности процесса, член  $[\bar{X}(t)]^2$  - мощности постоянной составляющей, а дисперсия  $D_x$  - мощности переменной составляющей.

При равномерной случайной последовательности

$$D[X(iT_0)] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x, iT_0) dx \quad (24.17)$$

Когда процесс стационарен и эргодичен (по отношению к дисперсии), то

$$D_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N x^2(iT_0) \quad (24.18)$$

Дисперсия характеризует рассеяние в квадратичной мере. Поэтому на практике часто используют в качестве подобной характеристики среднее квадратическое отклонение, представляющее собой корень квадратный из дисперсии, взятый со знаком плюс:  $\sigma_x = \sqrt{D_x}$ . Корреляционная функция случайного процесса характеризует тесноту стохастической связи между значениями случайного процесса в различные моменты времени. В общем случае она является функцией двух аргументов  $t_1$  и  $t_2$  и представляет собой математическое ожидание произведений центрированных значений случайной функции для этих двух аргументов

$$R_x(t_1, t_2) = M \{ [X(t_1) - m_x(t_1)] [X(t_2) - m_x(t_2)] \} \quad (24.19)$$

Значение корреляционной функции при равных значениях аргументов  $t_1 = t_2 = t$  дает дисперсию случайного процесса

$$R_x(t, t) = D[X(t)]$$

Корреляционная функция нестационарного случайного процесса графически изображается пространственной фигурой.

Если случайный процесс стационарен хотя бы в широком смысле, то корреляционная функция является функцией лишь разности  $\tau = t_1 - t_2$  аргументов, а не их абсолютных значений и принимает одно и то же значение при всех аргументах  $t_1$  и  $t_2$ , отличающихся один от другого на одинаковую величину  $\tau$ :

$$R_x(\tau) = M \{ [X(t) - m_x] [X(t + \tau) - m_x] \} \quad (24.20)$$

Когда случайная последовательность стационарна и обладает эргодическим свойством, корреляционная функция описывается выражением

$$R_x(kT) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N x(iT_0) \cdot x(iT_0 + kT), \quad (24.21)$$

где  $kT_0 = hT_0 - iT_0$

Для стационарных эргодических процессов можно отметить следующие свойства:

1. При  $\tau \rightarrow \infty$   
 $R_x(\tau) \rightarrow 0$
2. Корреляционная функция любой периодической квазидетерминированной функции аргумента  $t$  обладает такой же периодичностью при аргументе  $\tau$ .

Для характеристики взаимосвязи между значениями двух случайных процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$  служит взаимная корреляционная функция, определяемая выражением

$$R_{XY}(t_1, t_2) = M \{ [X(t_1) - m_x(t_1)] [Y(t_2) - m_y(t_2)] \} \quad (24.22)$$

Для характеристики случайного процесса в целом пользуются понятиями спектральной плотности или спектра.

Спектральная плотность  $S_x(f)$  стационарного эргодического случайного процесса  $X(t)$  выражает среднюю мощность процесса, приходящуюся на единицу полосы частот.

Спектр  $S_x(f)$  стационарного случайного процесса связан с корреляционной функцией  $R_x(\tau)$  этого процесса парой преобразований Фурье (теорема Винера-Хинчина):

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (24.23)$$

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) e^{j2\pi f\tau} df$$

Основные свойства спектральной плотности стационарного случайного процесса:

1. Спектральная плотность неотрицательна, т.е. при любом значении  $f$

$$S_x(f) \geq 0$$

2. При ограниченной дисперсии случайного процесса

$$\lim_{f \rightarrow \infty} S_x(f) = 0$$

3. Спектральная плотность является вещественной функцией  $f$ .

4. Спектральная плотность - четная функция, т.е.

$$S_x(f) = S_x(-f)$$

5. Интеграл от спектральной плотности равен дисперсии стационарного случайного процесса

$$D_x = R_x(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) df$$

6. Изменение масштаба  $m$  аргумента  $\tau$  корреляционной функции вызывает обратное изменение масштаба частоты  $f$  и величины спектральной плотности  $S_x(f)$ , т.е. если  $R_2(\tau) = R_1(m\tau)$ , то соответственно

$$S_2(f) = \frac{1}{m} S_1\left(\frac{f}{m}\right)$$

7. Спектральная плотность процесса на выходе линейной системы с постоянными параметрами  $S_y(f)$  связана со спектральной плотностью стационарного случайного процесса на входе системы  $S_x(f)$  выражением

$$S_y(f) = |K(f)|^2 S_x(f),$$

где  $|K(f)|$  - амплитудно-частотная характеристика системы.

С учетом свойств 3 и 4 можно выразить спектральную плотность мощности через корреляционную функцию формулой

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \cos 2\pi f\tau d\tau = 2 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos 2\pi f\tau d\tau$$

Взаимной спектральной плотностью стационарно связанных случайных процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$  называют преобразование Фурье от взаимной корреляционной функции этих процессов

$$S_{XY}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

Основные свойства взаимной спектральной плотности:

1. Взаимная спектральная плотность  $S_{xy}(f)$  в общем случае величина комплексная.

Ее вещественная часть  $Re S_{xy}(f)$  является четной функцией, а мнимая часть  $Im S_{xy}(f)$  - функцией нечетной:

$$Re S_{XY}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) \cos 2\pi f\tau d\tau \quad (24.24)$$

$$Im S_{XY}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) \sin 2\pi f\tau d\tau$$

2. Интеграл от взаимной спектральной плотности  $S_{xy}(f)$  в бесконечных пределах аргумента  $f$  дает взаимную дисперсию случайных процессов:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_{XY}(f) df = D_{XY} = R_{XY}(0)$$

3. Изменение масштаба аргумента  $\tau$  взаимной корреляционной функции  $R_{XY}(\tau)$  вызывает такие же изменения взаимной спектральной плотности  $S_{xy}(f)$ , что и изменение масштаба  $\tau$  функции корреляции  $R_{xy}(\tau)$  у спектральной плотности  $S_x(f)$ , т.е. функция

$$R_{xy}(m\tau) \text{ соответствует функции } \frac{1}{m} S_{xy}\left(\frac{f}{m}\right)$$

4. Взаимные спектральные плотности  $S_{xy}(f)$  и  $S_{yx}(f)$  являются комплексно сопряженными величинами и связаны соотношениями

$$S_{YX}(f) = S_{XY}(-f)$$

$$S_{XY}(f) = S_{YX}(-f)$$

Рассмотренными характеристиками не исчерпывается описание случайных динамических процессов, но они являются основными для принятого в пособии математического описания рассмотренных моделей.

## 25. Информационные контрольно-диагностические мехатронные системы

### 25.1. Состояние и тенденции развития систем

Встроенные средства диагностирования стали неотъемлемой частью электронного оснащения автомобилей. Прежде недооценивавшиеся, они рассматривались как побочный результат внедрения наиболее сложных микропроцессорных систем управления, а в последние годы стали одним из центральных направлений компьютеризации автомобильного парка. С этим направлением связаны не просто появление нового узла автомобиля, но и перераспределение и автоматизация функций, принадлежавших прежде водителю и механику автотранспортного предприятия (АТП). Микропроцессорным встроенным средствам отводится задача контроля за техническим состоянием агрегатов, узлов и автомобиля в целом.

Встроенные средства подразделяются на:

системы датчиков и контрольных точек, обеспечивающие вывод сигналов на внешние средства диагностирования;

бортовые системы контроля для допускового контроля параметров функционирования и технического состояния с выводом результатов только на дисплей в кабине водителя;

встроенные системы диагностирования - автономные или функционирующие комплексно со стационарными информационно-управляющими центрами. Эти системы предназначены для косвенного обобщенного контролирования работоспособности узлов и агрегатов с выдачей результатов на дисплей водителю и в бортовой накопитель для последующего прогнозирования и учета ресурса и наработок узлов стационарными ЭВМ.

Наибольшее распространение получили встроенные системы с микропроцессорной обработкой, накоплением и выдачей информации водителю, в бортовой накопитель и на штекерный разъем. Такие системы предназначены для использования и выдачи данных в ЭВМ стационарного комплекса АСУ работой и техническим состоянием парка.

Диагностирование только внешними средствами не обеспечивает предотвращения эксплуатации автомобилей с неисправностями, аварийных дорожных отказов, оптимизации выбора режима движения и проведения ТО и ТР. Она не устраняет накопления неисправностей на определенном пробеге, так что в среднем более 20 % парка эксплуатируется с такими неисправностями. Ухудшение технического состояния автотранспортных средств является причиной дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и дорожных отказов. Более частому проведению диагностирования препятствуют ограничения экономического характера. Значительная доля парка эксплуатируется вообще без диагностирования.

Наиболее перспективной возможностью снять указанные ограничения, обеспечив практически непрерывным контролем наименее надежные узлы, служит внедрение встроенных средств диагностирования. Имеющиеся в настоящее время разработки показывают целесообразность диагностирования встроенными средствами двигателя и узлов, основных функциональных качеств автомобиля по функциональным параметрам агрегатов и движению автомобиля, обобщенных показателей работоспособности важнейших агрегатов. Микропроцессорные встроенные системы диагностирования должны с упреждением выявлять неисправности узлов, определяющих наибольшую частоту обращений в ремонтную зону АТП или на СТО, а также снижение функциональных качеств, представляющее угрозу для безопасности движения. В частности, следует контролировать топливную экономичность, состояние аккумуляторной батареи, неравномерность действия тормозов и суммарную тормозную эффективность с выдачей рекомендаций водителю по ограничению скорости движения и др.

При насыщении автомобилей электроникой, устанавливаемые на БСК устройства объединяют на микропроцессорной основе в одно целое с другими устройствами контроля (эконометром, маршрутным компьютером, электронной панелью, указателем целесообразности переключения передач) и связывают с автоматическими регуляторами (впрыска, зажигания, работой трансмиссии и др.). Подобные связи возникают как при использовании общих датчиков

одновременно для нескольких компонентов, так и при выполнении функций обработки, отображения и накопления данных общими для них блоками.

Дальнейшее повышение эффективности БСК обусловлено использованием в них микропроцессоров вместо специализированных логических схем с неизменяемым алгоритмом. Это не только обеспечило универсальность систем по отношению к различным моделям и модификациям автомобилей и их узлов, формат выдачи результатов за счет многовариантности программных процедур обработки результатов измерений, но и сделало доступными более эффективные и сложные вычислительные алгоритмы, требующие значительных объемов памяти и развитого интерфейса. Микропроцессорные БСК включают в себя встроенные датчики, аналого-цифровые преобразователи или преобразователи сигналов датчиков в стандартную импульсную форму, пульт управления с дисплеями, блоки памяти, арифметико-логическое устройство с оперативными запоминающими устройствами и интерфейсом (микропроцессор), стабилизированные блоки питания.

Современные БСК автомобилей часто конструктивно объединяются традиционной приборной панелью в единую автомобильную информационную систему. При этом основное отличие БСК от комплекта индикаторов стандартной панели заключается не столько в расширении номенклатуры контролируемых параметров, сколько в обязательной допусковой обработке результатов, возможностях анализа целесообразности их запоминания или отображения по приоритетам.

В настоящее время ведущие автомобилестроительные фирмы применяют на легковых автомобилях от большого до малого классов разветвленные микропроцессорные БСК для допускового контроля 15-20 параметров. В дополнение к функциям первых внедренных БСК эти системы обеспечивают контроль состояния сцепления, амортизаторов, аккумуляторной батареи, системы зажигания, компрессии по цилиндрам и др. (рис.25.1).

Для поэлементной проверки, определения характера неисправностей и поиска отказавших элементов наиболее сложные микропроцессорные системы управления оснащают специальным «диагностическим разъемом» и подключают к ним вторичные переносные тестеры. Примером может служить диагностическое обеспечение выпускаемых фирмой WABCO антиблокировочных микропроцессорных тормозных систем, включающих «диагностический разъем», простейшие встроенные элементы самоконтроля и вторичные переносные тестеры для проверки пневмоаппаратов и электронных блоков антиблокировочных систем. Тестер обеспечивает проверку электрических сигналов 14-16 блоков антиблокировочных систем фирмы WABCO путем подключения через 35-контактный и два 7-контактных разъема. Кроме того, встроенный блок контроля дает возможность водителю по двум индикаторным лампам на приборной панели следить на режимах пуска двигателя, трогания и в процессе движения за включенным состоянием и общей исправностью системы в целом.

## Контролируемые параметры

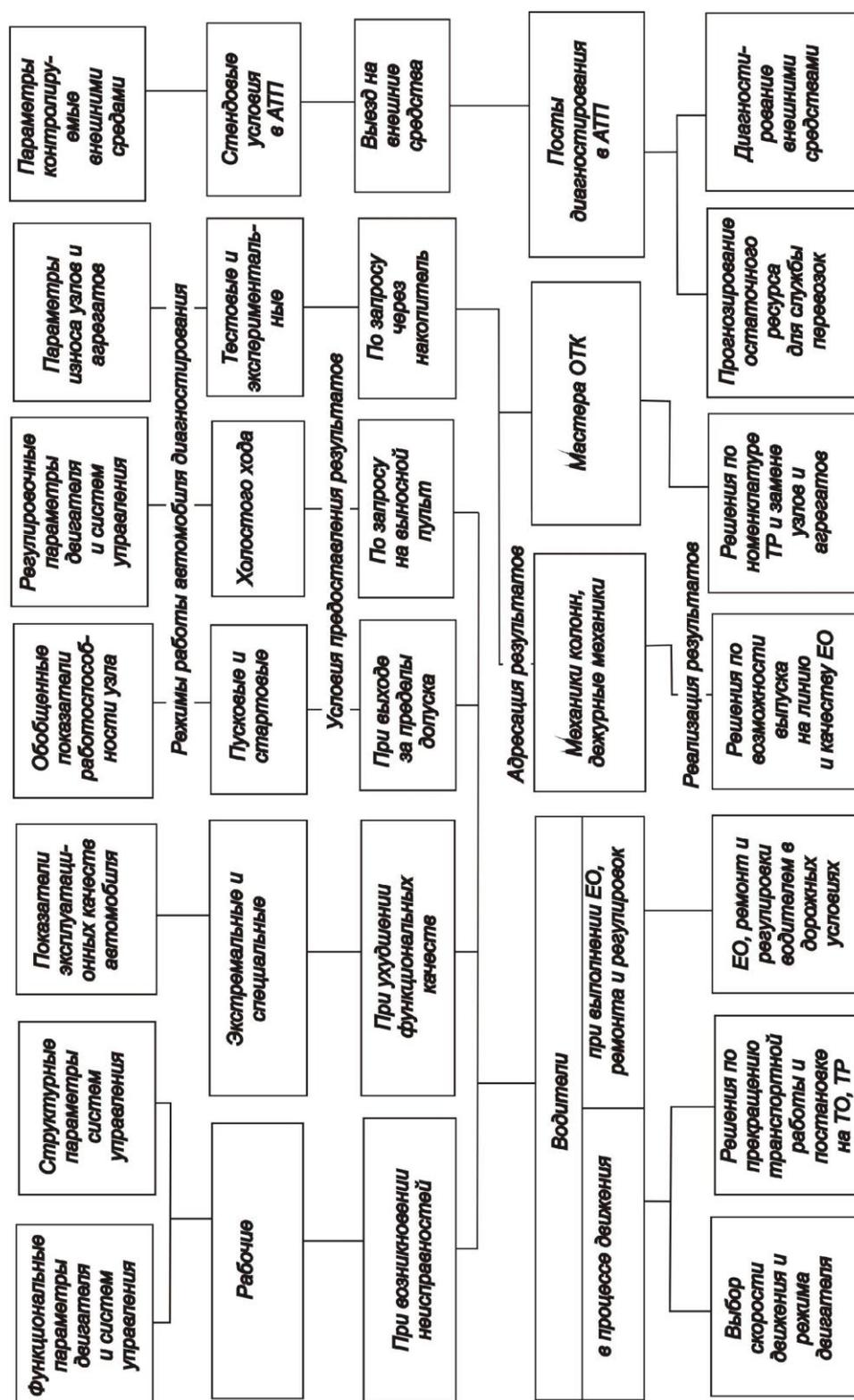


Рис. 25.1. Возможности и сфера контроля технического состояния встроенными средствами

Однако «диагностический разъем» в комплексе с используемыми с ним вторичными тестерами относится скорее к внешним средствам диагностирования с присущими им возможностями.

От простейших «однопараметрических» индикаторов состояния узлов и агрегатов, дополнявших функции приборной панели, разработки последнего десятилетия привели к современным микропроцессорным встроенным системам диагностирования. Многообразие функциональных возможностей, аппаратного построения и форм выдачи результатов отражает

классификация встроенных средств диагностирования по функциональным и структурным признакам (рис.25.2).



Рис. 25.2. Классификация встроенных средств диагностирования

Число датчиков определяет стоимость и надежность БСК, эффективность которой зависит от условий использования результатов допускового контроля, адресуемых исключительно водителю. Ввиду этого дальнейшее развитие микропроцессорных БСК связано не с наращиванием числа контролируемых параметров, а с совершенствованием обработки данных, получаемых в результате измерений, их накопления, вторичной переработки по варьируемым вычислительным алгоритмам, и выдачей результатов не только водителю, но и через накопитель - персоналу технической службы после возвращения автомобиля в АТП. Такие автономные либо функционирующие в комплексе со стационарными информационно-управляющими центрами АСУ микропроцессорные системы для косвенного контроля, накопления и переработки результатов целесообразно именовать встроенными системами диагностирования ВСД в отличие от простейших БСК. Вместо контроля структурных параметров, непосредственно и однозначно отражающих уровень износа детали или работоспособности узла, в них по результатам измерений функциональных параметров вычисляются обобщенные комплексные показатели работоспособности агрегатов и изменяющихся эксплуатационных качеств автомобиля (топливной экономичности, тормозной эффективности), что в целом отражает его состояние. Такие ВСД обеспечивают формирование рекомендаций водителю и команд автоматическим регуляторам по ограничению скорости движения, частоты вращения коленчатого вала двигателя, по своевременности постановки автомобиля на ТР и ТО, замены конкретных узлов и агрегатов, а вместе со стационарными комплексами АСУ определяют их остаточный ресурс.

Эти системы по существу автоматизируют процедуру обобщенной оценки состояния автомобиля, его агрегатов, обычно выполняемую водителем и механиком субъективно даже при оснащении бортовыми системами контроля.

Конструирование ВСД ведется по двум основным направлениям: создание автономных целиком ориентированных на водителей систем для обобщенной оценки состояния автомобиля и систем в комплексе со стационарными средствами АСУ.

Наряду с этим имеется тенденция ввода блоков и функций ВСД в состав микропроцессорных систем автоматического управления автомобилем с задачей контроля их работоспособности. Объединение различных автономных бортовых систем регистрации показателей работы и технического состояния автомобиля, расходования топлива, наработки основных агрегатов, выполненных ремонтно-технических воздействий, работоспособности водителя дает наиболее полное использование результатов контроля, бортовой измерительной сети, вычислительных возможностей и памяти микропроцессорных блоков обработки информации. Обеспечивается не только рациональное построение бортового комплекса, но и новый, качественно более высокий уровень, оптимизации оперативного управления в технической и коммерческой эксплуатации. Так, первая система VMS фирмы RCA послужила прототипом нового поколения ВСД с накоплением данных о работе и техническом состоянии автомобиля. Конструктивно ВСД, как правило, объединяются с БСК той или иной мощности (в том числе сравнительно несложными системами контроля 15-19 параметров) в единую бортовую систему, обеспечивающую в комплексе потребности в контроле технического состояния и зависящих от него режимов ТО и ТР автомобиля.

Специфической особенностью контроля электронных систем, структурные параметры которых, как правило, недоступны для измерений, является проверка по функциональным параметрам состояния из элементов в рабочих и специальных тестовых режимах. При этом аппаратными средствами контролируется состояние встроенных механизмов, цепей питания, а также (по специальным признакам) входных и выходных сигналов конструктивно отдельных блоков.

Как правило, ВСД легковых автомобилей снабжаются бортовым накопителем, а процедура отображения результатов является двух- или трехзвенной и программируется. В зависимости от приоритета неисправности автоматически включается одна из форм индикации (синхронная, цепная, по запросу, по опорным сигналам режима работы автомобиля) наличия и места неисправностей. Такое усложнение процедуры отображения результатов при сравнительно простых алгоритмах допускового контроля обеспечивает адаптацию ВСД к жестким условиям информационных перегрузок водителя.

