МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
«Алматинский университет энергетики и связи»

Цыба Ю.А.
Кузьмин Ю.В.
Даркенбаева Э.Б.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебное пособие

Алматы 2017

УДК _____
Основные элементы автоматизированного электропривода:
Учебное пособие/Ю.А. Цыба, Ю.В. Кузьмин, Э.Б. Даркенбаева;
АУЭС. - Алматы, 2017. – 119 с.
ISBN _____

Учебное пособие по курсу «Элементы автоматизированного электропривода» разработано в соответствии с типовой учебной и рабочей программой для специальности 5В071800 – «Электроэнергетика». Приведены основные элементы силового канала электропривода такие как исполнительные двигатели постоянного и переменного тока представляющие собой электромеханические преобразователи, а также электрические преобразователи - тиристорные и частотные. Рассмотрены принципы построения и характеристики современных аналоговых и цифровых устройств информационного канала электропривода, которые представлены элементами информации, сравнения, распределения, усиления, вычисления, памяти, логики, исполнения, вспомогательные и. т. д. В основу классификационной схемы были положены функциональные признаки разделения элементов, что особенно целесообразно по методическим соображениям, так как позволяет не только обоснованно систематизировать, но и показать последовательность развития элементной базы автоматизированного электропривода в плоть до использования микропроцессорных средств.

Учебное пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения, а также может быть использовано инженерно-техническими работниками, занимающимися вопросами электропривода и автоматизации.
Ил. 98, библиогр. – 6 назв.

РЕЦЕНЗЕНТ:

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2017 г.

ISBN _____

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2017 г.

Содержание

	Введение……...	4
1	Современные принципы построения автоматизированного электропривода……	6
1.1	Назначение и состав элементной базы автоматизированного электропривода……	6
1.2	Электропривод как управляемая электромеханическая система…….	9
1.3	Общие требования к электромеханической системе привода……..	14
2	Основные элементы силового канала электропривода-электромеханические и электрические преобразователи…….	17
2.1	Исполнительные двигатели постоянного и переменного тока, механические характеристики двигателей и механизмов……	17
2.2	Шаговые или импульсные двигатели…….	26
2.3	Тиристорный преобразователь в электроприводе постоянного тока……..	29
2.4	Преобразователь частоты в электроприводе переменного тока……...	33
3	Электрические микромашины информационного канала электропривода	46
3.1	Общие сведения и классификация информационных электрических машин……	46
3.2	Тахогенераторы. Устройство, принцип действия и выходные характеристики…….	47
3.3	Поворотные трансформаторы. Устройство, принцип действия и назначение……	57
3.4	Сельсины. Назначение, устройство, принцип действия и режимы работы……...	65
3.5	Магнесины. Назначение, устройство и принцип действия……...	73
4	Основные элементы информационного канала автоматизированного электропривода……	76
4.1	Общие сведения и классификация элементов……	76
4.2	Параметрические датчики. Устройство, принцип действия, характеристики и назначение……..	80
4.3	Генераторные датчики. Устройство, принцип действия, характеристики и назначение……	89
4.4	Операционные усилители, их параметры и характеристики……	95
4.5	Логические элементы и их назначение……...	100
4.6	Аналоговые и цифровые компараторы. Принцип построения арифметико-логического устройства…….	105
4.7	Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, интерполяторы…….	108
4.8	Программируемые контроллеры……	114
	Список литературы……..……	119

Введение

Современный автоматизированный электропривод производственных механизмов и агрегатов, представляет собой сложную многокомпонентную электромеханическую систему, которая используется во всех сферах деятельности человека начиная с приборных электромеханических систем и заканчивая различными технологическими комплексами.

Развитие техники, интенсификация производства, необходимость увеличения производительности труда привели к тому что при автоматизации самых разнообразных технологических процессов всё большее применение находят цифровые системы автоматизированного электропривода существенно усложняя и расширяя номенклатуру его элементов. Поэтому возникает необходимость в том, чтобы специалисты в области электропривода и автоматизации должны хорошо знать не только теорию автоматизированного электропривода, но и его элементную базу с целью либо эксплуатации технических объектов, использующих электропривод (станков, роботов, технологических машин, агрегатов, линий и т.п.), либо с созданием элементов электропривода (электрических машин, аппаратов, преобразователей и т.п.).