Имеется не только аппаратная интеграция систем, но и объединение процедур обработки фиксируемых ими результатов различного содержания: диагностирования, контроля выполненной транспортной работы (по показателям тахографа), учета выработки ресурса агрегатов и выполненных технических воздействий, расходования топливных ресурсов и др. Алгоритмы совместной обработки реализуются на ЭВМ стационарных информационно-управляющих центров АТП. На борту данные фиксируются по опорным сигналам пробега, даты, времени и событий (номеру рейса, причинам простоев, случаям ТО и ТР, ДТП и др.). Выдача информации обеспечивается сразу в несколько адресов, в группы учета топливных и материальных ресурсов, анализа технического состояния и обслуживания подвижного состава, управления производством ТО и ТР.

Наблюдается устойчивая тенденция усложнения процедур обработки информации, ее предварительного анализа перед выдачей пользователям в упорядоченной форме непосредственно в момент контроля. При этом обеспечивается не только эффективное восприятие данных, но и дополнительные функции прогнозирования темпа изнашивания и остаточного ресурса, автоматизация всех этапов учета показателей работы, технического состояния, ресурса, наработки и восстановления работоспособности подвижного состава, анализа эффективности и режимов работы водителя.

Использование в ВСД микропроцессоров для обработки результатов контроля обеспечило автоматизацию подготовки для водителя решений по поддержанию работоспособности и эксплуатации автомобиля. Синхронная с контролем индикация результатов сохраняется только для экстренных случаев опасных неисправностей, а сама процедура выдачи результатов стала автоматически управляемой. Заранее прорабатываются и программируются для ВСД возможные исходы контроля, с тем, чтобы вместо числовых значений выдавались конкретные рекомендации.

Считается, что в перспективных системах выдача данных должна обеспечиваться на режимах холостого хода, пусковых и предпусковых, а в экстренных случаях - и синхронно с выполнением контроля в процессе движения. Формой отображения, как полагают, должны быть конкретные рекомендации типа «Стоп», «Выключить двигатель», «Ограничить скорость» (до конкретного значения), «Прекратить транспортную работу по завершении поездки», «Долить масло в гидроусилитель». Целесообразно также предусмотреть выдачу информации о недопустимом снижении функциональных качеств и угрожающих безопасности движения неисправностях в виде команд регуляторам скорости движения и системам автоматического торможения. Совершенствуется и сама процедура выдачи ВСД результатов.

Так, фирмой «Bosch» предложено в дополнение к звуковой и световой индикации выхода контролируемых параметров за поле допуска выдавать по запросу скорость их изменения. Фирмой «Nippondenso» (Япония) предлагается изменять масштабы шкал отображаемых на дисплеях параметров при их выходе за поле допуска, а также напоминать о наличии неисправностей речевым индикатором через фиксированное время после визуальной индикации. Этой же фирмой вместо индикации скорости постепенного изменения контролируемого параметра (например, вследствие износа) предложено выдавать результат сравнения прогноза ресурса с пробегом до ближайшего планового ТО. Японскими фирмами «Toyota» и «Nippondenso» рекомендуется заносить в бортовой накопитель результаты контроля не только технического состояния, но и частоты выхода из строя агрегатов и систем автомобиля на экстремальных режимах, как наиболее объективные характеристики эффективности работы автомобиля.

Весьма перспективна замена проводной бортовой измерительной сети электрических (как правило, экранированных) коммуникаций, соединяющих встроенные датчики с бортовым электронным блоком, на мультиплексную кольцевую систему передачи данных. При этом все датчики соединяются с одним или двумя кольцевыми проводами. По ним обеспечивается их опрос импульсными сигналами системы в кодированной форме с временным или частотным разделением командных и информационных сигналов. Применение мультиплексных систем радикально сократит протяженность электрических проводов и количество разъемов, на которые при числе встроенных датчиков более 20 приходится свыше 30-40 % стоимости ВСД.

Для выдачи неотложной информации водителю в ВСД все шире используются автоматические синтезаторы речи в комплексе с автомобильной радио- и звуковоспроизводящей аппаратурой. В качестве визуальных индикаторов применяются жидкокристаллические, газоразрядные или светодиодные матричные многофункциональные и специализированные дисплеи с электронным управлением. Эти же дисплеи, как правило, служат и для выдачи информации о функционировании автомобиля по номенклатуре традиционных параметров приборной панели, и для сенсорного вызова требуемых данных о состоянии автомобиля. Информация выдается в цифровом и знаковом виде, причем конкретная форма отображения выбирается автоматически в расчете на максимальную вероятность восприятия. Так, при первоначальном обнаружении опасных неисправностей на ограниченный период времени может включаться мигающий режим индикации, отражающий характер неисправности, с одновременным речевым подтверждением. Затем до появления новых отказов остается включенной только общая индикация наличия неисправностей без их конкретизации или периодически производятся напоминания водителю.

Не менее существенная намечающаяся перспективная тенденция интеграции всего электронного оснащения автомобиля на основе нескольких систем: мультиплексной, автомобильной, информационной и ВСД. При этом сама встроенная система не будет иметь собственных конструктивных блоков (исключая лишь ряд встроенных датчиков) и на функциональном или программном уровне войдет в состав более сложных систем (например, комплексного управления двигателем внутреннего сгорания и трансмиссией). Но функции контроля и диагностирования традиционных механических узлов и электронного оснащения автомобиля сосредотачиваются именно в такой «распределенной» встроенной системе, на входы которой подаются сигналы с контрольных точек и встроенных диагностических датчиков.

## 25.2. Автомобильные дисплеи

Главное преимущество дисплеев перед другими средствами отображения состоит в том, что состав информации и ее количество можно изменять в зависимости от потребностей. При традиционных средствах получения информации такое ее количество и разнообразие превратили бы кабину автомобиля в кабину воздушного лайнера, сделав невозможным наблюдение за дорогой, дисплей же эту задачу решает, так как позволяет пользователю по его выбору менять программу отображения.

Существующие конструкции дисплеев предъявляют к автомобилю шесть основных требований:

1. Диапазон рабочих температур дисплея на автомобиле не должен выходить за пределы - 40...+85 °С.
2. Максимальное напряжение питания дисплея может достигать 100 В, однако чем оно выше, тем более дорогим и менее надежным он будет. Не целесообразно питать дисплей и от нескольких источников энергии, поскольку это усложняет схему. Самый выгодный вариант - напряжение 5 В.
3. Срок службы дисплея, устанавливаемого на автомобиль, должен превышать 100 тыс. ч.
4. Символы индикации на автомобильном дисплее должны быть хорошо различимыми при прямом солнечном освещении. Это означает, что яркость собственной освещенности экрана дисплея не может быть меньше 1200 кд/м<sup>2</sup>.
5. Коэффициент контрастности, т.е. отношение яркости экрана дисплея к яркости символов на нем должен быть равен 1:20 - для светоизлучающих и 1:5 - для светоотражающих дисплеев (для сравнения: коэффициент контрастности для страницы с напечатанным текстом равен 1:5,6).
6. Цвет экрана должен быть красным, голубым или зеленым (за рубежом регламентируется стандартами), но не исключаются желтый и белый.

Перечисленным требованиям, как показывает анализ, соответствуют в разной степени дисплеи на вакуумных люминесцентных (электронно-лучевых) трубках, на жидких кристаллах, а также электролитические дисплеи. Так, дисплеи на электронно-лучевых трубках привлекательны тем, что они хорошо освоены в производстве и широко применяются в различных информационных системах.

У жидкокристаллических дисплеев есть тоже большое достоинство: высокая контрастность изображения даже при солнечном освещении.

Всеми достоинствами жидкокристаллических обладают и электролитические дисплеи. Кроме того, у них есть и свои плюсы: небольшие допуски при производстве, большие углы обзора. Но управляющая схема получается сложной из-за наличия в ней запоминающего устройства, так как цифровая программа не только появляется на экране, но и должна стираться.

Существует не один способ высвечивания сигналов на дисплее. Во-первых, сигнальные символы традиционно подсвечиваются сзади цветными лучами. Способ прост, сигналы легко понимаются. Однако при одновременном появлении более пяти символов водитель в них путается. Кроме того, пока не разработаны достаточно понятные символы, обеспечивающие однозначность считываемой информации.

Во-вторых, сигнальная информация высвечивается на алфавитно-цифровом дисплее. Метод отличается простотой, размеры дисплея получаются небольшими, технология его изготовления несложная. Но при поставках системы за рубеж требуется применение разных языков. Для передачи сложной информации могут потребоваться аббревиатуры. Тогда, чтобы водитель понимал информацию о функциональных элементах, работа которых контролируется, потребуется специальное его обучение.

В-третьих, сигнальные символы образуются рядом точек (точечная матрица). При таком способе отображения информации языковых и других ограничений нет. В то же время подобрать хорошо узнаваемые символы на все случаи трудно.

Каждый из перечисленных выше способов, реализуемых в виде отображения предупреждающих сигналов, может иметь и дополнительные средства повышения информативности. В качестве такого средства уже используются синтезаторы речи.

В настоящее время дисплей базируется на микропроцессорной технике, возможности которой довольно велики. Поэтому контрольная система постепенно переросла в централизованную информационную систему, способную оценивать информацию, получаемую от других контролируемых центров (например, система управления двигателем, трансмиссией), и затем выдавать ее в соответствующем виде водителю. Иными словами, централизованная система неизбежно должна брать на себя функции контроля и обеспечения соответствия режимов работы автомобильных систем условиям движения. Дисплей здесь становится средством отображения рассогласования этих режимов и условий. Кроме того, дисплей отображает результаты работы централизованной информационной системы по бортовому диагностированию состояния автомобильных систем и узлов: сигналы о неисправностях передаются в центральный информационный процессор, а после обработки - на алфавитно-цифровой дисплей.

В электронных приборных панелях современных легковых автомобилей японских фирм широко применяются микропроцессоры. В качестве дисплеев используются матрицы на жидких кристаллах и вакуумной флуоресценции.

Дисплей микропроцессорной приборной панели на модели «Soarer» отвечает современным достижениям в этой области (рис. 25.3). Цифровой индикатор использован в спидометре, а условные графические дисплеи - в тахометре, в указателях уровня топлива и температуры охлаждающей жидкости, в регуляторе скорости и одометре.

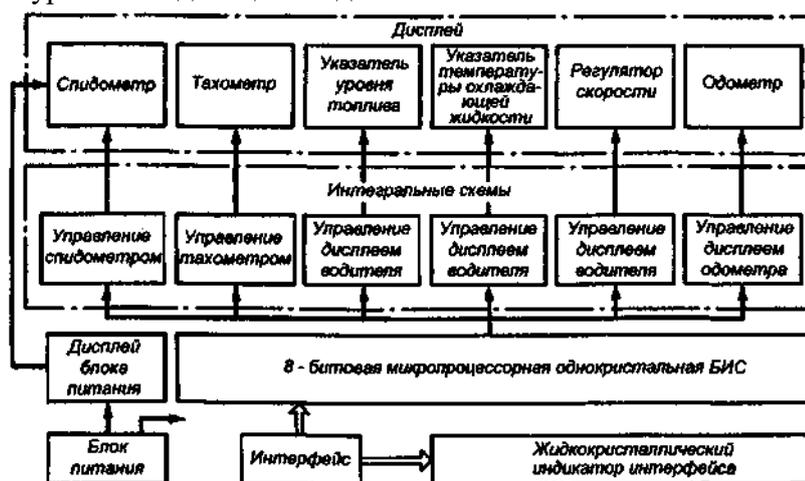


Рис. 25.3. Блок-схема микропроцессорной приборной панели автомобиля «Soarer»

Предварительное преобразование сигналов датчиков позволило получить нелинейные характеристики указателей температуры, дающие большую детальность отображения в наиболее ответственных участках рабочего диапазона, недостижимую для электромеханических стрелочных индикаторов. Широко использованы мигающие дисплеи. В системе применен однокристалльный 8-битовый микропроцессор и интегральные схемы управления дисплеями. Индикация производится японскими иероглифами и цифрами. Помимо обычного для электронных приборных панелей состава параметров система дает информацию о продолжительности кратковременных остановок, исправности микропроцессорной системы управления двигателем, контролирует периодичность замены масляных фильтров и свеч зажигания, обеспечивает ввод и своевременное воспроизведение напоминаний водителю.

Для эффективного применения электроники требуются три основных компонента: электронные блоки управления (ЭБУ), исполнительные механизмы и датчики. Конструкции блоков управления и исполнительных механизмов отработаны достаточно хорошо. Но с датчиками дело обстоит по-другому.

Датчики являются ответственным звеном в электронной системе управления или измерения и влияют на эффективность ее работы. Они обеспечивают абсолютные измерения того, чем надо

управлять или что следует измерять, будь это поток воздуха в двигателе или количество топлива в баке.

Надежность датчиков всегда была проблемой. Большинство из них взяты из аэрокосмической или полупроводниковой техники и обходятся очень дорого из-за непригодности конструкции к массовому производству. В основном они не подходят для интенсивной эксплуатации в автомобилях.

Необходимо преодолеть два основных барьера. Первый стоит на стадии выработки концепции или конструирования. Многие предлагают измерительные устройства, требующие слишком большой компенсации побочных влияний, например, температуры и термического расширения. В результате требуется дорогостоящее усовершенствование, приводящее к трудностям при изготовлении и тарировании; самый желательный датчик - наиболее эффективный, генерирующий сильный выходной сигнал без компенсации. Хороший пример тому - кислородный датчик, действия которого базируются на фундаментальной химической реакции, предсказуемой и точной.

Критическим моментом является эффективный взаимный подбор электрических характеристик. Самое важное для его «жизнеспособности» - физическое исполнение всего прибора. Корпус датчика должен быть рассчитан на экстремальные температуры, вибрацию и удар, быть устойчивым к загрязнителям и эксплуатироваться не менее 10 лет.

Одно из самых слабых мест в эффективном конструировании датчиков, вероятно, объясняется недостатком тесного взаимодействия между конструкторами автомобилей и электронных устройств.

В настоящее время имеются громадные возможности привлечения изготовителей датчиков в качестве поставщиков для автомобильной промышленности. Но эти поставщики вначале должны полностью понять, как датчики используются, каковы ограничения в цене и требования конструкций для массового производства.

По мере того как снижаются цены, ужесточаются требования к топливной экономичности и чистоте отработавших газов, растет потребность в датчиках электронных систем и расширяется их рынок. Чтобы резко снизить себестоимости всех составных частей электронных систем (микропроцессоров, датчиков), нужно создавать заново систему в целом. Но автомобильная промышленность развивается эволюционным путем, а не революционным. Для создания «авангардной» технологии необходимо 8-10 лет, в то время как применение традиционной для налаживания серийного производства новой электронной системы требуется только 4 года.

Сегодня полупроводниковые датчики считаются новым компонентом, их достоинством является преобразование синусоидального сигнала в серии прямоугольных импульсов. Микропроцессоры могут воспринимать только логические единицы и нули. Поэтому на выходе синусоидальный сигнал необходимо сравнивать с пороговой величиной и в период, когда его уровень превышает пороговую величину, считать сигнал равным нулю, а в период, когда уровень сигнала меньше порогового значения - единице. А частота импульсов характеризует скорость процесса.

Следующий шаг - обеспечение предварительной обработки сигнала перед подачей его в контроллер системы. Такие так называемые «интеллектуальные» датчики освободят центральный контроллер от предварительных вычислений, расширяя его возможности для реализации алгоритма управления и распределения информации между системами. «Интеллектуальные» датчики, вероятно, не будут непосредственно распределять информацию. Многие пользователи, подключая к одному датчику несколько систем, затрудняют его функционирование.

Интеллектуальные датчики будут следующим шагом вперед. Заказчики требуют от будущих датчиков способности к самодиагностике, распознаванию сбоев и ложных сигналов, удобства технического обслуживания. В настоящее время особенно растет потребность в приборах измерения ускорений - акселерометрах. В новейших системах управления надувными подушками безопасности для измерения ударного воздействия используются акселерометры, установленные непосредственно в блоке управления,

расположенном в салоне автомобиля. Это исключает необходимость иметь множество внешних датчиков (неэлектронные системы обычно содержат 4-5 механических датчиков), сокращает длину проводов и объем требуемого для размещения системы пространства. Снижается также и время срабатывания подушки.

Но акселерометры используются не только в системах управления подушками. Они могут применяться также в антиблокировочных системах (ABS), системах регулирования тягового усилия, в активных и полуактивных подвесках, навигационных системах и системах контроля детонации в двигателе. А новое поколение миниатюрных датчиков - трехмерные структуры, выполненные в кремнии, могут получить применение в новых областях.

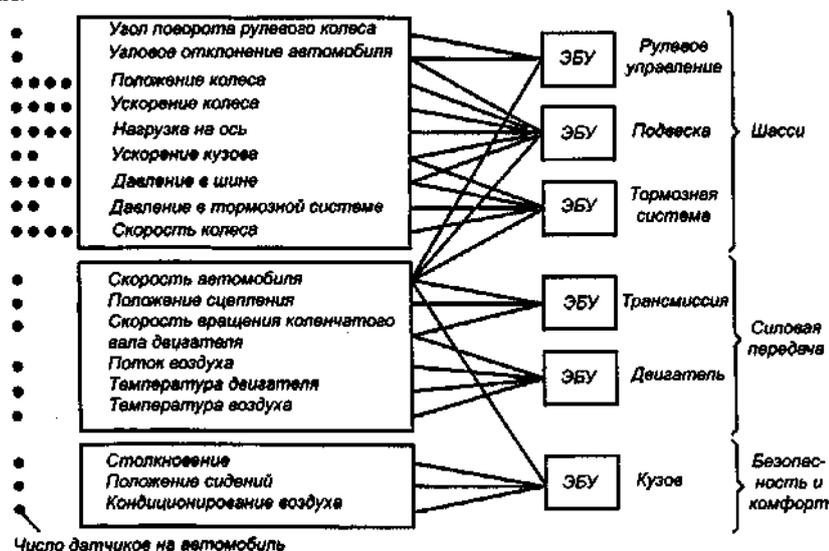


Рис. 25.4. Применение датчиков в электронных системах управления

В некоторых (но не во всех) случаях акселерометры могут быть заменены оптическими датчиками. Основанные на использовании инфракрасных излучателей (светоизлучающих диодов) и детекторов, эти оптические датчики могут быть использованы для измерения скорости автомобиля, его положения и высоты, уровней жидкости в гидросистеме и светового потока, для определения состава рабочей смеси в случае многотопливного двигателя. Однако широкого распространения оптические датчики не получают до освоения волоконно-оптической технологии и мультиплексирования. До того времени оптические датчики будут применяться в тех случаях, когда они имеют очевидные функциональные или экономические преимущества.

Датчик давления, объединенный с микрокомпьютером, который имеет встроенный аналого-цифровой преобразователь, дает возможность точно измерять давление и поддерживать взаимодействие с центральным компьютером или с другими компьютерными узлами управления автомобиля. Датчики, которые сочетают полностью совместимый преобразованный сигнал на выходе и пьезорезистивный элемент с линейной характеристикой, представляют собой новое поколение «интеллектуальных» датчиков давления на базе интегральных микросхем. Такие датчики выполняют основные функции преобразования сигнала для взаимодействия с системой и компенсации влияния температуры, обладают памятью, обеспечивают автокомпенсацию и адресуемость и интерактивную связь с микропроцессором. Сочетание усовершенствований датчиков и микропроцессоров обеспечивает все функции, необходимые для получения действительно «интеллектуального» датчика всего на двух полупроводниковых компонентах.

В авто- и тракторостроении до недавнего времени датчики использовались в основном в системах контроля за работой двигателя: номенклатура и конструкция этих традиционных датчиков установились в начале 80-годов. Совершенно новое положение сложилось с появлением систем электроники: для таких систем требуются датчики значительно более высокого технического уровня, главным образом электронные, при

производстве которых используются современные микроэлектронные технологии групповой обработки.

Микроэлектронные датчики абсолютного и относительного давления воздуха ДДА-ЮОР; ДДА-100А; НДП-1 (рис. 25.5) созданы совместно с предприятиями МНТП «Инсеп» (г.С.-Петербург) и МХО «Новокон» (г. Раменское Московской обл.), выпускаются серийно. Все датчики выполнены с кремниевым монокристаллическим тензопреобразователем в виде мембраны с тензорезисторами и схемой термокомпенсации. Они предназначены для микропроцессорных систем управления автомобильными двигателями и по некоторым параметрам, как видно из табл. 25.1, превосходят аналогичные датчики других фирм (например, датчик 136RC15A2).

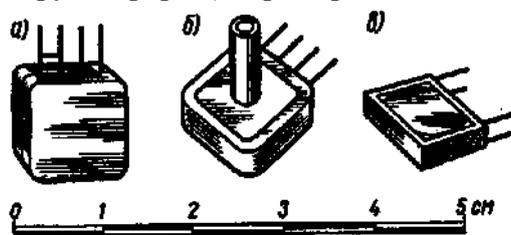


Рис. 25.5. Датчики давления: а - ДДА-ЮОР; б - ДДА-ЮОА; в - НДП-1

Модель датчика	Диапазон измерений, кПа	Начальный уровень выходного сигнала, мВ	Диапазон измерения выходного сигнала, мВ
136RC15A2	0...100	±1	+50±1,25
ДДА-110А	-100...0	} ±0,5	50±0,75
ДДА-ЮОР	0...100-100...0		
НДП-1	0...100-100...0		

Таблица 25.1

Температурный коэффициент сигнала при нулевом давлении, мВ/К, в диапазонах температур, К (°С)			Температурный коэффициент сигнала при номинальном давлении, %/К, в диапазонах температур, К (°С)		
233...273 (-49...0)	273...323 (0...+50)	323...358 (+50...+85)	233...273 (-40...0)	273...323 (0...+50)	323...358 (+50...+85)
Не нормируется	0,16	Не нормируется	Не нормируется*	0,12	Не нормируется
0,2	0,16	0,16	0,2	0,05	0,12

Датчики угла и угловой скорости на эффекте Холла (рис. 25.6) содержат многополюсный магнитный ротор, который действует на специальную микросхему с элементом Холла, что обеспечивает (в зависимости от числа полюсов) от 4 до 10 импульсов на оборот.

Существует три варианта таких датчиков для применения в щитковых приборах контроля, электронных спидометрах или тахометрах, в маршрутном компьютере. Их производитель - АО «КЗАМЭ».

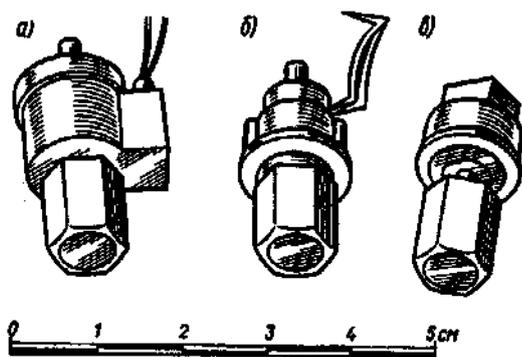


Рис. 25.6. Датчики скорости:

а - с проходным валом (1-й вариант); б - то же (2-й вариант);  
в - с непроходным валом

Основные характеристики датчиков скорости следующие:

Диапазон измерения, мин-1 ..... 0...3500

Напряжение, В:

питания ..... 5-18

логической единицы .....  $0,9 U_n$

логического нуля ..... 0,3

Диапазон рабочих температур, К (°C) 238...398 (-40...+125)

Датчики температуры жидкости и воздуха (рис. 25.7) построены на одной и той же микросхеме, имеют линейную характеристику с чувствительностью 10 мВ/К, что обеспечивает большой сигнал, совместимый с современными АЦП (табл. 25.2). Разработанные датчики температуры воздуха 29.3839 и жидкости 22.3828 готовятся к серийному производству. Они имеют значительно большую погрешность и инерционность, чем датчик температуры жидкости 19.3828, который выпускается АО «КЗАМЭ».

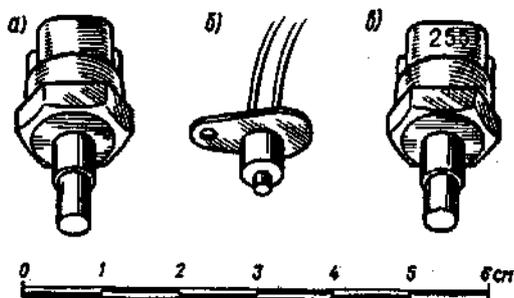


Рис. 25.7. Датчики температуры: а-19.3828; б - 29.3839; в - 22.3828

Таблица 25.2

Модель датчика	Диапазон измерения, К(°C)	Погрешность, К, в температурных диапазонах, К (°-C)			Постоянная времени, с.
		273...323 (0...+50)	253...273 (-20...0) и 323...383 (+50...+110)	228...255 (-45... -18) и 373...398 (+100...+125)	
19.3828	238...398 ( - 35...+125)	±3,5	±4,5	±5,0	60
19.3839	Тоже	±1,0	±2,0	±2,5	15
22.3828	«	±1,0	±2,0	±2,5	20

Микроэлектронные датчики контроля уровня жидкости выполнены на основе единого фольгового терморезистора. Они применяются в масляном щупе для автомобилей ВАЗ-2108 и ВАЗ-2110 и для контроля уровня жидкости в гидроусилителе рулевого управления автомобилями УАЗ. Основные характеристики датчиков (рис. 25.7) следующие:

Температурный рабочий диапазон, К(°С).....213...398  
 (-60...+125)

Погрешность контроля уровня, мм.....±1

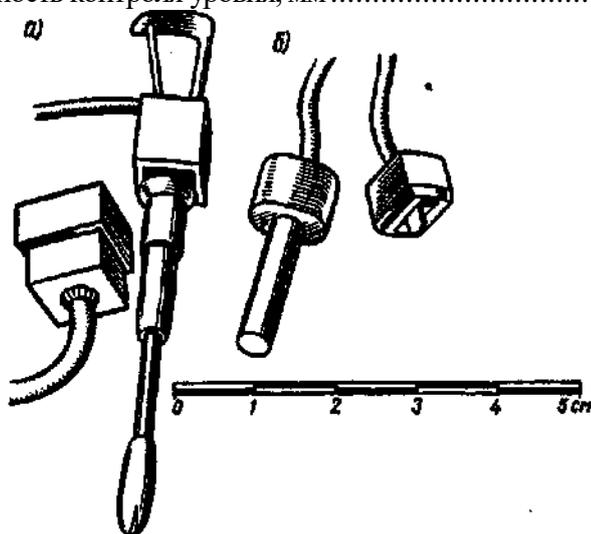


Рис. 25.7. Приборы контроля уровня жидкости: а - масляный щуп; б - датчик уровня жидкости в гидроусилителе рулевого управления

Применение единого терморезистора и простой микросборки позволяет проектировать датчики мехатронных модулей на один или несколько контрольных уровней автомобильных жидкостей.

## 26. Мехатронное управление амортизатором автомобиля.

Автоматическое управление амортизатором заключается в изменении сопротивления перетекания жидкости в амортизаторах путем изменения диаметра числа отверстий (жиклеров) или вязкости жидкости.

Наиболее типичными функциями амортизатора являются противодействие оседанию автомобиля при резких ускорениях и переключениях передач, «нырянию» при резком торможении, крену при резких поворотах и др.

Изменение диаметра и числа отверстий выполняется нами при вращении подвижной мембраны, открывающей различные диаметры и число отверстий, выполненных по спирали Архимеда.

Для изменения сопротивления амортизатора при поворотах автомобиля необходимо знать положение рулевого колеса. Поэтому на валу рулевого класса устанавливается датчик, который реагирует не только на угол поворота, но и на направление поворота.

Электронный блок управления силой сопротивления амортизатора выполняется на цифровых схемах. Все входные сигналы являются цифровыми и поступают в микро ЭВМ через схемы входной обработки, формирующие сигналы. Выходные сигналы ЭБУ подаются на исполнительные механизмы управления режимами работы амортизаторов и на индикаторы, показывающие уровень силы сопротивления, рис.26.1.

Эти сигналы поступают через схемы выходной обработки от микро ЭВМ.

В схемах управления исполнительными механизмами предусматриваются средства обеспечения работоспособности при появлении ошибок, от выбросов напряжения к защите от перегрузки по току.

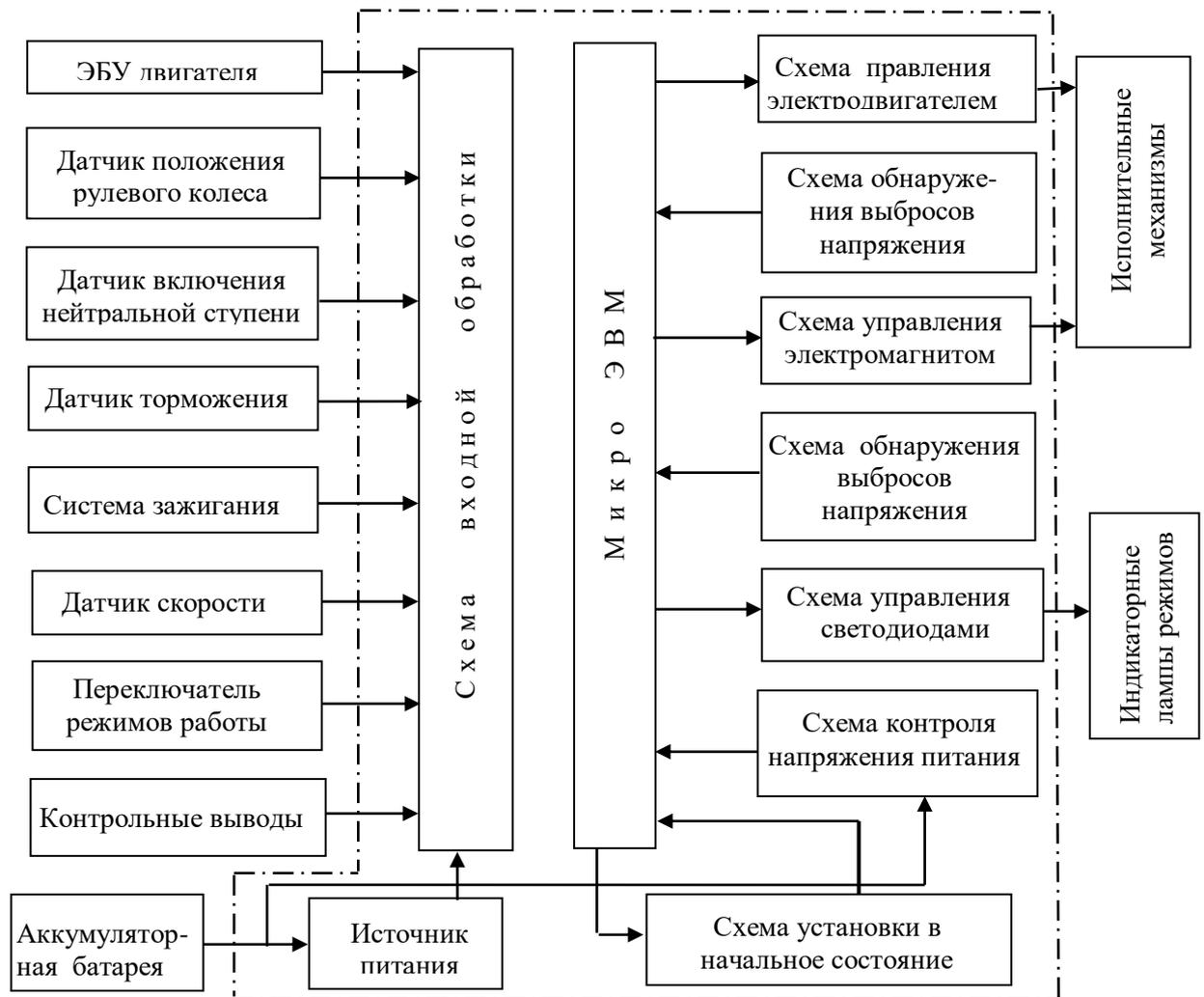


Рис. 26.1. Структурная схема ЭБУ

Источники питания преобразуют напряжение бортовой сети в напряжение 5в, необходимое для работы интегральных схем.

Выполнение основной программы занимает ~ 4 мс. За это время ЭВМ обрабатывает входные сигналы от датчиков и подает выходные сигналы на исполнительные механизмы. Чем короче время выполнения основной программы, тем выше быстродействие ЭБУ.

Электронное управление регулятором жесткости осуществляет микропроцессор, который получает информацию от датчиков угла поворота и угловой скорости рулевого колеса, положения педали подачи топлива, давления в тормозной системе, крене кузова, скорости автомобиля.

В память микропроцессора заложен ряд предельных параметров и их сочетаний, определенных на основе продолжительных испытаний автомобиля.

Эти данные сравнивают с получаемой от датчиков информацией, и микропроцессор выбирает соответствующий режим подвески. Причем гидравлическая система включается немедленно (время срабатывания менее 0.05 сек), опережая динамическую реакцию автомобиля, что особенно важно при быстрой езде по извилистой дороге.

По командам микропроцессора регулятор жесткости вовлекает большее или меньшее число и диаметр отверстий на подвижной мембране, выбирая мягкий или жесткий режим подвески.

Работа подвески зависит от получаемой от датчиков информации и переработки её микропроцессором, который при обнаружении какого-либо отклонения (от предварительно введенных данных) подает команду на переход в жесткий режим.

Датчик угла поворота и угловой скорости рулевого колеса информирует о движении предельных значений этих параметров. В этот момент происходит переход в жесткий режим. Подвеска остается в данном режиме до тех пор, пока угол поворота рулевого колеса не будет ниже предельного значения. В результате качка уменьшается и замедляется, благодаря переходу подвески в жесткий режим.

Датчик положения педали подачи топлива регистрирует время, необходимое для прохождения 10% полного хода педали.

Датчик крена (колебания) кузова регистрирует поворот торсионного вала. Переход в жесткий режим происходит при достижении определенного уровня крена кузова.

Датчик скорости автомобиля информирует о её значении, когда необходимо определить данные, применяемые при переходе в жесткий режим по сигналам других датчиков, а также для обеспечения большей чувствительности к повороту рулевого колеса на большой скорости или к крену (колебанию) кузова на малой скорости движения автомобиля.

Чем меньше жесткость подвески, тем меньше колебания кузова и тем выше комфортабельность автомобиля. Уменьшение жесткости чревато появлением продольных колебаний. По этой причине управление жесткостью подвески в большинстве случаев комбинируют с управлением высотой кузова и силой сопротивления амортизатора.

Схема управления жесткостью подвески автомобиля "Toyota" представлена на рис.26.2.



Рис. 26.2. Структурная схема управления жесткостью подвески автомобиля "Toyota"

## 27. Экономические и социальные аспекты мехатроники

Мехатронный подход в построении машин нового поколения заключается в переносе функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным (электронным, компьютерным и информационным) компонентам, которые легко перепрограммируются под новую задачу и при этом являются относительно дешевыми. (рис.27.1)

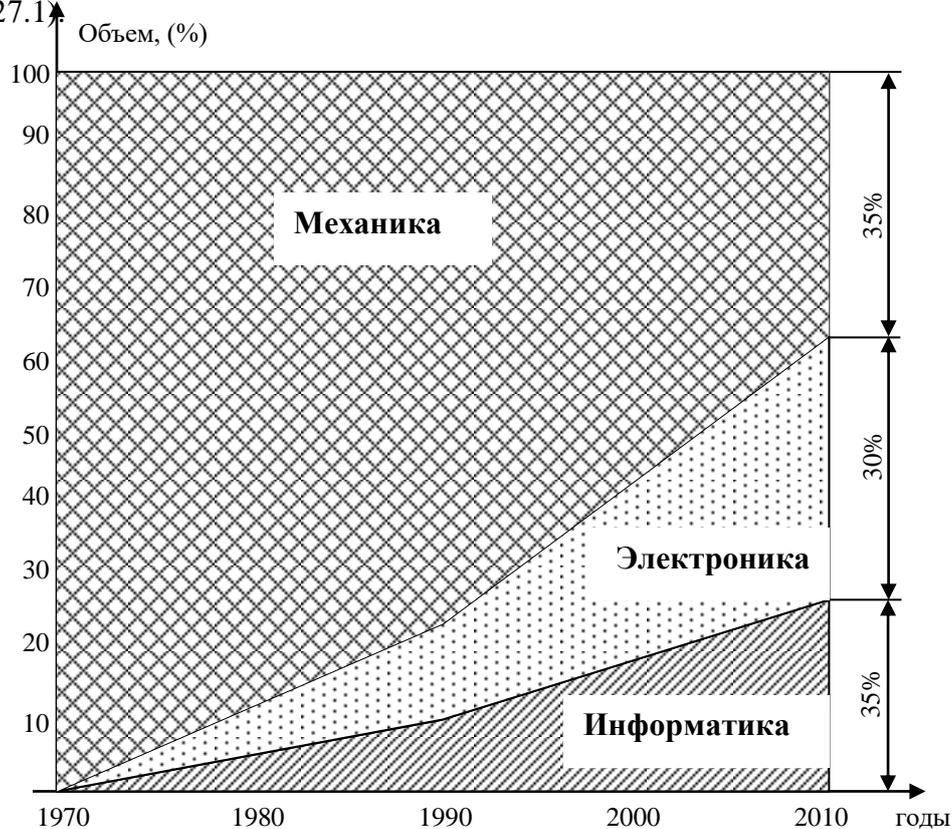


Рис. 27.1. Динамика переноса функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным

Из рис.27.1 видно, что с 1990 года происходит постепенное вытеснение механических узлов – сначала электронными, а затем и компьютерными блоками. Вместе с тем тенденция перехода от механических к мехатронным технологиям в современном машиностроении не «закрывает» механику. Системный подход диктует новые требования к встроенным механическим и гибридным компонентам, что в свою очередь ведет к развитию новых технологий и конструкторских решений в области механики.

Для создания машин нового поколения необходимы принципиально новые подходы к конструированию и производству приводных модулей и систем.

К функциональным характеристикам приводной техники для технологических машин можно предъявить следующие требования:

- сверхвысокие скорости движения рабочих органов машин, которые определяют новый уровень производительности технологических комплексов;
- сверхвысокая точность движений, необходимую для реализации прецизионных технологий (вплоть до микро- и наноперемещений);
- максимальную компактность конструкций и минимизацию массогабаритных показателей модулей (вплоть до миниатюризации в микросхемах);
- интеллектуальное поведение машин, функционирующих в изменяющихся и неопределенных внешних средах;

- реализацию быстрых и точных перемещений рабочих органов по сложным контурам и поверхностям;
- существенное расширение технологических и функциональных возможностей оборудования, желательно без увеличения его цены;
- способность системы к реконфигурации в зависимости от выполняемой конкретной задачи или операции;
- высокую надежность и безопасность функционирования.

Добиться качественно новых характеристик позволяет мехатронная концепция «встроенного проектирования», которая предполагает конструктивное объединение элементов системы в единый модуль.

Высокая точность, предельное быстродействие сложные законы перемещения выходного звена в пространстве и во времени – определяются технологической постановкой задачи управления.

Синергетическая интеграция при проектировании мехатронных модулей основана на трех базовых принципах:

- реализации заданных функциональных преобразований минимально возможным числом структурных и элементов в единые многофункциональные модули;
- выборе интерфейсов в качестве локальных точек интеграции и исключение избыточных структурных блоков и интерфейсов как сепаратных элементов;
- перераспределение функциональной нагрузки в мехатронной системе от аппаратных блоков к интеллектуальным (электронным и компьютерным) компонентам.

Практическая реализация принципов синергетической интеграции при проектировании позволяет обеспечить основные преимущества мехатронных систем по сравнению с традиционными машинами и добиться качественно новых показателей, в первую очередь по компактности конструкции, скорости и точности движения.

Интеграция предполагает не только аппаратное объединение элементов, но и организацию интегрированных информационных процессов в интеллектуальных модулях.

Синергетическую интеграцию в мехатронике осуществляют при проектировании двумя основными способами – это функционально-структурная интеграция и структурно-конструктивная интеграция, которые объединяют в общий алгоритм проектирования мехатронных систем.

Сложность и противоречивость требований, предъявляемых к мехатронным модулям движения, обуславливает целесообразность мехатронного подхода к их проектированию.