Однако до настоящего времени в технической литературе недостаточно уделено внимания элементам, которые являются компонентами современного электропривода. Эта проблема прежде всего связана с тем, что работа по классификации элементов еще окончательно не завершена и требует определенного научного подхода так как, нередко признаки классификации выбираются произвольно, и она в этом случае не достигает своей цели и даже дезориентирует при выборе требуемого элемента. Все это создает определенные затруднения для обучения студентов тех вузов, где имеется соответствующая специализация.

В настоящем учебном пособии автоматизированный электропривод рассмотрен как физическая система, осуществляющая управляемое электромеханическое преобразование энергии, которая содержит два канала – силовой и информационный.

Силовой канал электропривода представлен объектом управления, состоящим из таких элементов как: электрические, электромеханические, механические преобразователи и исполнительный орган рабочей машины.

Совокупность же всех элементов, участвующих в процессе управления силовым каналом электропривода представлена информационным каналом.

Информационный канал рассмотрен гораздо шире силового поскольку новые цели вызывают необходимость более детального представления элементов этого канала и введения новых понятий. Канал состоит из устройства управления, устройства ввода команд оператора, устройства вывода информации о состоянии привода и технологического процесса для контроля и принятия оператором управленческих решений, информационно-измерительной системы (ИИС) и схем сопряжения (интерфейса) устройства управления с выше перечисленными устройствами. При этом ИИС включает в себя большой

класс так называемых информационных электрических машин, которые относятся к датчикам механических переменных на валу двигателя и (или) рабочего органа.

Внедрение автоматизированного электропривода в разнообразные технологические процессы требует все большего объема измерений различных физических величин, которым должно соответствовать определенное число измерительных преобразователей. При этом в настоящее время число типов измерительных преобразователей значительно превосходит число измеряемых величин, так как одну и ту же физическую величину можно измерять различными методами и датчиками разных конструкций. Поэтому класс датчиков информационно-измерительной системы электропривода представлен особенно широко.

Рассмотрены принципы построения и характеристики современных аналоговых и цифровых устройств информационного канала, которые представлены элементами информации, сравнения, распределения, усиления, вычисления, памяти, логики, исполнения, вспомогательные и. т. д.

В основу классификационной схемы были положены функциональные признаки разделения элементов, что особенно целесообразно по методическим соображениям, так как позволяет не только обоснованно систематизировать, но и показать последовательность развития элементной базы автоматизированного электропривода в плоть до использования микропроцессорных средств.

Это привело к тому, что системы управления электроприводами в настоящее время строятся не аппаратными средствами, а с использованием устройств, в которых требуемые алгоритмы управления электропривода закладываются программно. Это упрощает задачи проектирования и изготовления таких систем, а также создаёт возможность управлять электроприводами больших промышленных установок, связанных единым технологическим процессом от единого информационно управляющего комплекса, что особенно важно при создании гибких управляющих производств. Использование цифровых элементов в системах электропривода открывает новые возможности их работы, обусловленные созданием систем диагностики и контроля работы электропривода на дисплее.

Поэтому использование микропроцессорных средств в информационном канале электропривода кардинально влияет на качество функционирования силового канала.

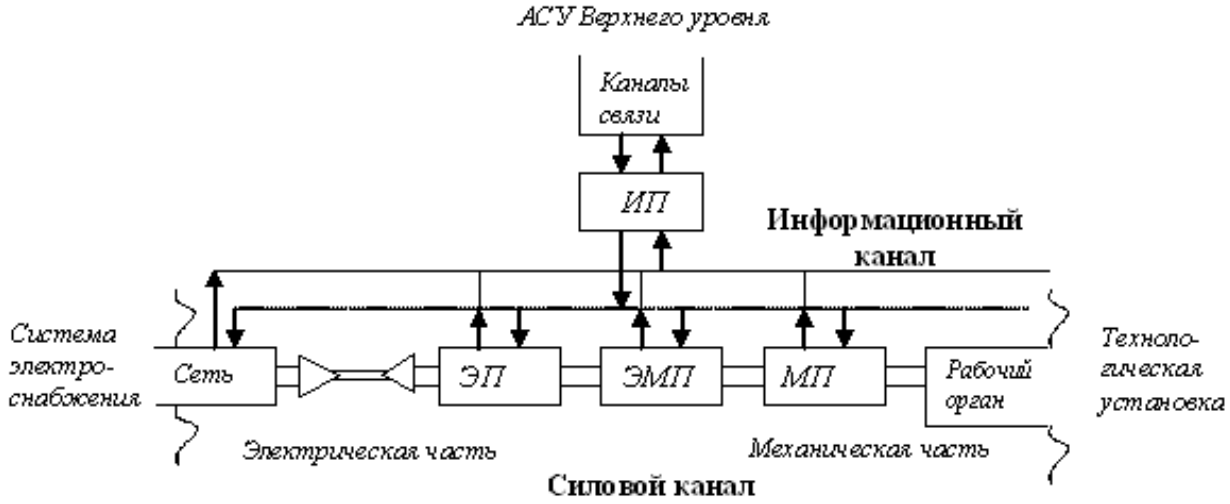
В этом случае электропривод как изделие поставляется со встроенным устройством управления, которое придает ему определенные свойства. При этом управление электроприводом может сводиться лишь к формированию в той или иной форме задающего воздействия от системы управления верхнего уровня, например, уставки скорости или положения. Все остальные операции управления по воспроизведению заданного значения регулируемой координаты будут выполняться автоматически программируемым контроллером.