В частности, следование принципу синергетической интеграции элементов системы приводит к обеспечению желаемого уровня качества модуля за счет конструктивного и функционального взаимопроникновения его компонентов, многие из которых являются специализированными и создаются в ходе параллельного системного проектирования с учетом их последующего эффективного объединения. Это хорошо видно из рис. 27.2, на котором представлена классификация мехатронных модулей.

Если преобладающим является требование обеспечения компактности мехатронного модуля движения, то оно может быть реализовано путем использования бесконтактных электрических машин и их интеграции с преобразователями движения и информационно-измерительными элементами.

При этом преобразователи движения и датчики не являются отдельными устройствами, и становятся неотъемлемыми элементами двигателя.

Синергетический эффект достигается также за счет выполнения некоторыми компонентами мехатронного модуля движения нескольких функций одновременно. Такие решения позволяют исключить многие механические интерфейсы, упростить и удешевить конструкцию, устранить необходимость механической подгонки и согласования датчика и двигателя.

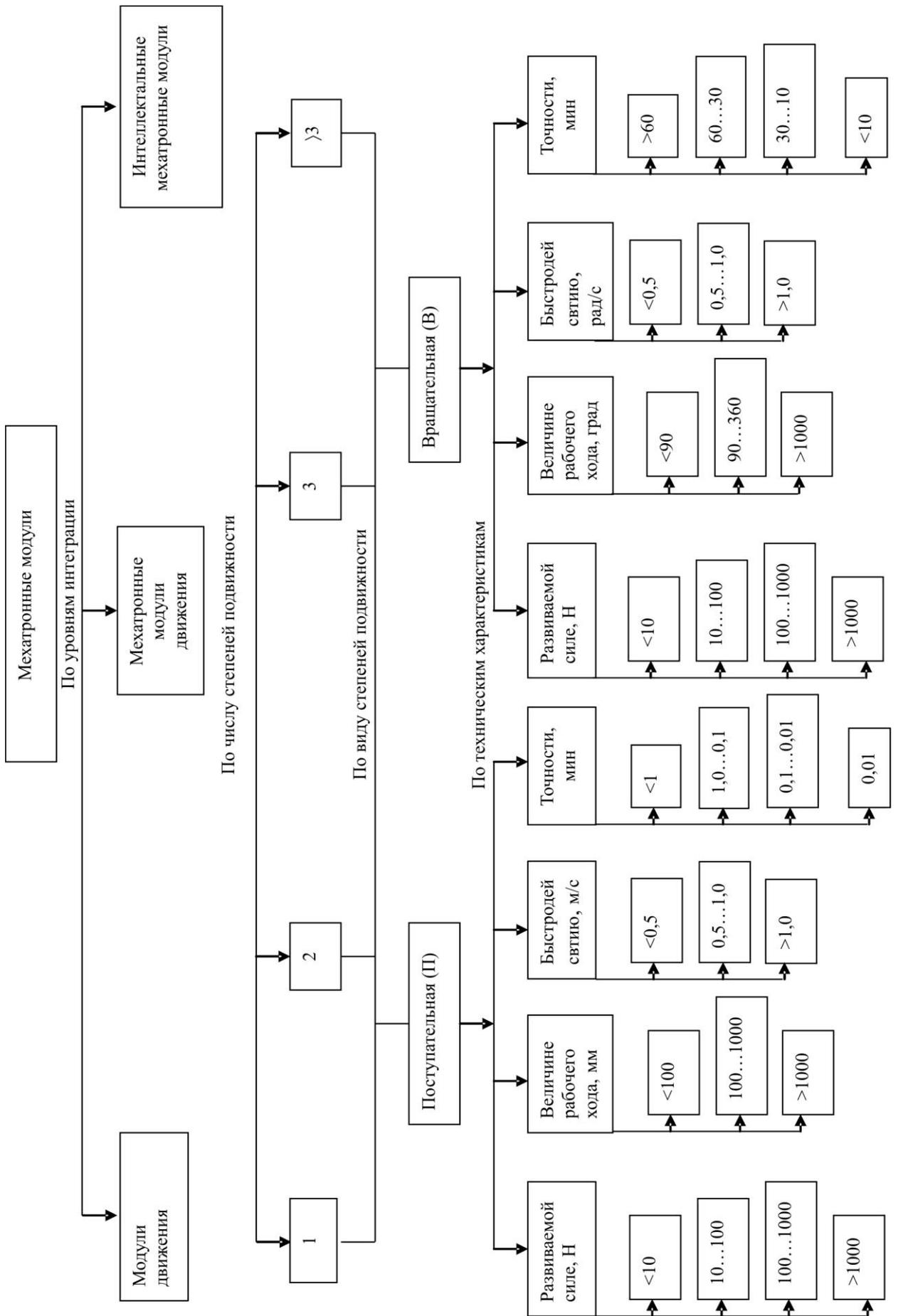


Рис. 27.2. Классификация мехатронных модулей

Использование современных информационных систем кардинально изменило нашу жизнь, но мы редко задумываемся о том, насколько мы стали зависимыми от них. Сегодня индустрия информационных систем является самой неэффективной из всех видов технологической деятельности человека, а инвестиции в нее самыми рискованными. Альтернатива развитию индустрии программного обеспечения пока неизвестна. В современном мире усложнение технических объектов происходит за счет наращивания их «интеллектуального компонента»- встроенного программного обеспечения. При этом конструкция исполнительных механизмов зачастую существенно упрощается. Это упрощение становится возможным за счет изменения архитектуры мехатронной системы путем разделения ее энергетических и информационных потоков. Хотя всякая машина предназначена для передачи и трансформации энергии и информации, традиционное архитектурное решение в конструкции, основано на встраивании информационных потоков в потоки энергетические. Платой за новые перспективы и энергосбережение в мехатронных системах является наличие встроенного программного обеспечения, так называемого интеллектуального компонента. Но если уж мы вынуждены встроить в систему процессор, то почему бы не загрузить его как можно больше - сделать эту систему еще более умной, например, заставить ее заниматься еще и диагностикой своих подсистем? Искушение усложнить программное обеспечение системы огромно и, как правило, непреодолимо. Стремление к чрезмерной интеллектуализации мехатронной системы приводит к усложнению ее программного обеспечения, а значит, и росту затрат, заодно к изменению структуры цены. Затраты на проектирование становятся несравненно меньше затрат на разработку программного обеспечения.

Кроме того, по данным Вашингтонского института исследований в области программной инженерии, только 12% всех программных проектов заканчивается в срок, укладываются в бюджет и удовлетворяют всем требованиям заказчика. В то же время 74% программных проектов сворачиваются либо ввиду срыва графика работ, либо перерасхода бюджета, либо невозможности удовлетворить требования заказчика. Для инвестора это означает, что шанс успеха при вложении в программную индустрию составляет один к шести.

Компьютерные мехатронные системы лучше проявляют себя при работе с установившимися процессами, а не переходными. Основная проблема как интеллектуальных мехатронных систем, так и информационных систем в целом заключается в том, что они работают во взаимодействии с человеком – самым ненадежным и непредсказуемым с точки зрения обработки информации компонентом системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. МакКаллоу У. С., Питтс В. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности // Нейрокомпьютер.—1992.—№ 3, 4.—С. 40—53.
2. Widrow B., Hoff M. E. Adaptive switching circuits // 1960 IRE WESCON Convention Record. Part 4.—New York: IRE, 1960.—Р. 96—104.
3. Минский М., Пайперт С. Перцептроны.— М.: Мир, 1971.
4. Kohonen T. Self-Organization and Associative Memory.—Berlin: Springer, 1987. Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1 / Rumelhart D. E., McClelland J. L., eds.—Cambridge: MIT Press, 1986
5. И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. Технологии обработки командной информации и управления поведением в интеллектуальных робототехнических системах. М.: "Информационные технологии" 2005. №7
6. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: Учебник. - М.: ИЦ МГТУ "СТАНКИН", 2004
7. Подураев Ю.В., Кулешов В.С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника . 2000. №1. С.5
8. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. М.: Изд. - МГТУ СТАНКИН , 1999.
9. Богачев Ю .. Мехатроника - достижения и проблемы. М.: Приводная техника, №4,1998.
10. Егоров О.Д. Точность манипуляционных механизмов роботов. Учебное пособие. М., МПИ, 1989 – 104с.
11. Введение в мехатронику. Учебное пособие / Под ред. А.К.Тугенгольда, 2-ое изд. Ростов-на-Дону: изд. Центр ДГТУ, 2002.
12. Казмиренко В.Ф. Электрогидравлические мехатронные модули движения. М., Радио и связь, 2001.
13. Крайнев А.Ф. Механика машин. Фундаментальный словарь. М., Машиностроение, 2000.
14. Статьи по мехатронным системам машин. Российский журнал «Мехатроника, автоматизация, управление», 2000-2008 годы. Москва.
15. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990.
16. Шермухамедов А.А., Лебедев О.В. САПР в машиностроении. Т.,Фан,2004, с.112.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ВИБРОДИАГНОСТИКА АГРЕГАТОВ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ МАШИН.

С течением времени происходят изменения в агрегатах автомобилей. Вследствие уменьшения допусков при производстве деталей, применения реечного рулевого управления и современных систем независимой подвески всех колес сегодня легковые автомобили более чувствительны к проблемам вибрации, чем раньше. Рассматривая различные скорости протекающих процессов изнашивания, можно сделать вывод, что для многих элементов механических систем интенсивность изменения параметров состояния функционально связана с вибрационными характеристиками машин.

Основными источниками, которые определяют вибрацию транспортной машины, являются ДВС, трансмиссия, колеса и шины, неровности дорожной поверхности. При этом по отношению к машине первые три источника являются внутренними, а последний – внешним. Возмущающее воздействие от внутренних источников обусловлено следующим: взаимодействием контактирующих тел в кинематических парах (удары), неуравновешенностью и отклонением от соосности вращающихся деталей; непостоянством частоты вращения и крутящего момента на элементах агрегатов (валах, зубчатых колесах); трением качения и скольжения. Силовой агрегат, трансмиссия и колеса относятся к вибрационным системам колесных машин в основном с периодическим характером возмущения. Диапазон частот при вибрации силового агрегата более широкий, чем трансмиссии, и существенным образом зависит от типа двигателя.

Случайные колебания узлов и агрегатов транспортной машины связаны с кинематическим воздействием от дорожной поверхности. В области частот  $0...25 \text{ Гц}$ , где в наибольшей степени проявляется случайная вибрация, вертикальные колебания происходят главным образом с собственными частотами колебаний поддрессоренных ( $1...3 \text{ Гц}$ ) и неподдрессоренных ( $6...19 \text{ Гц}$ ) масс. Вибрация кабины и кузова с такими частотами может вызвать инфразвуковые колебания внутри колесной машины со звуковым давлением высокого уровня.

Выбор конкретных методов вибродиагностики технических устройств (функциональных, статистических и др.) в значительной степени зависит от характера процесса собственной вибрации. Для описания свойств случайных процессов следует использовать статистические характеристики: среднее квадратическое отклонение, плотность вероятности, корреляционная функция, спектральная плотность, которые дают достаточно полную информацию о свойствах процесса во временной и частотной областях.

Вибросмещение  $z_g$  является результатом вынужденных колебаний, и закон движения описывается уравнением

$$z_g = \frac{F_0}{m(\omega_c^2 - \omega_g^2)} \sin(\omega_g t) \quad (\text{П.1})$$

где  $F_0$  — амплитуда вынужденных колебаний;

$\omega_{вн}$  и  $\omega_c$  — угловая частота, соответственно, вынужденных и собственных колебаний рассматриваемого агрегата массой  $m$ .

Угловая частота  $\omega$  ( $\text{рад/с}$ ) может быть определена через частоту  $\nu$  ( $\text{Гц}$ ), с использованием соотношения  $\omega_{вн} = 2\pi\nu$ . Обозначим

$$\frac{F_0}{m(\omega_c^2 - \omega_g^2)} = A_g, \quad (\text{П.2})$$

где  $A_g$  — максимальное смещение тела вибрации от центра равновесия. Величина  $A_g$  представляет амплитуду вынужденных колебаний. Значение виброскорости  $V_g$

определяется путем дифференцирования по времени выражения (П.1) с учетом (П.2)  
 $V_g = dz_g / dt = A_g \omega_g \cos(\omega_g t)$

Отсюда следует, что амплитуда виброскорости на определенной частоте пропорциональна смещению, умноженному на эту частоту, и сдвинута по фазе на  $\pi/2$  радиан (то есть на четверть цикла) относительно вибросмещения.

При фиксированном вибросмещении виброскорость будет удваиваться с удвоением частоты. Этот вывод справедлив для вибраций, в которых частота  $\omega_e$  вынужденных колебаний существенно отличается от частоты  $\omega_c$  собственных колебаний системы.

Виброускорение  $a_e$  — это производная от виброскорости по времени.

$$a_e = dV_e / dt = A_e \omega_e^2 \sin(\omega_e t)$$

Следовательно, виброускорение при фиксированном вибросмещении пропорционально квадрату частоты вынужденных колебаний и относительно его сдвинуто по фазе на  $\pi/2$  радиан.

На основании изложенного следует, что одни и те же вибрационные данные смещения, скорости или ускорения будут выглядеть по-разному. На смещении будет усилена низкочастотная область, а на ускорении — высокочастотная при ослаблении низкочастотной.

При анализе спектра вибросигнала мехатронного узла, имеющего зубчатую пару редуктора амплитуда гармоники на частоте зубозацепления  $\nu_{зп}$  обычно очень чувствительна к нагрузке. Высота пика частоты  $\nu_{зп}$  в спектре зависит от достаточно многих параметров, основными из которых можно считать: 1) качество изготовления зубчатой пары, ее закалка, шлифовка; 2) качество, достаточность и чистота смазочного масла; 3) нагрузка зубчатой пары нагрузочным моментом, передаваемым от двигателя в исполнительный механизм.

При ударах в зубчатой паре на зубчатые колеса и на конструкцию редуктора воздействует ударный импульс силы. Этот импульс возбуждает в конструкции механические колебания, которые, в общем случае, затухают по экспоненциальному закону. Частота, с которой будут колебаться элементы конструкции, т. е. частота “внутреннего заполнения” таких экспоненциальных ударов, определяется собственным механическим резонансом колеблющегося элемента зубчатой пары. Обычно эта частота не является строго фиксированной, а представляет собой совокупность близко расположенных частот, соотношение амплитуд которых достаточно случайно.

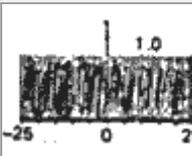
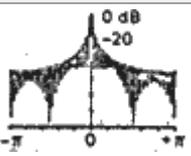
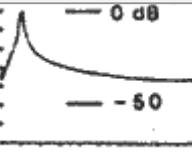
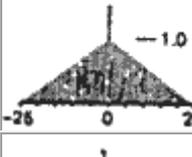
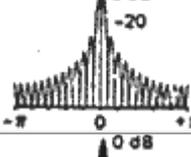
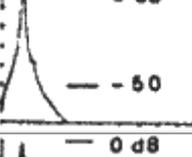
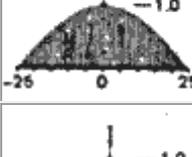
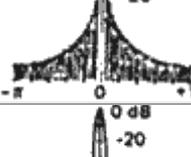
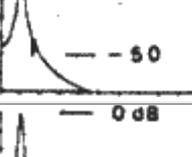
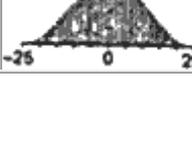
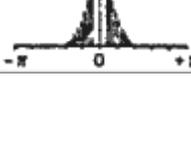
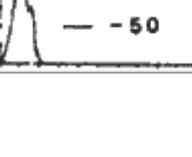
Конструкция зубчатой пары редуктора является резонансным контуром, в котором вибрации возбуждаются динамическими ударами, обусловленными процессом передачи вращающего момента через зубчатые пары. Если теперь зарегистрировать спектр колебаний конструкции с таким резонансным контуром, то в нем, наряду с пиком на частоте зубозацепления, будет пик, или горб с “белым шумом”, расположенный на частоте собственного резонанса элемента конструкции. Часто в спектре вибросигнала от зубчатой пары этот резонансный пик по своей амплитуде, а тем более по мощности, оказывается даже значительнее самого пика гармоники частоты зубозацепления. Кроме того, на спектре бывает несколько таких резонансных пиков от частот разных элементов редуктора. Этот резонансный гармонический пик, возбужденный на частоте собственного резонанса зубчатой пары, удобно использовать для оценки состояния и диагностики дефектов редукторов трансмиссии автомобиля. Таким образом, существующие методы диагностирования технического состояния агрегатов и систем автомобиля являются трудоемкими, а достоверность их составляет лишь 0,58...0,62. Использование вибрационных методов диагностирования имеет преимущества, которые позволяют автоматизировать процесс диагностирования, уменьшить трудоемкость, повысить достоверность диагностирования и прогнозировать остаточный ресурс. Достоверность результатов вибродиагностики в значительной степени определяется знанием характера процесса собственной вибрации диагностируемого изделия.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2.**  
**ОКНА ВЗВЕШИВАНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА**  
**ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ.**

П.2.1. Основные параметры "окон взвешивания", применяемых для спектрального анализа вибрации.

Название окна	Макс. уровень боковых лепестков, -дБ от главного	Эквивалентная ширина главного лепестка функции окна		Коэффициент передачи по мощности	Макс. искажение уровня из-за "просачивания" мощности в боковые лепестки, дБ
		1	0,88		
1 Прямоугольное	- 13	1	0,88	1	- 3,922
2 Треугольное	- 26	1,33	1,28	0,4902	- 1,823
3 Косинус	- 23	1,23	1,20	- ,64	- 2,10
4 Ханна	- 32	1,50	1,44	0,5	- 1,424
5 Хамминга	- 42	1,36	1,30	0,54	- 1,752
6 Чебышева	- 50	1,51	1,44	0,527	- 1,675
7 Гаусса	- 64	1,90	1,79	0,388	- 1,021
8 Кайзера-Бесселя	- 70	1,778	1,69	0,4138	- 1,037
9 ФЛЭТ- ТОП	- 80	3,006	2,987	0,2594	- 0,1
10 Блэкман-Харрис(3-го порядка)	- 71	1,704	1,619	0,424	- 1,135
11 Блэкман-Харрис(4-го порядка)	- 98	1,976	1,871	0,364	- 0,85
12 Блэкман-Харрис улучшенное(4-го порядка)	- 80	1,906	1,808	0,378	- 0,91
13 Экспоненциальное (1/e)		1,082	0,921	0,638	- 3,656
14 Экспоненциальное (1/e <sup>2</sup> )		1,313	1,023	0,441	- 3,03
15 Экспоненциальное (1/e <sup>3</sup> )		1,657	1,163	0,326	- 2,35
16 Экспоненциальное (1/e <sup>4</sup> )		2,074	1,358	0,255	- 1,767

Таблица П.2.2. Сравнение функций различных окон взвешивания.

Название окна	Вид окна во временной области	Вид окна в частотной области	Разрешение по частоте 2-х пиков(разность уровней - 50 дБ)	Макс. уровень боковых лепестков, - дБ от главного лепестка	Скорость спада боковых лепестков, дБ/октава	Эквивалентная ширина главного лепестка функции окна	
						Полная	-3 дБ от макс.
1 Прямоугольное				- 13	6	1	0,88
2 Треугольное				-26	12	1,33	1,28
3 Косинус				-23	12	1,23	1,20
4 Ханна (Cos <sup>2</sup> )				-32	18	1,50	1,44

5 Cos <sup>3</sup>				-39	24	1,73	1,66
6 Хамминга				-42	6 дБ/окт.в диапаз.5 $\Delta f$	1,36	1,30
7 Cos <sup>4</sup>				-48	30	1,94	1,86
8 (Cos <sup>2</sup> ) x exp				нет	18 монотонно убывающая	2,02	1,87
9 Чебышева				-50	0	1,51	1,44
10 Гаусса				-64	26	1,90	1,79
11 Кайзера-Бесселя				-70	38,5	1,80	1,71

П.2.3. Особенности применения некоторых "окон взвешивания".

Прямоугольное-	Применяется для анализа переходных (импульсных) процессов, когда "просачивание энергии" в боковые лепестки не имеет особого значения, или когда частота исследуемого сигнала точно совмещена со средней частотой окна (например, при синхронизации от ударного молотка при испытаниях мехатронной конструкций).
Ханна (Ханнинга)-	Наиболее часто применяемое окно, представляет собой наиболее оптимальный компромисс между разрешением по частоте и "энергией просачивания" в боковые лепестки. Очень часто применяется для анализа шума и исследования частотных характеристик в широком диапазоне частот.
Гаусса-	Одно из первых "окон взвешивания" получивших практическое применение в анализе сигналов. Особенностью этого окна является максимальная энергия сосредоточенная в главном лепестке. Наилучшее применение- детектирование (выделение основного) сигнала.
Кайзера-Бесселя -	Максимально из всех существующих окон подавляет боковые лепестки, имея при этом приемлемую ширину основного лепестка. Имеет классическое применение в спектральном анализе сигналов. Наилучшим образом подходит для разделения 2-х близко расположенных спектральных пиков, имеющих большую разницу в уровнях (широкий динамический диапазон измерений).
Флэт-Топ -	Разработано для получения максимальной точности измерения уровней периодических сигналов. Наилучшее применение - гармонический анализ мехатронных машин и модулей.
Блэкмана-Харриса-	Окно, которое имеет полную сходимость (затухание боковых лепестков) в 3-м или 4-м порядке. Позволяет очень быстро рассчитывать спектральные оценки сигналов, что особенно важно при проведении испытаний конструкций мехатронной машины на вибростенде.

Экспоненциальное 1, 2, 3, 4 -	Обеспечивает различную степень "демпфирования" сигнала-отклика при испытаниях с помощью импульсного (ударного) воздействия. При правильной настройке позволяет без искажений отцифровать затухающий сигнал в пределах окна.
-------------------------------	---

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ АНАЛИЗЕ, РАСЧЕТЕ И ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ МАШИН [13]

#### А

**Автоколебаниями** называются самоустанавливающиеся незатухающие колебания, которые существуют в системе при отсутствии переменного внешнего воздействия, причем амплитуда и частота колебаний определяются свойствами самой системы.

**Аддитивность** - свойство величин, состоящее в том, что значение величины, соответствующее целому объекту, равно сумме значений величин, соответствующих его частям при любом разбиении объекта на части. Например, аддитивность объема означает, что объем целого тела равен сумме объемов составляющих его частей.

**Адмитанс** – это отношение скорости колеблющегося тела к соответствующей внешней гармонической силе и соответственно импеданс – обратная адмитансу величина.

**Аксонометрия** - параллельная проекция фигуры, когда на плоскости чертежа изображается фигура вместе с пространственной прямоугольной декартовой системой координат, к которой отнесена эта фигура, и вместе с проекцией (вторичной) фигуры на одну из координатных плоскостей. Аксонометрия позволяет восстановить форму и расположение фигуры относительно системы координат.

Если в ортогональных проекциях изображение пространственной фигуры расчленяется на отдельные, разрозненные проекции (на две или три перпендикулярные плоскости), то в аксонометрии изображение фигуры воспринимается как целостное и наглядное

А. иначе называется аксонметрической проекцией.

**Алгоритм** - точное предписание о выполнении в определенном порядке некоторой системы операций, позволяющее решать совокупность задач определенного класса.

А. приводит от исходных данных к искомому результату через конечное число шагов (действий); при этом данные варьируются в известных границах

**Анализ** - метод (способ) рассуждения или доказательства, при котором мы отправляемся от неизвестного к известному, от искомого к данному.

При решении задач часто пользуются как А., так и синтезом одновременно

**Аппликата** - Одна из декартовых координат точки в пространстве, третья по счету после абсциссы и ординаты и обозначаемая обычно буквой z.

**Аттрактор** (от англ. **attract- притягивать**) - это устойчивое инвариантное предельное притягивающее множество в фазовом пространстве; множество точек, которому стремятся решения дифференциального уравнения при  $t \rightarrow +\infty$ . Название аттракторов получили установившиеся режимы движения, так как они «притягивают» соседние режимы (переходные процессы). Множество точек или подпространство в фазовом пространстве, к которому приближается траектория после затухания переходных процессов. Классическими примерами аттракторов в динамике могут служить точки равновесия или неподвижные точки отображений, предельные циклы или поверхности торов для квазипериодических движений.

Аттракторы, отличные от состояния равновесий и строго периодических колебаний, получили название странных аттракторов и связываются с проблемой турбулентности.

## Б

**Бернулли закон** – Частный случай важнейшего предположения теории вероятностей – закона больших чисел, открытый Я. Бернулли. Согласно Б.з. можно с вероятностью близкой к достоверности, утверждать, что при большом количестве испытаний относительная частота появления события весьма близка к вероятности его появления в отдельном испытании.

Пример. При увеличении числа бросаний монеты вероятность того, что отношение числа появлений решетки к общему числу бросаний близко к половине, стремится к единице.

**Бесселя уравнение** - линейное обыкновенное дифференциальное уравнение 2-го порядка:  $x^2 y'' + x y' + (x^2 - v^2) y = 0$ ,  $v = \text{const}$ , (1) или в самосопряженной форме  $(x y')' + \left(x - \frac{v^2}{x}\right) y = 0$ .

Число  $v$  называется индексом Бесселя уравнения; величины  $x, y, v$  в общем случае могут принимать комплексные значения. После подстановки  $y = u x^{-1/2}$  получается приведенная форма уравнения (1):  $u'' + \left[1 + \frac{1 - 4v^2}{4x^2}\right] u = 0$ .

Б.у. представляет собой частный случай вырожденного гипергеометрического уравнения. Решения уравнений Бесселя называют цилиндрическими функциями (или бесселевыми функциями).

Общее уравнение типа Бесселя  $n$ -го порядка имеет вид  $\prod_{i=1}^n \left(x \frac{d}{dx} + c_i\right) y + x^n y = 0$ ,  $c_i = \text{const}$ ,  $\sum_{i=1}^n c_i = 0$ , а его решение зависит от  $n-1$  индексов. В частности уравнение можно представить в форме:  $x^3 y''' + 3x^2 y'' + [1 + 9\alpha\beta - 3(\alpha + \beta)^2] x y' + [x^3 - 9\alpha\beta(\alpha + \beta) + 2(\alpha + \beta)^3] y = 0$ ,  $\alpha, \beta = \text{const}$ .

**Бесселя функции** - цилиндрические функции 1-го рода. Бесселя функция действительна, график её имеет вид затухающего колебания; при четном индексе Б.ф. четна, при нечетном – нечетна.

Важную роль в теории Б.ф. и их применений играют:

1) интегральное представление

$$J_n(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(z \cdot \sin \varphi - n\varphi) d\varphi ,$$

2) производящая функция

$$e^{z/2} \left( \xi - \frac{1}{\xi} \right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) \xi^n ,$$

3) теорема сложения для Б.ф. нулевого индекса

$$J_0\left(\sqrt{a^2 - b^2 - 2ab \cos \varphi}\right) = J_0(a) J_0(b) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_k(a) J_k(b) \cos k\varphi ,$$

4) рекуррентные формулы

$$J_{p-1}(z) + J_{p+1}(z) = \frac{2p}{z} J_p(z) ,$$

$$[J_p(z)]' = \frac{1}{2} [J_{p-1}(z) - J_{p+1}(z)] .$$

**Бифуркация** означает раздвоение и употребляется в широком смысле для обозначения всевозможных качественных перестроек или метаморфоз различных объектов при изменении параметров, от которых они зависят. Математически бифуркация есть смена топологической структуры разбиения фазового пространства динамической системы на траектории при малом изменении её параметров.

**Бифуркация “Хопфа”** - Рождение предельного цикла из состояния равновесия при изменении некоторого названия. Свое название эта бифуркация получила в честь математика, сформулировавшего точные условия ее существования у динамической системы.

## В

**Ван-дер-Поля уравнение** – это уравнение, описывающее колебательную систему с переменным коэффициентом демпфирования

$$\frac{d^2 x}{dt^2} - \varepsilon(1 - x^2) \frac{dx}{dt} + x = 0$$

**Вынужденные колебания** – это колебания, происходящие под действием внешних, преимущественно периодических сил.

## Г

**Гамильтонова механика** - Формально метод, позволяющий записывать уравнения движения динамической системы с  $N$  степенями свободы в виде  $2N$  дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка [Гамильтон (1805—1865)]. На практике под гамильтоновой механикой часто понимают теорию недиссипативных систем с потенциальными силами.

**Гамильтона функция** – полная механическая энергия системы, выраженная через канонические переменные. Действие по Гамильтону – величина, равная интегралу по времени от функции Лагранжа для механической системы.

**Гибридные технологии** – это технологии, основанные на использовании общих материалов (полупроводников) и общих технологических процессов при производстве как исполнительных, так и интеллектуальных элементов.

**Глобальные/локальные движения** - Под локальными движениями принято понимать траектории динамических систем, не уходящие далеко от точек равновесия. Под глобальными движениями обычно понимают движения в промежутках между точками равновесия или от одной точки равновесия до другой, а также траектории, не остающиеся в какой-нибудь малой области фазового пространства

**Голономные связи** - геометрические связи и дифференциальные связи, уравнения которых могут быть проинтегрированы.

**Градиент** - одно из основных понятий векторного анализа и теории не-линейных отображений.

Градиентом скалярной функции  $f(t)$  векторного аргумента

$t = (t^1 \dots t^n)$  из евклидова пространства  $E^n$  называется производная функция  $f(t)$  по векторному аргументу  $t$ , то есть  $n$  – мерный вектор с компонентами  $\frac{\partial f}{\partial t^i}$ ,  $1 \leq i \leq n$ .

Существуют следующие обозначения Г.функции  $f(t)$  в точке  $t_0$ :

$\text{grad } f(t_0)$ ,  $\nabla f(t_0)$ ,  $\frac{\partial f(t_0)}{\partial t}$ ,  $f'(t_0)$ . Г. представляет собой ковариантный вектор.

**Градиентная динамическая система** - поток, задаваемый градиентом гладкой функции  $f$  на гладком многообразии.

При дифференцировании  $f$  непосредственно получается ковариантный вектор

**Градиентный метод** - метод минимизации функций многих переменных.

Г.м. состоит в том, что последующее приближение функции  $F(x)$  получается из предыдущего смещением в направлении градиента функции:

$$x^{n+1} = x^n - \delta_n \text{grad } F(x^n).$$

Параметр  $\delta_n$  может быть определен, например, из условия минимума величины  $F(x^n - \delta_n \text{grad } F(x^n))$ .

**Графов теория** – область дискретной математики, особенность которой является геометрический подход к изучению объектов.

Грубая система (по Андронову А.А.) - система называется грубой, если при малом изменении параметров системы

$$\frac{dx}{dt} = F_1(x, y, \lambda), \quad \frac{dx}{dt} = F_2(x, y, \lambda) \text{ или целиком правой части (функций } F_1, F_2 \text{ и их}$$

производных) вид фазового портрета топологически остается тем же самым.

Качественные изменения фазовых портретов происходят при бифуркациях состояний равновесия, предельных циклов и гомоклинических траекторий

**Грина формулы** - формулы интегрального исчисления, дающее возможность сводить объемный интеграл к поверхностному. Простейшей из них является важная

$$\text{формула: } \iint_D \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy = \int_{\Gamma} u dx + v dy, \text{ где } \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} \text{ непрерывны в } D, \text{ а } \Gamma - \text{ контур,}$$

ограничивающий область  $D$ .

**Гурвица критерий** - условие, необходимое и достаточное для того, чтобы все корни многочлена  $P(x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n$  имели отрицательные действительные части. В частности, если  $a_0 > 0$  и все коэффициенты многочлена вещественны, то все корни многочлена  $P(x)$  имеют отрицательные действительные части тогда и только тогда, когда

$$\text{выполняются неравенства: } \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & a_{2k-1} \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & a_{2k-2} \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & a_{2k-3} \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & a_{2k-4} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{2k} \end{vmatrix} > 0$$

при  $k=1, 2, \dots, n$ . Г.к. имеет важное значение в теории дифференциальных уравнений. При помощи Г.к. определяется устойчивость решений системы дифференциальных уравнений.

Объектом применения Г.к. в этом случае является характеристический многочлен матрицы линеаризованной системы

## Д

**Дарси-Вейсбаха формула** для определения потерь на трение в трубопроводе

$$\text{гидросистемы } h_{mp} = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

где  $d$  - диаметр трубопровода;  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения (по формуле Блаузиуса  $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ ).

**Детерминированная система** - Динамическая система, уравнения движения, параметры и начальные условия которой известны и не являются стохастическими или случайными. Некоторые движения детерминированных систем могут казаться случайными.

**Дивергенцией или расхождением вектора** в векторном анализе называется сумма частных производных от проекций вектора по одноименным координатам

$$\operatorname{div} \vec{r} = \frac{\partial r_x}{\partial x} + \frac{\partial r_y}{\partial y} + \frac{\partial r_z}{\partial z}$$

**Динамическая жесткость** – отношение внешней гармонической силы к перемещению колеблющегося тела.

**Динамическая податливость** – отношение перемещения колеблющегося тела к внешней гармонической силе. Это величина является обратной величиной динамической жесткости.

**Динамическая система** – любая система, которая может принимать различные математические формы: обыкновенных дифференциальных уравнений (автономных и неавтономных), дифференциальных уравнений в частных производных, отображений (обратимых и необратимых) прямой или плоскости.

**Дискретность** - прерывность. Множество точек обладает свойством  $D$ ., если оно не имеет предельных точек.

**Дискретными случайными величинами** называются такие, которые в результате испытаний могут принимать лишь отдельные изолированные, большей частью целочисленные значения и не могут принимать значения промежуточные между ними.

**Диссипация** – это рассеивание, процесс, связанный с потерей энергии.

**Дифференцирующее звено** – выходной сигнал звена пропорционален скорости изменения входного, т.е.

$$x_{\text{вых}} = k_{\text{диф}} \frac{dx_{\text{вх}}}{dt}$$

**Долговечность** – свойство изделий сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов.

**Достоверность** – априорное убеждение в осуществимости некоторого явления, исключающего всякое сомнение. Достоверность характеризует реализуемость некоторого события, отмечая его наивысшим значением вероятности.

**Драйвер** – представляет собой программу, управляющую операциями мехатронного устройства на физическом уровне, и является интерфейсом между мехатронным устройством и общим программным обеспечением операционной системы, не зависящим от типа устройства. Драйвер терминала поддерживает работу конкретных типов терминалов, поэтому является достаточно простым.

## Е

**Емкость** - Одна из многих фрактальных размерностей множества точек. Основная идея емкостной размерности состоит в подсчете минимального числа кубов с ребром  $\varepsilon$ , необходимых для покрытия данного множества точек. Если это число при  $\varepsilon \rightarrow 0$  ведет себя как  $\varepsilon^{-d}$ , то показатель  $d$  называется емкостной фрактальной размерностью.

## З

**Звеном**, а точнее **элементарным динамическим звеном** называется искусственно выделяемый элемент (часть) автоматической системы, динамические свойства которого описываются дифференциальным уравнением не выше второго порядка.

## И

**Интегрирующее звено** – характеризуется тем, что выходная величина определяется интегралом по времени от входной величины  $T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} = x_{\text{вх}}$   $W(s) = 1/Ts$

**Интеллектуальный робот** – это мехатронная машина, выполняющая комплексные задачи в изменяющихся и неопределенных средах при минимально возможном взаимодействии с человеком – оператором.

**Интеллектуальный терминал** – терминал, имеющий собственный процессор, оперативную и постоянную память, работающий в значительной степени автономно и допускающий программирование или перепрограммирование функций диалога и управления мехатронным устройством на конкретное применение.

**Информация** – в узком смысле это приращение знаний. В более широком смысле информация отождествляется с получением некоторых сведений.

**Искусственный интеллект** – направление, в рамках которого решаются научные и практические задачи организации баз знаний.

## К

**Квазилинейная система** – это система, в которой нелинейности столь незначительны, что она может рассматриваться при определенных условиях как линейная.

**Квазипериодические колебания** - Колебания с двумя или более несоизмеримыми частотами

**Квазипериодическое решение** - При больших отличиях вынуждающей и собственной частот в системе Ван дер Поля появляется новое явление – комбинационные колебания, иногда называемые почти периодическими или квазипериодическими решениями. Комбинационные колебания имеют вид  $x = b_1 \cos \omega_1 t + b_2 \cos \omega_2 t$ .

Когда частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  несоизмеримы, т.е.  $\omega_1/\omega_2$  - иррациональное число, решение называется квазипериодическим. Для уравнения Ван дер Поля  $\omega_2 = \omega_0$ , где  $\omega_0$  – частота предельного цикла свободных колебаний.

**Кибернетика** рассматривает общие законы и модели информационного взаимодействия и влияния в процессах и явлениях живой, неживой и искусственной Природы, Вселенной и общества.

Основу кибернетики составляют:

- постулат об информационном взаимодействии;
- общие законы развития процессов и явлений;
- общая теория систем;
- иерархический динамический баланс (гармония) информационных и других ресурсов, а также обеспечение эффективности управления процессами;
- механизмы и законы развития эволюционных процессов;
- широкий спектр знаковых систем в рамках науки семиотики;
- модели информационных и других процессов, явлений и т.д.

**Колебательное звено**, – в котором при единичном входном воздействии величина выходного сигнала стремится к новому установившемуся значению, совершая относительно него затухающие колебания.

**Конвекция Рэлея** — Бенара Циркуляционное движение жидкости, возникающее под действием градиента температур и гравитационных сил. Модель хаотического движения Лоренца была предложена для моделирования некоторых особенностей динамики тепловой конвекции.

**Координатные линии** - Концентрической окружности( $\rho = \text{const}$ ) или лучи ( $\varphi = \text{const}$ ) Система П.к. – ортогональная система. Расстояние  $\rho$  точки  $p$  от точки  $(0, 0)$  (полюса) называется полярным радиусом, а угол  $\varphi$  – полярным углом.

Коэффициент Ламе:  $L_\rho = 1, L_\varphi = \rho$ .

Элемент площади:  $d\sigma = \rho d\rho d\varphi$

**Корреляция** – соотношение, связь между явлениями, взаимное отношение предметов или понятий.

## Л

**Лапласа оператор** – Линейный дифференциальный оператор 2-го порядка. Определен на пространстве дважды дифференцируемых функций. Обозначается символом  $\Delta$ . Л.о. переводит данную функцию  $\varphi$  в функцию:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_n^2}$$

**Лапласа преобразование** – в системе приводов машин выходной и входной элементы связаны относительно слабо и на соотношение между выходной и входной величинами влияют переменные, которые могут быть производными по времени первого или более высокого порядка, что потребует составления дифференциального уравнения первого и более высокого порядка.

Для решения линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами используют преобразование Лапласа, основанное на подстановке комплексной переменной вместо величины, относительно которой выражается дифференциальное уравнение (например, время)

Идея преобразования Лапласа основывается на том, что дифференцирование и интегрирование экспоненциальной функции  $e^{pt}$  обычно сводится к умножению и делению на  $p$  без изменения вида этой функции.

Прямое преобразование Лапласа какой-либо функции времени  $f(t)$  в функцию  $F(s)$  комплексного переменного определяется при помощи интеграла

$$\int_{t=0^+}^{t=\infty} f(t)e^{-st} dt = L[f(t)] = F(s)$$

Функция времени  $f(t)$  называется оригиналом,

а функция  $F(s)=L[f(t)]$  - изображением

где  $L$ - символ прямого преобразования.

Отыскание оригинала по изображению называется обратным преобразованием Лапласа:

$$f(t) = L^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-iv}^{c+iv} F(s)e^{st} ds$$

**Линейные колебания** – колебания малой амплитуды, для которых характерен аддитивный отклик на аддитивные воздействия (выполняется принцип суперпозиции), по существу, это есть результат приближенности описания. Уравнения линейных колебаний

получаются в результате линеаризации исходной модели какого-либо выделенного состояния или движения исследуемой системы или среды.

**Линейный оператор** - Любая математическая операция (например, дифференцирование, умножение на константу), действие которой на сумму двух функций совпадает с суммой ее действий на каждую из функций слагаемых. Линейный оператор тесно связан принципом суперпозиции.