1 Современные принципы построения автоматизированного электропривода

1.1 Назначение и состав элементной базы автоматизированного электропривода

Электропривод - это управляемая электромеханическая система. Ее назначение - преобразовывать электрическую энергию в механическую и обратно и управлять этим процессом [1,2].

Электропривод всегда имеет два канала - силовой и информационный (рисунок 1.1). По первому транспортируется преобразуемая энергия (широкие стрелки на рисунке 1.1), по второму осуществляется управление потоком энергии, а также сбор и обработка сведений о состоянии и функционировании системы, диагностика ее неисправностей (тонкие стрелки на рисунке 1.1).



ЭП - электрический преобразователь; ЭМП - электромеханический преобразователь; МП - механический преобразователь; ИП - информационный преобразователь.

Рисунок 1.1 - Общая структура электропривода

Силовой канал, в свою очередь, состоит из двух частей - электрической и механической, и обязательно содержит связующее звено - электромеханический преобразователь.

В электрическую часть силового канала входят: устройства, передающие электрическую энергию от источника питания (шин промышленной электрической сети, автономного электрического генератора, управляемого тиристорного преобразователя или преобразователя частоты, аккумуляторной батареи и т. п.) к электромеханическому преобразователю и обратно, и осуществляющие, если это нужно, преобразование электрической энергии.

Механическая часть состоит из подвижного органа электромеханического преобразователя, механических передач и исполнительного органа установки, в котором полезно реализуется полученная механическая энергия.

Информационный канал содержит устройства ввода, вывода, преобразования информации, связи с силовым каналом.

Таким образом электропривод представляет собой вполне определенный класс технических систем. Как и всякая техническая система - упорядоченное, целесообразное сочетание взаимосвязанных и взаимодействующих частей целого, электропривод, с одной стороны, состоит из определенных элементов и, с другой стороны, сам входит в качестве элемента (подсистемы) в другие, более крупные системы.

Элементами электропривода являются электрические, электромеханические, механические и информационные преобразователи и устройства связи с внешними взаимодействующими системами (рисунок 1.1).

Электропривод взаимодействует с системой электроснабжения (связан с ней участком электрической сети) или источником электрической энергии, с одной стороны, с технологической установкой или машиной (связан с ней через рабочий орган), с другой стороны, и наконец, с информационной системой более высокого уровня, часто с человеком-оператором (связан с ней соответствующими каналами связи) (рисунок 1.1).

Можно считать, что электропривод как подсистема входит в указанные системы, являясь их частью. Действительно, специалиста по электроснабжению электропривод обычно интересует как потребитель электроэнергии (рисунок 1.2, *а*), инженера разрабатывающего или эксплуатирующего автоматические системы управления (АСУ), - как развитый интерфейс, связывающий его систему с технологическим процессом или системой электроснабжения (рисунок 1.2, *б*), технолога или конструктора машины - как источник механической энергии (рисунок 1.2, *в*).

Приведенное восприятие электропривода «смежниками», особенно если оно основано на глубоком понимании происходящих в нем процессов. Несколько сложнее с разработчиками элементов электропривода: несмотря на давно сложившуюся систему понятий и соответствующих, терминов желание видеть свой элемент главным (а лучше - единственным) нередко приводит к путанице.