**Лоренца уравнения** - в математической модели конвекции, которую предложил Лоренц, используются три переменные ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), описывающие состояние системы. Переменная  $x$  пропорциональна амплитуде скорости, с которой жидкость циркулирует в жидком кольце, а переменные  $y$  и  $z$  отражают распределение температуры по кольцу. Так называемые уравнения Лоренца можно формально получить из уравнения Навье-Стокса, уравнения в частных производных механики жидкости. В безразмерном виде уравнения Лоренца записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma(y - x), \\ \dot{y} &= \rho x - y - xz, \\ \dot{z} &= xy - \beta z\end{aligned}$$

где  $\sigma$  - безразмерное отношение коэффициентов вязкости и теплопроводности (число Прандтля);

$\rho$  - безразмерный градиент температуры;

$\beta = 4(1+a^2)^{-1}$  – геометрический множитель, причем  $a^2=1/2$ .

Параметры  $\sigma$  и  $\rho$  связаны соответственно с числами Прандтля и Рэлея, а третий параметр  $\beta$  описывает геометрию системы.

При  $\sigma=10$  и  $\beta=8/3$  и при  $\rho>1$  имеется три положения равновесия, из которых то, которое расположено в начале координат, является неустойчивой седловой точкой.

**Ляпунова показатель** – служит для проверки чувствительности мехатронной системы к вариациям начальных условий. При этом положительный показатель Ляпунова указывает на хаотическую динамику, а фрактальная структура орбиты в фазовом пространстве указывает на присутствие странного аттрактора. Проверка с применением показателя Ляпунова может использоваться как в диссипативных, так и в без диссипативных (консервативных) системах.

**Ляпуновская размерность (ЛР)**, являлась верхней оценкой хаусдорфовой размерности. Она оказывается часто близка к хаусдорфовой при численном анализе многих конкретных динамических систем с хаотическим поведением. Фрактальная размерность также оценивается сверху ЛР.

Понятие ЛР, определялось через ляпуновские экспоненты, является связующим звеном между классической теорией устойчивости движения и современной теорией размерности аттракторов динамических систем.

## М

**Маклорена ряд** - функции  $f(x)$  – частный случай ряда Тейлора при  $x=0$ . М.р. функции  $f(x)$  записывается так:

$$f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!}x^n + \dots$$

Например, м.р. функции  $e^x$  таков:

$$1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots$$

Если М.р. функции  $f(x)$  сходится к самой  $f(x)$ , то говорят о разложении  $f(x)$  в М.р. Впервые М.р. дан Тейлором в 1715 г.

**Марковский случайный процесс** – это процесс, у которого текущее значение не зависит от протекания процесса в предшествующие моменты времени, а определяется только значением процесса в настоящий момент.

**Математическая модель** представляет собой приближенное описание изучаемых классов, процессов и явлений, выраженное математическими символами. Анализ модели позволяет проникать в сущность изучения процессов и явлений. При этом построение модели тесно связано с формированием закона, связывающего основные объекты модели знанием фактов, которые относятся к изучаемым процессам и явлениям, а также с глубоким проникновением в их взаимосвязи.

**Математическое ожидание:**

**непрерывной случайной величины** – это определенный интеграл от произведения плотности вероятности  $\varphi(x)$  на действительное переменное  $x$ , взятый в пределах от  $-\infty$  до

$$+\infty \quad (Mx = \int_{-\infty}^{\infty} x\varphi(x)dx);$$

**дискретной случайной величины (x)** – это сумма произведений возможных значений её на соответствующие вероятности  $(Mx = \sum_{i=1}^n x_i P(x_i))$ , где  $n$  – число возможных значений случайной величины  $x$ ).

**Мехатроника** – это наука, изучающая синергетическое объединение узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых модулей, машин, систем и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

**Мехатронные модули** – это базовые функциональные компоненты мехатронных систем и машин с компьютерным управлением, предназначенные для выполнения движения, как правило, по одной управляемой координате.

**Мехатронные системы автомобилей** – включают: блок БСКД – бортовую систему контроля и диагностирования; блок СУЭД – систему электронного управления двигателем; блок ABS / ПБС – противоблокировочную, противобуксовочную системы; блок СЭУП – систему электронного управления подвеской автомобиля; систему КК – круиз- контроля; блок SBПC – систему безопасности водителя против засыпания и др. с помощью таких систем осуществляется как управление работой соответствующих агрегатов автомобилей, так и производится самоконтроль.

**Многообразие** - Подпространство фазового пространства, в котором остаются под действием дифференциальных или разностных уравнений их решения, если начальные условия были выбраны в данном подпространстве.

**Многосвязность мехатронной системы** – означает, что движение каждого звена кинематически и динамически влияет на движение остальных звеньев. Данное взаимовлияние происходит через механическое устройство, объект работ и источник энергии.

**Монте-Карло метод** - Метод, широко применяемый для приближенного решения различных задач вычислительной математики: вычисление кратных интегралов, решение дифференциальных уравнений и т.п.

Сущность м.-к.м. заключается в следующем: величине  $x$ , которую нужно приближенно вычислить, ставится в соответствие некоторая случайная величина  $\xi$ , математическое ожидание которой  $M\xi$  равняется  $x$ .

Затем каким-нибудь способом эта случайная величина многократно реализуется, из получаемых значений образуется некоторое среднее, которое принимается за приближенное значение величины  $x$ . случайные числа берутся либо из таблицы случайных чисел, либо вычисляются методами теории чисел (так называемые псевдослучайные числа).

**Мотор-редуктор** – это мехатронный конструктивный модуль, объединяющий электродвигатель и редуктор.

## Н

**Нелинейность** - Свойство системы с входом и выходом или математической операции, у которых сигнал на выходе (результат операции) не пропорционален сигналу на входе. Например, операции  $y = cx^n (n \neq 1)$  или  $y = xdx/dt$ , или  $y = c (dx/dt)^2$  нелинейны.

Формальная математическая характеристика процессов, ведущих к образованию структур; физические системы при больших отклонениях от равновесного состояния ведут себя нелинейно. Неустойчивость состояния нелинейной системы характеризуется критическим отклонением нелинейной системы от равновесия с переходом в новый режим.

## О

**Область притяжения** - Множество начальных условий в фазовом пространстве, из которых траектории выходят на какое-нибудь конкретное движение или аттрактор. Обычно это множество точек связано и образует непрерывное подпространство в фазовом пространстве. Но граница между различными областями притяжения может быть, а может и не быть гладкой.

**Ортогональные функции** – пусть в некотором линейном пространстве функций определено скалярное произведение. Две функции этого пространства  $f$  и  $g$  ортогональные, если их скалярное произведение равно нулю. например, четная функция  $f$  и нечетная  $g$  ортогональны относительно скалярного произведения.

$$(f, g) = \int_{-1}^{+1} f(x)g(x)dx.$$

**Отказ** – событие, при котором происходит полная или частичная утрата работоспособности изделия.

**Отображение** - Математическое правило, ставящее в соответствие одному множеству точек в некотором  $n$ -мерном пространстве другое множество точек. При итерации такого правила отображение аналогично системе разностных уравнений.

**Отображение поверхности на плоскость** - это сопоставление каждой точке поверхности точки плоскости.

Если точка поверхности задана координатами  $(x_1, x_2)$  на поверхности, а точки плоскости координатами  $(y_1, y_2)$  на плоскости, то отображение задается парой функций  $y_1 = f_1(x_1, x_2)$ ,  $y_2 = f_2(x_1, x_2)$ . Отображение называется гладким, если эти функции гладкие (т.е. дифференцируемые достаточное число раз, например, многочлены).

Уитни доказал, что всякая особенность гладкого отображения поверхности на плоскость после подходящего малого шевеления рассыпается на складки и сборки.

**Особенности, бифуркации и катастрофы** – термины, описывающие возникновение дискретных структур из гладких непрерывных.

## П

**Параметрически возбуждаемые колебания** – возникают вследствие периодического изменения параметров системы (массы, коэффициента жесткости и др.). Они могут одновременно возбуждаться внешней периодической нагрузкой.

**Передаточной функцией системы привода машины** называется отношение изображения выходного сигнала к изображению входного сигнала. Уравнение представляет собой простое алгебраическое отношение, устанавливающее связь между выходной и входной величинами

$$\frac{Q_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{w_n k_c}{S + w_n k_c}$$

**Переमेжаемость** - Тип хаотического движения, при котором длительные временные интервалы регулярного, периодического или стационарного движения сменяются короткими всплесками движения, напоминающими по своим свойствам случайное движение. Временные интервалы между хаотическими всплесками не фиксированы и непредсказуемы. Один из типичных маршрутов перехода - от периодического состояния к хаосу. Сигнал является перемежающимся, если он подвержен резким вариациям большой амплитуды. В динамических системах с небольшим числом степеней свободы при переходе от периодического режима к хаотическому (или квазипериодическому) режиму может существовать временная перемежаемость. Перемежаемость возникает, когда нелинейные эффекты имеют тенденцию к усилению неустойчивости.

**Перенормировка** (метод ренормгруппы) - Математическая теория из области функционального анализа, в которой свойства некоторой системы уравнений в одном масштабе могут быть с помощью подходящей замены переменных связаны со свойствами этой системы уравнений в другом масштабе. Разработана лауреатом Нобелевской премии физиком К. Вильсоном (Корнеллский университет). Используется в теории квадратичных отображений при выводе чисел Фейгенбаума.

**Перестройка** (смена устойчивости, выход мехатронной системы на новый устойчивый режим) - термин теории устойчивости, описывающий серию задач, близких к одной идеализированной задаче, возникающий при введении малой асимметрии в задачу с симметрией или слабого затухания в недиссипативную динамическую систему. Изменение устойчивости или динамических свойств идеализированной задачи при введении в нее некоторых неидеализированных членов и называется перестройкой.

**Переходной функцией** называется зависимость, определяющая изменение управляемой величины во времени, когда начальные условия нулевые, а воздействие скачкообразное и единичное.

Аналитически переходная функция выражается уравнением, описывающим переходный процесс при единичном входном воздействии. Например, для системы мехатронного привода первого порядка  $y = k \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$ .

**Положение равновесия** - В непрерывной динамической системе точка в фазовом пространстве, к которой приближается траектория после затухания переходных режимов (при  $t \rightarrow \infty$ ). в механических системах под положением равновесия обычно имеют в виду состояние с нулевым ускорением и нулевой скоростью. В отображениях положениями равновесия могут быть конечные множества: при итерациях отображения или разностного уравнения система последовательно переходит от одной точки такого множества к другой. (Положение равновесия называется также неподвижной точкой.)

**Полярные координаты** - Числа  $\rho$  и  $\varphi$ , связанные с декартовыми прямоугольными координатами  $x$  и  $y$  формулами

$$x = \rho \cos \varphi, \quad y = \rho \sin \varphi, \quad \text{где } 0 \leq \rho \leq \infty, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

**Понтрягина принцип максимума** – это соотношения, выражающие необходимые условия сильного экстремума для неклассической вариационной задачи в теории оптимального управления. Этот принцип требует минимума априорной информации об оптимизируемом мехатронном объекте.

**Потеря устойчивости** - выход из состояния равновесия при изменении какого-либо параметра, не обязательно связанный с бифуркацией самого состояния равновесия: оно может терять устойчивость, не только сталкиваясь с другим, но и самостоятельно.

С катастрофой трудно бороться, когда её признаки сделались уже заметными: скорость её приближения неограниченно возрастает по мере приближения к катастрофе.

К катастрофической потере устойчивости может приводить оптимизация и интенсификация.

**Поток энтропии** – приращение энтропии системы за единицу времени в результате подвода (отвода) энтропии извне.

$$\text{Поток энтропии равен } \int J_s n dF,$$

где  $F$  – поверхность, ограничивающая рассматриваемую систему;

$J_s$  - вектор плотности потока энтропии;

$n$  - вектор внешней нормали к поверхности.

**Предельный цикл** - В технической литературе периодическое движение, возникающее в самовозбуждающейся или автономной системе (например» аэроупругий

флаттер или электрические автоколебания). В литературе по мехатронным системам предельный цикл относится и к вынужденным периодическим движениям.

**Привод** – система, состоящая из двигателя и связанных с ним устройств, для приведения в движение одного или нескольких твердых тел, входящих в состав машины.

**Производство энтропии** – приращение энтропии системы в единицу времени вследствие необратимых процессов, происходящих в самой системе

$$\frac{\partial S^i}{\partial \tau} = \sum_j X_j I_j$$

где  $I_j$  – обобщенный поток;  $X_j$  – соответствующая обобщенная сила.

**Пропорциональное звено** – это такое звено, которое передает сигналы от входа к выходу без сдвига по фазе, причем отношение амплитуд выходной и входной величин сохраняется постоянным при всех частотах ( $x_{\text{вых}} = k \cdot x_{\text{вх}}$ ).

#### **Пуанкаре отображений классификация:**

- конечный набор точек: периодическое или субгармоническое колебание;
  - замкнутая кривая: квазипериодическое движение в присутствии несоизмеримых частот;
  - незамкнутая кривая: имеет смысл попытаться моделировать одномерным отображением  $[x(t) \text{ как функция } x(t+T)]$ ;
  - фрактальный набор точек: странный аттрактор в трехмерном фазовом пространстве;
- бесформенный набор точек:
- 1) мехатронная система со слишком сильным случайным сигналом или шумом на входе;
  - 2) странный аттрактор, но диссипация в системе очень слабая;
  - 3) странный аттрактор в фазовом пространстве с более чем тремя измерениями;
  - 4) квазипериодическое движение с тремя или большим числом доминирующих несоизмеримых частот.

## **Р**

**Рабочий орган мехатронной машины** – это составная часть механического устройства для непосредственного выполнения технологических операций и (или) вспомогательных переходов.

**Рандомизация** – статистическая процедура, в которой решение принимается случайным образом.

**Регрессия** – зависимость среднего значения какой-либо случайной величины от некоторой другой величины или от нескольких величин.

## **С**

**Сечение (отображение) Пуанкаре** - Последовательность точек в фазовом пространстве, порождаемая пересечением непрерывной траекторией с поверхностью общего вида или плоскостью в пространстве. Для нелинейного осциллятора с периодической вынуждающей силой, задаваемого обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка, отображение Пуанкаре может быть получено стробоскопированием положения и скорости в определенной фазе вынуждающей силы [А. Пуанкаре (1854—1912)].

**Синергия** (греч.) – это совместное действие, направленное на достижение общей цели. Пограничная область знания, занимающаяся выявлением общих закономерностей в процессе образования, устойчивости и распада, упорядоченных временных и пространственных структур в сложных неравновесных системах разнообразной природы.

В основе мехатронных моделей синергетики лежат нелинейные дифференциальные уравнения, описывающие поведение неравновесных систем на различных уровнях материальной организации.

**Синергетическая интеграция** – это построение единого приводного мехатронного модуля через конструктивное объединение и даже взаимопроникновение элементов, которые имеют различную физическую природу.

**Сборкой Уитни** - названо проектирование на плоскость поверхности заданной формулой  $y_1 = x_1^3 + x_1x_2$  в пространстве с координатами  $(x_1, x_2, y_1)$  и проектируется на горизонтальную плоскость  $(x_2, y_1)$ .

**Свободные колебания** – это колебания, вызванные начальным отклонением системы и протекающие без дальнейшего активного внешнего воздействия.

**Связанные колебания** – это свободные или вынужденные колебания, возникающие в сложных системах и характеризующие взаимодействие их отдельных частей.

**Сигнатура:**

**алгебраической системы** - совокупность отношений и операций, действующих на основном множестве данной алгебраической системы, вместе с указанием их арностей;

**квадратичной или симметрической билинейной формы над упорядоченным полем** - пара целых неотрицательных чисел  $(p, q)$ , где  $p$  - положительный, а  $q$  - отрицательный индекс инерции данной формы;

**многообразия**  $M^n$  - сигнатура квадратичной формы  $Q_m(x) = (x \cup x, 0)$ , где  $\cup$  - внутреннее когомологическое умножение,  $0 \in H_n(M; Z)$  - фундаментальный класс.

Многообразия предполагается компактным и ориентируемым. Сигнатура обозначается  $\sigma(M)$ .

Сигнатура обладает свойствами:

- 1)  $\sigma(M+M') = \sigma(M) + \sigma(M')$ ;
- 2)  $\sigma(M \times M') = \sigma(M) \cdot \sigma(M')$ ;
- 3)  $\sigma(\partial N) = 0$

**Сигнум** - функция действительного переменного  $x$ , равная 1, если  $x$  положительно, равная 0, если  $x$  равно нулю и равная  $-1$ , если  $x$  отрицательно.

Обозначения:  $\text{sgn } x$  или  $\text{sign } x$ .

$$\text{Таким образом, } \text{sgn } x = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0 \\ 0, & \text{если } x = 0 \\ -1, & \text{если } x < 0 \end{cases}$$

**Символическая динамика** - под символической динамикой понимают обычно специальной раздел мехатронных динамических систем, в котором изучаются каскады и потоки, порожденные гомеоморфизмом сдвига  $\sigma$  в различных пространствах  $\Sigma$  последовательностей

$$\omega = \{\omega_n\}_{-\infty}^{+\infty}$$

$$\sigma\{\omega_n\} = \{\omega_{n+1}\},$$

где  $\omega_n$ - буквы некоторого алфавита  $\mathcal{L}$ ;

Методы символической динамики подразумевают изучение произвольных динамических систем при помощи символических моделей в которых последовательности соответствуют траекториям изучаемой системы, а отображение  $\sigma$  - некоторому сдвигу вдоль этих траекторий. В частности, методы символической динамики оказываются применимыми в качественной теории дифференциальных уравнений, где рассматриваются гладкие системы на гладких многообразиях, хотя сама по себе символическая динамика большей частью имеет дело с вполне несвязными нульмерными пространствами, гомеоморфными канторову множеству. Наиболее эффективными методы символической динамики оказываются в тех ситуациях, где изучаемые мехатронные системы обнаруживают аналогию со случайными процессами.

Два сохраняющих меру преобразования, статистически одинаковы, или изоморфны, если можно найти такое взаимно однозначное соответствие между всеми (за исключением множеств меры 0) точками двух пространств с мерой (или фазовых пространств), при которой соответствующие друг другу множества имеют одинаковую меру (или вероятность), а соответствующие друг другу точки преобразуются одинаково.

Мехатронной моделью стационарного случайного процесса служит сохраняющее меру преобразование пространства с мерой вместе с разбиением этого пространства на конечное число множеств.

**Скаляр** – это величина, каждое значение которой может быть выражено одним (действительным) числом.

**Случайной величиной** называется величина, которая в результате испытаний может принять то или иное значение в границах определенного интервала.

**Собственная функция** - собственный вектор оператора, действующего в функциональном пространстве

**Солитон** - решение нелинейного эволюционного уравнения, которое в каждый момент времени локализовано в некоторой области пространства, причем размеры области можно интерпретировать как движение частицы

**Стационарные связи** – это связи в уравнения, которых время явно не входит.

**Стационарный случайный процесс** – это случайный процесс, вероятностные характеристики которого не меняются с течением времени.

**Стохастический процесс** - тип хаотического движения, встречающийся в консервативных, или недиссипативных, динамических мехатронных системах.

**Стохастические процессы**- то же, что и вероятностные и случайные процессы.

**Странный аттрактор** – это аттрактор, траектория которого непериодическая (она не замыкается) и режим функционирования неустойчив (малые отклонения от режима нарастают). Основным критерием странного аттрактора является неустойчивость траектории. Притягивающее множество в фазовом пространстве, по которому движутся хаотические траектории. Любой аттрактор, который не является положением равновесия, предельным циклом или квазипериодическим аттрактором. Аттрактор в фазовом пространстве с фрактальной размерностью.

## Т

**Теорема** - математическое утверждение, истинность которого установлена путем доказательства.

**Теория катастроф** - изучает локальное поведение непрерывной функции вблизи ее критических, или особых, точек и на основании этого изучения формирует условия на параметры, входящие в структуру функции, при выполнении которых функция теряет или приобретает свои ключевые, характерные для данной задачи свойства. Именно потеря того или иного полезного свойства функции при достижении параметром (или параметрами, которые назовём управляющими) некоторого критического значения и называется катастрофой.

Во многих мехатронных системах положения равновесия находят исходя из потенциала: приравнивая нулю производные потенциала по обобщенным координатам. Теория катастроф занимается изучением зависимости числа положений равновесия от

параметров задачи, например от нагрузок в упругих системах. Теория катастроф предсказывает, что вблизи некоторых критических значений таких параметров число положений равновесия изменяется заранее известным образом и что эти изменения носят универсальный характер для некоторых классов потенциалов. Основателем теории катастроф принято считать французского математика Рене Тома. В мехатронике независимо развивается свой частный вариант теории катастроф, занимающийся изучением чувствительности критических нагрузок с дефектами структуры.

Ядро теории составляют понятия эквивалентности и конечной определенности.

Классическая физика (от Ньютона до общей теории относительности) — это по существу теория плавного поведения. Но изменения совершаются скачками, внезапно, хотя и вызываются они обычно гладкими изменениями ситуации. К тому же природа скачков бывает самой различной. Есть силы, которые постепенно нарастают до тех пор, пока их уже больше не может сдержать трение. Внезапные, резкие изменения называют катастрофами, для того, чтобы выразить ощущение резкой или драматической перемены. Это слово, к сожалению, несёт в своём значении оттенок бедствия, который в большинстве приложений неуместен.

Как в физических, так и математических приложениях важной характеристикой гладкой вещественной функции является наличие у нее «критических точек», в которых производная обращается в нуль.

Наиболее распространённые типы критических точек для гладкой функции - это (локальные) максимумы и минимумы. Но иногда встречаются и более сложные вещи - «точки перегиба», а при более пристальном изучении эти три сорта точек подразделяются на целую серию типов. Для двух и более переменных задача существенно усложняется благодаря широкому диапазону новых геометрических возможностей.

Теория катастроф, как и вообще анализ, даёт числа. Она также даёт ответы на топологические вопросы, а поскольку её изобрели и впервые проповедовали топологи, именно на эти ответы и был сделан акцент.

**Теория особенностей** — крупное обобщение исследования функций на максимум и минимум. В теории Уитни функции заменены отображениями, т.е. наборами нескольких функций нескольких переменных.

Тома утверждение о локальной топологической классификации бифуркаций в градиентных динамических системах, зависящих от четырех параметров (Тома утверждал, что в этом случае их всего семь).

**Течение Тейлора-Куэтта** Течение жидкости между двумя вращающимися концентрическими цилиндрами.

**Топология** - раздел математики, имеющий своим назначением выяснение и исследование, в рамках математики, идеи непрерывности. Индивидуально идея непрерывности выражает коренные свойства пространства и времени и имеет, следовательно, функциональное значение для познания.

Предметом топологии является исследование свойств фигур и их взаимного расположения, сохраняющихся гомеоморфизмами, т.е. взаимно однозначными и непрерывными в обе стороны отображениями.

Под «фигурой» в топологии понимается любое множество точек, в котором задано отношение близости между точками и некоторыми подмножествами, удовлетворяющее определенным аксиомам. Такие фигуры называют топологическими пространствами.

Большое внимание в топологии уделяется свойствам типа расположения одной фигуры в другой, одного топологического пространства в другом, сохраняющимся при гомеоморфизмах объемлющего пространства на себя.

**Топологическая алгебра** - универсальная алгебра, являющаяся топологическим пространством, в котором непрерывны все сигнатурные операции. Раздел алгебры, который занимается изучением топологических алгебраических систем, то есть групп, полугрупп, колец, решеток, векторных пространств, модулей и др., наделенных топологиями, в которых рассматриваемые операции непрерывны

**Топологическая динамика и эргодическая теория.** Из задач механики возникли топологическая динамика и эргодическая теория. Эти две теории существенно помогают при изучении дифференцируемых систем, а также статистических свойств гиббсовских мер. Эти меры на пространстве последовательностей возникают в современной статистической механике; они интересуют нас, поскольку являются решением задачи о восстановлении инвариантной меры, если она в некотором смысле приближенно известна.

Гиббсовские меры удовлетворяют также вариационному принципу, важность которого определяется тем, что он применим в более общих пространствах, чем пространство последовательностей.

Из статистической механики известно, что вероятность  $P_j$ , с которой система пребывает в состоянии  $j$ , задается распределением Гиббса:

$$P_j = \frac{e^{-\beta E_j}}{\sum_{i=1}^n e^{-\beta E_i}}$$

где  $\beta = 1/kT$ , а  $k$  – физическая константа;  $E$  – энергия соответствующих состояний.

**Топологическое пространство** - Совокупность двух объектов: множества  $X$ , состоящего из элементов произвольной природы, называемых точками данного

пространства  $n$  из введенной в это множество топологической структуры или топологии (открытой или замкнутой)

**Топологическая энтропия** - топологическая энтропия непрерывного отображения компактного пространства была определена Адлером, Конхеймом и Мак-Эндрю.

Для подмножеств компактных пространств энтропия определяется с помощью процедуры, напоминающей конструкцию хаусдорфовой размерности. Это дает возможность обобщить известные результаты о хаусдорфовой размерности квазирегулярных точек некоторых мер и дать определение нового типа сопряженности, промежуточного между топологической сопряженностью и сопряженностью в смысле теории меры.

**Тотальное множество** - множество  $\Sigma$  линейных функционалов на векторном пространстве  $E$ , разделяющее точки  $E$ , т.е. такое, что для любого ненулевого вектора  $x \in E$  найдется функционал  $f \in \Sigma$  с  $f(x) \neq 0$

**Трансверсальность** - общее название для некоторых свойств общего положения, понятие линейной алгебры, дифференциальной и геометрической топологии:

а) два вектора подпространства  $A, B$  конечномерного векторного пространства  $C$  трансверсальны друг другу, если  $A$  и  $B$  порождают  $C$ , т.е.  $\dim A \cap B + \dim C = \dim A + \dim B$ ;

б) в дифференциальной ситуации два подмногообразия  $L, M$  многообразия  $N$  трансверсальны в точке  $x \in L \cap M$ , если касательные пространства в этой точке  $T_x L, T_x M$  порождают  $T_x N$ ;

в) какая-то категория многообразия обладает свойством трансверсальности, если в ней любое отображение аппроксимируется трансверсальным отображением

**Трансцендентная функция** - всякая аналитическая функция (однозначная или многозначная), отличная от алгебраической функции, для вычисления значения которой помимо алгебраических операций над аргументом, необходимо применить предельный переход в той или иной форме.

Для трансцендентной функции характерно наличие у неё хотя бы одной особенности не являющейся полюсом или алгебраической точкой ветвления: например, логарифмическая функция  $\ln Z$  имеет две трансцендентные точки ветвления  $Z=0$  и  $Z=\infty$ . Аналитическая функция трансцендентна только тогда, когда её риманова поверхность не компактна

**Трансцендентное число** - число, не являющееся корнем никакого многочлена с целыми коэффициентами. Областью определения таких чисел являются поля действительных, комплексных чисел (Т.ч.-  $e, \pi, \ln 2, 2^{\sqrt{2}}$  и др.)

**Трансцендентное уравнение** - Уравнение, содержащее трансцендентные функции (показательные, логарифмические и обратные тригонометрическим) от неизвестного переменного, например, уравнения:

$$\sin x + \lg x = x, \quad 2^x - \lg x = \arccos x$$

Обычно рассматривают только простейшие из Т.у. – показательные логарифмические и тригонометрические, так как приемов решения, кроме приближенных, общих Т.у. не существует.

**Трех сигм правило** - правило, согласно которому в некоторых задачах теории вероятности и математической статистики считают практически невозможным событие, заключающееся в отклонении значения нормально распределенной случайной величины от её математического ожидания больше, чем на три стандартных отклонения .

## У

**Удвоение периода** - Обычно имеется в виду последовательность периодических колебаний, в которой при изменении некоторого параметра происходит удвоение периода. В классической модели бифуркации удвоения периода (половинной частоты) происходят через монотонно уменьшающиеся интервалы управляющего параметра. После прохождения критического значения параметра (точки накопления) возникают хаотические колебания. Такой сценарий перехода к хаосу наблюдается во многих мехатронных системах, но не является единственным маршрутом, ведущим к хаосу. (См. Число Фейгенбаума.)

**Универсальное свойство** (универсальность) - Свойство динамической системы, остающееся неизменным в пределах некоторого класса нелинейных задач. Например, число Фейгенбаума для последовательности бифуркационных параметров при удвоении периода является одним и тем же для некоторого класса нелинейных необратимых одномерных отображений.

### Уравнение баланса энтропии

$$\rho \frac{dS}{dt} + \operatorname{div} S = \sigma[S]$$

$\rho \frac{dS}{dt}$  - скорость прироста энтропии в данной области;

$\operatorname{div} S$  – скорость оттока энтропии из данной области в окружающую среду;

$\sigma[S]$  – скорость возникновения или производства энтропии внутри данной области.

**Уравнение Ван дер Поля** - Обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с линейной восстанавливающей силой и нелинейным затуханием, обладающее предельным циклом. Классическая математическая модель автоколебаний. [Названо в честь Б. Ван дер Поля (около 1927 г.).]

**Уравнения Лоренца** - Система трех автономных дифференциальных уравнений, обладающая хаотическими решениями. Выведена и исследована Э. Н. Лоренцем в 1963 г. как модель конвекции в атмосфере. Эта система уравнений — одна из основных моделей хаотической динамики.

**Уравнения Навье—Стокса** - Система трех дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая поле скоростей в потоке несжимаемой линейной вязкой жидкости [Навье (1785—1836), Стокс (1819—1903)]<sup>1</sup>.

**Устойчивость абсолютная** - устойчивость в целом тривиального решения нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений (или уравнений другого типа), равномерная для всех систем некоторого класса.

Термин “У.а.” подразумевает задание класса систем и указание, в каком смысле понимается устойчивость и равномерность. Кроме обыкновенных дифференциальных уравнений рассматриваются также уравнения в конечных разностях, интегральные уравнения, обыкновенные дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом, уравнения с частными производными

**Устойчивость вычислительного процесса** - свойство, характеризующее скорость накопления суммарной вычислительной погрешности. Понятие у.в.п. введено потому, что в реальных расчетах невозможно оперировать с точными числами, ибо нельзя избежать округления, которое может быть причиной потери точности.

Вычислительный процесс есть последовательность арифметических операций над числами.

**Устойчивости жёсткая потеря** - вид потери устойчивости, при которых система уходит со стационарного режима скачком и перескакивает на иной режим движения. Этот режим может быть другим устойчивым стационарным режимом, или устойчивыми колебаниями, или более сложным движением.

**Устойчивости затягивание потери** - при медленном изменении параметра наблюдается качественно новое явление. Эта особенность бифуркации имеет место только в автоматических системах.

## Ф

**Фазовый переход** (фазовое превращение) - переход вещества из одной термодинамической фазы в другую при изменении внешних условий. Фазовый переход происходит, когда система пересекает линию, разделяющую две фазы. Любая смена агрегатного состояния есть фазовый переход.

Наиболее распространенные примеры фазовых переходов первого рода: - плавление и затвердевание;

- кипение и конденсация;
- сублимация;
- структурные переходы в твердых телах, например, образование мартенсита.

В момент фазового перехода симметрия меняется скачком. Изучение симметрии упорядоченной и неупорядоченной фаз позволяет, в частности, выяснить тип фазового перехода.

При фазовом переходе второго порядка плотность и внутренняя энергия не меняются, так что невооруженным глазом такой фазовый переход может быть незаметен. Скачок же испытывают их первые производные по температуре и давлению: теплоёмкость, коэффициент теплового расширения, различные восприимчивости и т.д. Фазовые переходы второго рода происходят в тех случаях, когда меняется симметрия строения вещества. В настоящее время принято говорить не об изменении симметрии, а о появлении в точке перехода параметра порядка, равного нулю в менее упорядоченной фазе и изменяющегося от нуля (в точке перехода) до ненулевых значений в более упорядоченной фазе.

Симметрия появляется и исчезает скачком; при этом нарушение симметрии можно охарактеризовать физической величиной.

Наиболее распространенные примеры фазовых переходов второго рода:

- прохождение системы через практическую точку;
- переход металлов и сплавов в состояние сверхпроводимости (параметр порядка – плотность сверхпроводящего конденсата);
- переход аморфных материалов в стеклообразное состояние.

Исследуются также системы, обладающие фазовыми переходами третьего или более высокого рода.

Диссипативные структуры являются результатом развития собственных внутренних неустойчивостей в системе. Процессы самоорганизации возможны при

обмене энергией и массой с окружающей средой, т.е. при поддержании состояния текущего равновесия, когда потери на диссипацию компенсируются извне.

Эти процессы описываются нелинейными уравнениями для макроскопических функций. Сходство процессов возникновения диссипативных структур с фазовыми переходами в равновесных системах дало основание называть их неравновесными (кинетическими) фазовыми переходами.

Фазовый переход в мехатронике означает скачкообразное изменение физико-механических свойств, при непрерывном изменении внешних параметров. Неравновесный фазовый переход определяется флуктуациями.

**Фазовая плоскость** – это плоскость, по оси абсцисс которой откладывается переменная  $x$ , а по оси ординат – скорость изменения этой переменной  $y = \frac{dx}{dt}$ . Через каждую точку фазовой плоскости проходит одна и только одна траектория. Фазовая траектория может состоять всего из одной точки, называемой положением равновесия. Скорость изображающей точки называется диаграммной скоростью. В положении равновесия она равна нулю. Фазовую траекторию и диаграммную скорость не следует смешивать с действительной траекторией и скоростью движения.

**Фазовый портрет системы** – совокупность семейства фазовых траекторий и особых точек на фазовой плоскости (рис.)

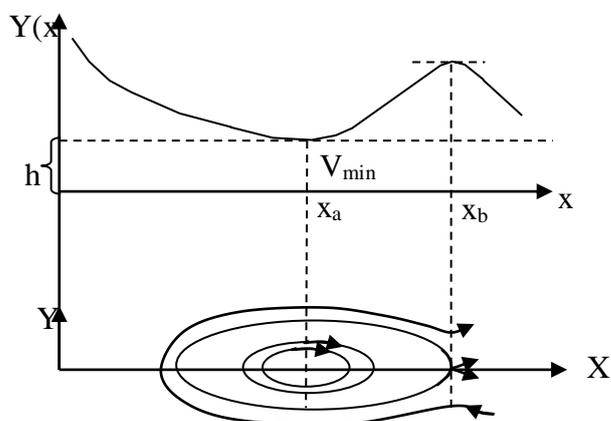


Рис. Построение фазовых траекторий

**Фазовое пространство** - В мехатронике фазовое пространство — абстрактное математическое пространство, в котором координатами служат обобщенные координаты и обобщенные импульсы. В динамических системах, задаваемых системой эволюционных уравнений первого порядка, координатами служат переменные состояния, или компоненты вектора состояния.

**Фейгенбаума число (постоянная)** – последовательность критических значений параметра  $[\lambda_m]$ , при которых происходит удвоение периода траектории, удовлетворяет соотношению.

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\lambda_{m+1} - \lambda_m}{\lambda_m - \lambda_{m-1}} = 1/\delta,$$

где  $\delta = 4,6692016$  – число (постоянная) Фейгенбаума.

**Фибоначчи числа** – элементы последовательности  $u_1, u_2, \dots$ , задаваемые начальными значениями  $u_1 = u_2 = 1$  и рекуррентным соотношением  $u_{n+1} = u_{n-1} + u_n$ .

В основе ф.ч. лежит «формула сложения»:

$$u_{m+n} = u_{m-1} u_n + u_m u_{n+1}$$

Её непосредственными следствиями являются:

$$u_{2n} = u_n (u_{n-1} + u_{n+1}), \quad u_{3n} = u_{n+1}^3 + u_n^3 - u_{n-1}^3 \text{ и т.д.}$$

Пример последовательности Фибоначчи:

1-1-2-3-5-8-13-21-34-55-89 и т.д.

**Функция Мельникова** – Одна из теорий хаотического движения сосредоточивает внимание на седловых точках отображений Пуанкаре, порождаемых непрерывными потоками в фазовом пространстве. Вблизи таких точек имеются подпространства, по которым траектории сходятся к седловой точке (устойчивые многообразия), и подпространства, по которым траектории расходятся от седловой точки (неустойчивые многообразия). Функция Мельникова задает меру расстояния между такими устойчивыми и неустойчивыми многообразиями. Теория, о которой идет речь, считает, что хаос возникает, когда устойчивое и неустойчивое многообразия пересекаются или когда функция Мельникова имеет простой нуль. [Функция названа в честь российского математика в 1962 г.]

**Функциональное движение мехатронной системы** – это целенаправленное механическое перемещение, которое координируется с параллельно управляемыми технологическими и информативными процессами.

## X

**Хаотическое движение** – Тип движения, чувствительный к изменениям начальных данных. Движение, при котором траектории, задаваемые незначительно отличающимися начальными данными, экспоненциально расходятся. Движение с положительным показателем Ляпунова.

**Хаос** (гр. chaos - “зиять”) - беспорядок, лишенный стройности системы. Идеями хаоса западная мысль обязана ещё древним грекам. Сами эти идеи сводились к объяснению порядка в том мире, который возник из первобытного мира – бесформенного, хаотичного и неупорядоченного.

Но уже в восточной мысли, в частности в даосизме хаос ассоциируется со структурами, вложенными в структуры, вихрями, вложенными в вихри, как это происходит, например, в течении жидкостей.

Вплоть до конца XX века в динамике преобладало представление, что порядок возникает из окружающего бесформенного хаоса. В мехатронике эту точку зрения вытесняет другая концепция хаотических явлений. Согласно этой концепции хаос и порядок возникают согласно регулярным законам и за ними стоит не бесформенный хаос, а хаос со скрытым порядком, фрактальными структурами.

Из теории хаоса вытекает, что хаотическая система является частью более высокого порядка и имеет внутри него свой собственный скрытый порядок.

Никогда ещё не наблюдалось спонтанное возникновение какой-либо устойчивой структуры из хаоса. Второе начало термодинамики - это глобальное отрицание возможности самопроизвольного возникновения структур.

Упорядоченность выглядит как бы внутренне преходящей: она разрушается, превращаясь в полную неупорядоченность, когда структура перестает снабжаться потоком энергии извне.

Упорядоченность возникающей структуры обусловлено тем, что где-либо в другом месте порождается еще большая неупорядоченность.

Простейший пример возникновения структуры за счет увеличения хаоса представляет собой тепловой двигатель, где неупорядоченность, возникающая в холодильнике, превосходит упорядоченность, сообщенную поршню. Результатом совместных процессов, происходящих в нагревателе и в холодильнике, является разрушение структуры, поскольку энергия теряет свое качество при переходе от горячего тела к холодному. Однако конкретное «сцепление» деталей (т.е. конструкция) двигателя таково, что в процессе диссипации энергии может возникать определенная структура, которую и воспринимают частицы поршня. Эту структуру мы обычно называем работой.

Любая хаотическая мехатронная система должна иметь нелинейные элементы и свойства. В линейной системе не может быть хаотических колебаний.

**Хаоса критерии возникновения** – подразделяются на прогностические правила, позволяющие предсказывать возникновение хаоса и на диагностические средства, позволяющие устанавливать наличие или отсутствие хаоса.

Прогностическим правилом называется такой критерий, который определяет совокупность входных или управляющих параметров, приводящих к хаосу. Способность предсказывать возникновение хаоса означает, что исследователь располагает либо приближенной математической моделью системы, из которой может быть выведен критерий, либо экспериментальными данными, полученными на основе многочисленных испытаний.

Диагностическим критерием называется тест, который по результатам измерений или обработки данных позволяет определить, находилась или находится ли конкретная исследуемая система в состоянии хаотической динамики. К диагностическим характеристикам относится показатель Ляпунова и фрактальная размерность.

**Хаос перемежаемый** - периоды регулярного движения, прерываемого переходными всплесками хаотического движения; длительность периодов регулярного движения непредсказуема.

**Хаос переходный** - движения, которые кажутся хаотическими и имеют характерные для странного аттрактора свойства (обнаруживаемые по отображению Пуанкаре), но в конце концов, вырождаются в регулярное движение.

**Хаос сильный крупномасштабный** - когда динамические свойства можно описать только в фазовом пространстве очень большого числа измерений; присутствует большое число существенных степеней свободы; трудно получить надежную оценку фрактальной размерности.