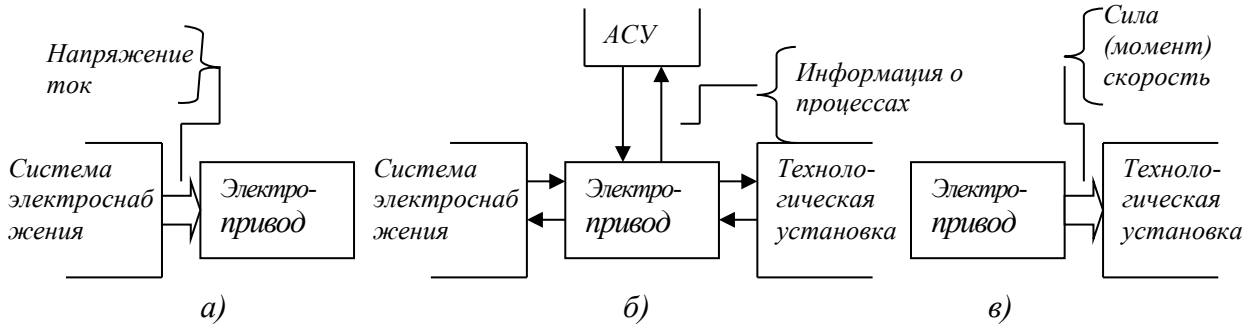


Рисунок 1.2 - Электропривод как подсистема

Необходимо подчеркнуть одно очень важное обстоятельство, вытекающее из системного подхода к электроприводу: все элементы внутри

электропривода теснейшим образом взаимосвязаны и взаимообусловлены, а сам электропривод столь же тесно связан с системами более высокого уровня. Глубокое понимание этих взаимосвязей и учет их на практике - обязательное условие для создания прогрессивных электромеханических систем.

Приведем несколько примеров.

Появление в составе электропривода преобразователей электрической энергии, в которых полупроводниковые приборы работают, как управляемые ключи резко расширило функциональные возможности электропривода, но одновременно породило проблему электромагнитной совместимости привода и системы электроснабжения - привод, например с тиристорными преобразователями или преобразователями частоты, отрицательно влияет на сеть, мешает другим потребителям, делает необходимым применение фильтр компенсирующих устройств и т.п. Конструктивная интеграция электромеханического преобразователя с рабочим органом технологической установки приводит к электроприводу с рядом новых полезных качеств: мотор-колесо в транспортных средствах, электрошпиндель в станках, МГД-насос в литейном роботе и т.п.

Использование микропроцессорных средств в информационном канале кардинально влияет на качество функционирования силового канала.

Следовательно, электропривод - электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих электрических, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними сопредельными электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса.

Место электропривода в современной технологии определяется тем, что практически все процессы, связанные с механической энергией, движением, осуществляются электроприводом. Исключение составляют лишь автономные транспортные средства (автомобили, самолёты, некоторые виды подвижного состава, судов), использующие неэлектрические двигатели. В относительно небольшом числе промышленных установок используется гидропривод, ещё реже - пневмопривод.

Столь широкое, практически повсеместное распространение электропривода обусловлено особенностями электрической энергии - возможностью передавать её на любые расстояния, постоянной готовностью к использованию, легкостью превращения в любые другие виды энергии.

Образно говоря, если вычислительная техника - мозг современной технологии, то электропривод - ее мышцы.

Сегодня в приборных системах используются электроприводы, мощность которых составляет единицы микроватт; мощность электропривода компрессора на перекачивающей газ станции - десятки мегаватт, т.е. диапазон современных электроприводов по мощности превышает 10^{12}. Такого же

порядка и диапазон по частоте вращения: в установке, где вытягиваются кристаллы полупроводников, вал двигателя должен делать 1 оборот в несколько десятков часов при очень жестких требованиях к равномерности движения; частота вращения шлифовального круга в современном хорошем станке может достигать 150 000 об/мин.

Но особенно широк - безгранично широк - диапазон применений современного электропривода: от искусственного сердца до шагающего экскаватора, от вентилятора до антенны радиотелескопа, от стиральной машины до гибкой производственной системы. Именно эта особенность - теснейшее взаимодействие с технологической сферой - оказывала и оказывает на электропривод мощное стимулирующее влияние. Непрерывно растущие требования со стороны технологических установок определяют развитие электропривода, совершенствование его элементной базы, его методологии. И электропривод, развиваясь, положительно влияет на технологическую сферу, обеспечивает новые возможности, а значит, открывает и новые горизонты.