**Хаотических колебаний признаки:**

- чувствительность к изменению начальных условий, часто измеряемая показателем Ляпунова и границами фрактальной области;

- широкий Фурье-спектр движения, возбуждаемого на одной частоте, получаемый быстрым преобразованием Фурье с помощью современных электронных спектральных анализаторов;

- фрактальные свойства движения в фазовом пространстве, которые указывают на присутствие странного аттрактора и характеризуются отображениями Пуанкаре и фрактальными размерностями;

- растущая сложность регулярных движений по мере изменения некоторого параметра эксперимента, например удвоение периода (часто можно получить число Фейгенбаума);

- переходные или перемежаемые хаотические движения; непериодические всплески нерегулярного движения (перемежаемость) или первоначально неупорядоченное

движение, которое в конце концов релаксирует к регулярному (автомодельная зависимость может показать верную математическую модель).

**Хопфа бифуркация** - появление в физических системах предельных циклов. В этом случае по мере изменения некоторого управляющего параметра пара комплексно-сопряженных собственных значений  $s_1, s_2 = \pm i\omega + \gamma$  переходит из левой части плоскости ( $\gamma < 0$ , устойчивая спираль) в правую часть ( $\gamma > 0$ , неустойчивая спираль) и возникает периодическое движение, называемое предельным циклом. Такой тип качественного изменения динамики системы называется бифуркацией Хопфа (рис.)

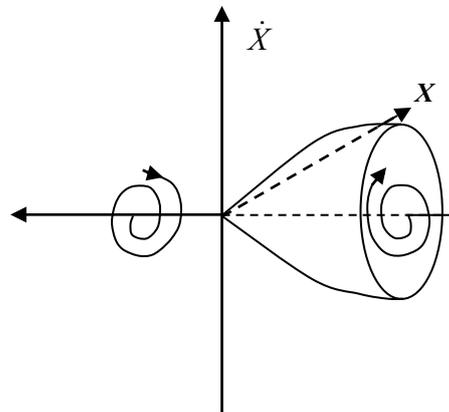


Рис. Бифуркация Хопфа, отвечающая переходу от устойчивой спирали к колебаниям на предельном цикле

## Ч

**Число вращений** - Если система содержит два осциллятора с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , то число вращений на основе частоты  $\omega_1$ , есть среднее число траекторий с частотой  $\omega_2$ , приходящихся на одну траекторию с частотой  $\omega_1$

**Число Рейнольдса** - Безразмерная комбинация параметров в гидромеханике, пропорциональная скорости течения и характерной длине и обратно пропорциональная кинематической вязкости. Переход от ламинарного течения к турбулентному во многих задачах гидромеханики происходит при критическом значении числа Рейнольдса [О. Рейнольдс (1842—1912)].

**Число степеней свободы** - это число независимых величин (параметров) характеризующих положение системы. Это же число характеризует (соответствует) число независимых перемещений точек системы.

**Число Фейгенбаума** - Свойство динамической системы, связанное с последовательностью удвоения периода. Отношение последовательных разностей параметров бифуркации удвоения периода стремится к числу 4,669. ... Это свойство и число Фейгенбаума были обнаружены во многих физических системах на стадии, предшествующей хаосу.

## Ц

**Целевая функция, функция цели** - название оптимизируемой функции в задачах математического программирования

Цилиндрические координаты - числа  $\rho$ ,  $\varphi$  и  $z$ , связанные с прямоугольными декартовыми координатами  $x, y, z$  формулами  $x = \rho \cdot \cos \varphi$ ,  $y = \rho \cdot \sin \varphi$ ,  $z = z$ , где  $0 \leq \rho < \infty$ ,  $0 \leq \varphi < 2\pi$ ,  $-\infty < z < \infty$ .

Координатные поверхности:

круговые цилиндры ( $\rho = \text{const}$ ),

полуплоскости ( $\varphi = \text{const}$ ),

плоскости ( $z = \text{const}$ ).

Коэффициенты Ламе:  $L_\rho = L_z = 1$ ,  $L_\varphi = \rho$ .

Элементы площади поверхности:

$$ds = \sqrt{\rho^2 (d\rho d\varphi)^2 + (d\rho dz)^2 + \rho^2 (d\varphi dz)^2}$$

$$\text{Элемент объема } dv = \rho d\rho d\varphi dz$$

**Цепь Маркова** – Цепь Маркова порядка  $n$  с конечным числом состояний – это стационарный процесс с конечным числом возможных значений, для которого условная вероятность любого значения при заданных  $n$  предыдущих значениях совпадает при заданных  $n+k$  предыдущих значениях (для любого  $k \geq 0$ ). Цепь Маркова произвольного порядка  $n$  называется сложной цепью Маркова, а цепь порядка 1 – просто цепью Маркова.

Марковский сдвиг (перемешивающий) порядка  $n$  с конечным пространством состояний есть преобразование, которое отвечает (перемешивающей) цепи Маркова порядка  $n$  с конечным числом состояний.

Марковский сдвиг порядка  $n$  с конечным пространством состояний изоморфен сдвигу Бернулли. Любой стационарный процесс можно как угодно хорошо аппроксимировать в слабой топологии сложными цепями Маркова. Точнее, для любого процесса  $(P, T)$  и любого  $n$  найдется марковская цепь  $(P_n, T_n)$  порядка  $n$ , которая каждой

последовательности длины  $n$  приписывает ту же меру, что и  $(P, T)$ . Если  $T$  – перемешивающее преобразование, то и  $T_n$  обладает этим свойством.

### Ш

**Шум** - В экспериментах под шумом обычно понимают небольшие случайные возмущения (фон) механического, теплового или электрического происхождения.

### Э

**Эволюционный процесс** - математически описывается векторным полем в фазовом пространстве. Точка фазового пространства задаёт состояние мехатронной системы. Приложенный в этой точке вектор указывает скорость изменения состояния. В некоторых точках вектор может обращаться в нуль. Такие точки называются положениями равновесия (состояние не меняется с течением времени).

**Эквивалентное упругое звено** – представляет собой условную многомерную пружину, привязанную к концевой точке механического устройства. ЭУЗ моделирует податливость, условно сосредоточенную в конечном звене. С технологической точки зрения наибольший интерес представляют упругие свойства мехатронной машины в концевой точке, так как именно здесь происходит силовое взаимодействие рабочего органа и объекта работ.

**Энергия Гиббса (изобарно-изотермический потенциал)** – функция состояния системы  $(G)$ , определяемая разностью между энтальпией  $(H)$  и произведением термодинамической температуры  $(T)$  на энтропию  $(S)$ .

$$G = H - TS$$

**Энергии интеграл** - величина, представляющая собой сумму кинетической и потенциальной энергии мехатронной системы в некоторый момент времени. Физический смысл э.и. состоит в том, что полная энергия колеблющейся системы при отсутствии внешних возмущений не меняется со временем (закон сохранения энергии).

Пусть, например, в ограниченной области  $\Omega$  с кусочно- гладкой границей  $S$  для уравнения гиперболического типа

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \operatorname{div} (p \operatorname{grad} u) - qu + F(x, t) \equiv -Lu + F(x, t), \quad (1)$$

где  $p \in C^1(G)$ ,  $q \in C(\overline{G})$ ,  $p(x) > 0$ ,  $q(x) \geq 0$ ,  $x \in C(\sigma)$ ,  $\rho \in C(G)$ ,

поставлена смешанная задача

$$u \Big|_{t=+0} = u_0(x), \quad \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=+0} = u_1(x), \quad (2)$$

$$\alpha u + \beta \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_s = 0, \quad t \geq 0 \quad (3)$$

$\alpha \in C(s)$ ,  $\beta \in C(s)$ ,  $\alpha(x) \geq 0$ ,  $\beta(x) \geq 0$ ,  $\alpha(x) + \beta(x) > 0$  классическое решение задачи (2), (3) – функция  $u(x, t)$  класса  $C^2(G \times (0, \infty)) \cap C^1(\overline{G \times (0, \infty)})$ , удовлетворяющая уравнению (1) в цилиндре  $G \times (0, \infty)$ , начальным условиям (2) на нижнем основании и граничным условиям (3) на боковой поверхности цилиндра.

Справедливо соотношение

$$J^2(t) = J^2(0) + \int_0^t \int_G F(x, \tau) \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} dx d\tau, \quad t \geq 0, \quad (4)$$

$$\text{где } J^2(0) = \frac{1}{2} \int_G (\rho u_1^2 + p |\text{grad } u_0|^2 + q u_0^2) dx + \frac{1}{2} \int_{s_0} p \frac{\alpha}{\beta} u_0^2 ds$$

Интегралом энергии называется величина

$$J^2(t) = \frac{1}{2} \int_G \left[ \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + p |\text{grad } u|^2 + q u^2 \right] dx + \frac{1}{2} \int_{s_0} p \frac{\alpha}{\beta} u^2 ds$$

При  $F = 0$  равенство (4) принимает вид  $J^2(t) = J^2(0)$ ,  $t \geq 0$

**Энтропия** – функция состояния системы, определяемая тем, что её дифференциал ( $dS$ ) при элементарном равновесном процессе равен отношению бесконечно малого количества теплоты ( $dQ$ ), сообщенной системе, к термодинамической температуре ( $T$ ) системы  $T = \frac{dQ}{dS}$ .

**Эргодический процесс** – это процесс, у которого все статистические характеристики можно определять усреднением по времени одной реализации, достаточной длительности. При изучении статистической динамики статистические закономерности устанавливаются по результатам обработки одной реализации ограниченной длительности.

**Эргодическая теория** - Раздел гамильтоновой механики, который изучает движения, по свойствам напоминающие случайные, связанных нелинейных систем частиц и эволюцию коллективных свойств системы в целом.

## Я

**Языки Арнольда** - колебания связанных нелинейных осцилляторов при некоторых значениях частот оказываются захваченными некоторым значением  $p/q$  ( $p, q$  — целые

числа). Области синхронизации в пространстве параметров имеют форму выступов, или языков. Свое название такие языки получили в честь открывшего их российского математика В. И. Арнольда.

#### **ПРИЛОЖЕНИЕ 4 АББРЕВИАТУРЫ, УПОТРЕБЛЯЕМЫЕ В МЕХАТРОНИКЕ.**

(из книги О.В.Лебедева Автомобильный терминологический англо-русский словарь)

ACEA	Association des Constructeurs Europeans d'Automobiles
ADC	Analog-to-Digital Converter.
ALGOL	ALGORithmic Language
ALU	Arithmetic and Logical Unit
ANSI	American National Standards Institute
APT	Automatically Programmed Tools
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASTM	American Standard Testing Methods
ATC	Additives Technical Committee
ATIEL	Association Technique de l'Industrie European des Lubrifiants
BASIC	Beginners All purpose Symbolic Instruction Code
baud rate	number of transmitted signals per second
BCD	Binary-Coded Decimal
bit	a single binary digit, 0 or 1
boot	initial computer startup function (bootstrap)
bps	bits per second
bug	software error
byte	8 bits
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAI	Computer Aided Instruction
CALS	Continuous Acquisition and Life-cycle Support
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAP	Computer Aided Planning
CCITT	Comite Consultatif International Telephonique et Telegraphique
CCMC	Comite des Constructeurs d'Automobiles du Marche Commun
CCP	Communication Control Program
CEC	Coordinating European Council
CFRC	Cooperative Fuel Research Committee
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CMA	Chemical Manufacturers Association
CNC	Computerized Numerical Control
COBOL	Common Business Oriented Language
Compiler	Converts high-level language code into machine code

cps	characters per second
CPU	Central Processing Unit
CRC	Cyclic Redundancy Check
CRC	Coordinating Research Council
AC	Digital-to-Analog Converter
DCE	Data Communication Equipment
debug	find and correct software errors
DIN	Deutsche Industrie Norm
DIP	Dual-In-Line-Package
DKA	Deutscher Koordinierungsausschuss
DMA	Direct Memory Access
DOS	Disk Operating System
DSP	Digital signal processors
DTE	Data Terminal Equipment
EAROM	Electrically Alterable ROM
EBCDIC	Extended Binary-Coded Decimal Interchange Code
EEPROM	Electrically Erasable Programmable ROM
ECL	Emitter-Coupled Logic
ELTC	Engine Lubricant Technical Committee
EM	Electronic Mail
EOF	End of File
EPROM	Erasable-Programmable ROM
ESDA	disk interface standard
ETX	End of Text
FEP	Front-End Processor
FIFO	First In — First Out
FLOPS	Floating Point Operations per Second
FORTRAN	FORmula TRANslation
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
FPLA	Field Programmable Logic Array
GFC	Groupement Francais de Coordination
GSF	Gesellschaft für Strahlenforschung
IAEA	International Atomic Energy Agency
IGL	Investigation Group Lubricants
I/O	Input/Output
ISAM	Index Sequential Access Method
ISDN	Integrated Service Digital Network
ISO	International Organization for Standardization
K	binary „kilo“, $2^{10} = 1024$
Kbits	1024 bits
Kbytes	1024 bytes = 8 Kbits
LAN	Local Area Network
LSB	Least-Significant Bit
LIFO	Last-in/First-out
LSI	Large/Scale Integration
M	binary „mega“, $2^{20} = 1024 K$
Mbytes	megabytes = 1024 Kbytes
MIPS	Mega Instructions per Second
Modem	MODulator/DEModulator
MOS	Metal-Oxide Semiconductor
MPU	Microprocessor Unit
MSB	Most-Significant Bit

MSI	Medium-Scale Integration
NIST	National Institute of Standards and (Technology
OCR	Optical Character Recognition
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSI	Open System Interconnection
PAL	Programmable Array Logic
PASCAL	In honour of Blaise Pascal
PC	Personal Computer
PG	Project Group of CEC
PLM	Programming Language for Microcomputer
PROM	Programmable ROM
QSAM	Queued Sequential Access Method
RAM	Random Access Memory
REPROM	REprogrammable PROM
ROM	Read-Only Memory
RMRC	Resolved Motion Rate Control (Метод скоростного управления движением манипуляторов)
SAAC	Statistical Application Advisory Committee of CEC
SAM	Sequential Access Method
SG	Survellance Group of CEC
SLD	Slow Device bus
SMD	Disk interface standard, max. transfer rate
SNA	System Network Architecture
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UNIX	Trademark of Bell Laboratories
VITA	VMEbus International Trade Association
VME	Virtual Memory Environment
VMS	Virtual Memory System/Storage
WAN	Wide" Area Network
VI	Virtual instrument
VISA	Virtual instrument Software Architecture
МД	Модуль движения
ММ	Мехатронный модуль
ММД	Мехатронный модуль движения
ИММ	Интеллектуальный мехатронный модуль
МЭМС	Микроэлектромеханические системы
УКУ	Устройство компьютерного управления движением
ЦАП	Цифроаналоговый преобразователь
ШИМ	Широтно-импульсный модулятор
ФСИ	Функционально-структурная интеграция
РФН	Показатель распределения функциональной нагрузки
ДПР	Датчик положения ротора
УСМО	Устройство силомоментного очувствления
КИМ	Координатно-измерительные машины
ТМ	Технологические модули
ЭУЗ	Эквивалентное упругое звено

**ПРИЛОЖЕНИЕ 5**  
**ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ МАШИН»**

1. Что такое мехатроника?
2. Что изучает предмет мехатронные устройства машин?
3. Преимущества мехатронных устройств
4. Области применения мехатронных устройств
5. Что входит в состав традиционной машины?
6. Что выполняет устройство компьютерного управления?
7. Приведите и опишите схему информационных и энергетических потоков мехатронной системе
8. Приведите и опишите схему традиционной машины с компьютерным управлением
9. Мехатронный подход к проектированию
10. Классификация мехатронных модулей
11. Приведите схему развития мехатронных модулей движения
12. Преимущества мехатронных модулей вращательного движения на базе высокомоментных двигателей.
13. Мехатронные модули линейного движения
14. Мехатронные модули типа «двигатель-рабочий орган»
15. Интеллектуальные мехатронные модули движения
16. Контроллеры движения
17. Структура системы управления функциональными движениями
18. Для чего нужны интеллектуальные сенсоры мехатронных модулей и систем?
19. Преимущества абсолютного инкодера
20. Что обеспечивает интеллектуализация инкодеров?
21. Мобильные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов
22. Когда целесообразно автоматическое принятие решения роботом?
23. Лазерный роботехнологический комплекс
24. Роботехнологический комплекс механообработки
25. Технологические машины-гексаподы
26. Транспортные мехатронные средства
27. Факторы, влияющие на компьютерный расчет
28. Признаки систем интеллектуального управления
29. Иерархия управления в мехатронных системах
30. Опишите элементарное действие «Вывод рабочего органа в заданную позицию»
31. Системы управления исполнительного уровня
32. Приведите структурную схему системы управления движением на исполнительном уровне
33. Адаптивное регулирование по эталонной модели
34. Приведите блок –схему адаптивной системы с эталонной моделью
35. Нечеткие регуляторы исполнительного уровня
36. Приведите блок-схему нечеткого регулятора
37. Напишите уравнение ПИД-регулятора в непрерывной форме
38. Какие блоки входят в состав нечетких компьютеров?
39. Приведите блок-схему контурного силового управления.
40. Система контурного силового управления технологическим роботом
41. Основные способы программирования траекторий технологических роботов
42. Дайте сведения о нейронах и искусственных нейросетях
43. Опишите математическую модель нейрона
44. Применение нейронных сетей для управления мехатронными системами
45. Схема нейроконтроллера
46. Дать понятие мехатроники.

47. Рассказать о триединой сущности мехатронных систем.
48. На чем основан метод мехатроники?
49. Что предусматривает функциональное движение мехатронной системы.
50. Функциональные задачи мехатронных систем машин.
51. Рассказать о точности перемещений рабочего органа мехатронной системы
52. Компактность мехатронных модулей.
53. Промышленные роботы, применяемые в автомобилестроении
54. Преимущества машин с параллельной кинематикой
55. Системы управления машин нового поколения.
56. Методы управления интеллектуальными технологиями.
57. Дать понятие интеллектуального робота.
58. Структура мехатронных машин.
59. Устройство компьютерного управления мехатронной системы.
60. Технологический базис мехатроники.
61. Гибридные технологии в мехатронике.
62. Цифровые технологии управления движением.
63. Технологический процесс изготовления мехатронной машины.
64. Методы проектирования мехатронных модулей
65. Интерфейс в мехатронной системе.
66. Суть мехатронного подхода при проектировании модулей.
67. Функциональная модель мехатронного модуля.
68. Перенос функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства.
69. Сенсоры, используемые в мехатронной системе.
70. Машины с параллельной и гибридной кинематикой.
71. Использование Интернет технологий в управлении мехатронной системы.
72. Рассказать о мехатронной системе ABS автомобиля.
73. Датчики, применяемые в мехатронной системе.
74. Особенности радарных датчиков.
75. Особенности ультра звуковых датчиков.
76. Датчики, обеспечивающие полную обзорность автомобиля.
77. Роль ЭБУ в мехатронной системе автомобиля.
78. Вибродиагностика мехатронной системы.
79. Надежность мехатронной системы.
80. Расчеты электронных узлов мехатронной системы.
81. Осуществление микроперемещений в мехатронной системе.
82. Энергетический расчет универсального мехатронного модуля.
83. Расчет преобразователей движения.
84. Устройство датчиков Холла.
85. Экономические аспекты мехатроники.
86. Социальные аспекты мехатроники.
87. Как появилась наука мехатроника и что она означает.
88. Отличия двигателей и редукторов, применяемых в мехатронных системах.
89. Мехатронные системы, применяемые в автомобилестроении Узбекистана.
90. Станки с ЧПУ как мехатронная система.
91. Мехатронные модули современных автомобилей.
92. Отличие автоматического устройства от мехатронного.
93. Перспективы развития мехатроники в автомобилестроении
94. Отличие робота от манипулятора.
95. Оптимизация движений мехатронных систем.
96. Методы построения математических моделей машин.
97. Параметрические модели динамики мехатронной машины.
98. Информационная система навигации автомобиля.

99. Дать понятие и классификацию мехатронных модулей.

100. Погрешность позиционирования мехатронной машины.

ЛЕБЕДЕВ ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ  
ХАКИМЗЯНОВ РУСЛАН РАФИСОВИЧ

Печатается по постановлению Ученого Совета Института механики и сейсмостойкости сооружений им. Уразбаева М.Т. Академии наук Республики Узбекистан

Одобрено решением ученого совета Ташкентского автомобильно-дорожного института в качестве учебника