С энергетической точки зрения электропривод - главный потребитель электрической энергии: сегодня в развитых странах он потребляет более 60% всей производимой электроэнергии. В условиях дефицита энергетических ресурсов это делает особенно острой проблему энергосбережения в электроприводе.

Специалисты считают, что сегодня сэкономить единицу энергетических ресурсов, например, 1 тонна условного топлива, вдвое дешевле, чем ее добыть. Нетрудно видеть, что в перспективе это соотношение будет изменяться: добывать топливо становится все труднее, а запасы его все убывают.

Итак, налицо две ясно выявившиеся в ходе научно-технической революции проблемы развития электромеханической системы электропривода: первая - необходимость расширения функциональных возможностей в разнообразнейших технологических применениях, и вторая - острое требование экономно расходовать энергию, другие ресурсы. Эти две проблемы должны быть все время в центре внимания.

1.2 Электропривод как управляемая электромеханическая система

Как было определено выше, электропривод представляет собой физическую систему, которая содержит два канала - силовой и информационный, осуществляющую управляемое электромеханическое преобразование энергии. При этом на основе глубокого анализа физических явлений в электроприводе и при строго оговоренных допущениях силовой канал электропривода можно представить, как объект управления.

Теперь перейдём к рассмотрению собственно процессов управления, к представлению электропривода как управляемой электромеханической системы.

На рисунке 1.1 информационный канал был представлен одним общим блоком и связями его с другими блоками, и этого было достаточно на

начальном уровне изучения электропривода. Новые цели вызывают необходимость значительно более детального представления этого канала; введения новых понятий.

Алгоритм функционирования электропривода определяется требуемым характером обслуживаемого технологического процесса, т.е. строгой последовательностью действий, приводящих к достижению заданной цели, например изготовлению детали на станках, переносу ковша с жидким металлом из точки А в точку В, подъему пассажиров на заданный этаж без стрессовых реакций и т. п.

Величины, желаемый закон изменения которых во времени определяется технологическим процессом, носят название управляемых или регулируемых переменных (координат). Как правило, это - скорость, положение или ускорение рабочего органа. Часто в качестве регулируемой координаты выступает одна, например, скорость, а все остальные должны изменяться так, чтобы обеспечить требуемый закон изменения этой координаты. Такая переменная называется основной регулируемой координатой. Так, в электроприводе главного движения металлорежущего станка основная регулируемая координата - скорость шпинделя, в электроприводе стола сверлильного автомата - положение стола с деталью и т. п.

Под управлением в электроприводе будем далее понимать такую организацию преобразования электрической энергии в механическую, при которой обеспечивается необходимый закон изменения во времени регулируемых координат и, следовательно, реализуется требуемый алгоритм функционирования электропривода и обслуживаемой им технологической установки. Управление по основной регулируемой координате назовем одномерным, а по нескольким - многомерным.

Назовем объектом управления совокупность элементов, входящих в силовой канал электропривода: электрический, электромеханический, механический преобразователь и рабочий орган. Эти элементы могут быть представлены моделями в переменных вход - выход, или структурными схемами, например, модель системы тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока или преобразователь частоты – двигатель переменного тока. Все компоненты вектора входных воздействий $u(u_1,\ldots,u_m)$ можно разделить на две группы: управляющие и возмущающие воздействия, закон изменения которых определяется внешними факторами (момент нагрузки на валу M_C, напряжение питающей сети U_C и т.д.). Процессом управления назовем процесс формирования управляющих воздействий на объект управления для реализации требуемого закона изменения выходных регулируемых координат, а устройством управления - совокупность технических средств, обеспечивающих процесс управления.

В общем случае устройство управления обеспечивает прием команд (запуск, останов процесса управления и др.) и уставок регулируемых координат, называемых далее задающими воздействиями, от системы управления более высокого уровня и (или) от человека-оператора (рисунок 1.3)

и осуществляет в соответствии с этими «указаниями» процесс управления. Если все функции управления выполняются без участия человека-оператора, управление называется автоматическим, а электропривод с таким управляющим устройством - автоматизированным.

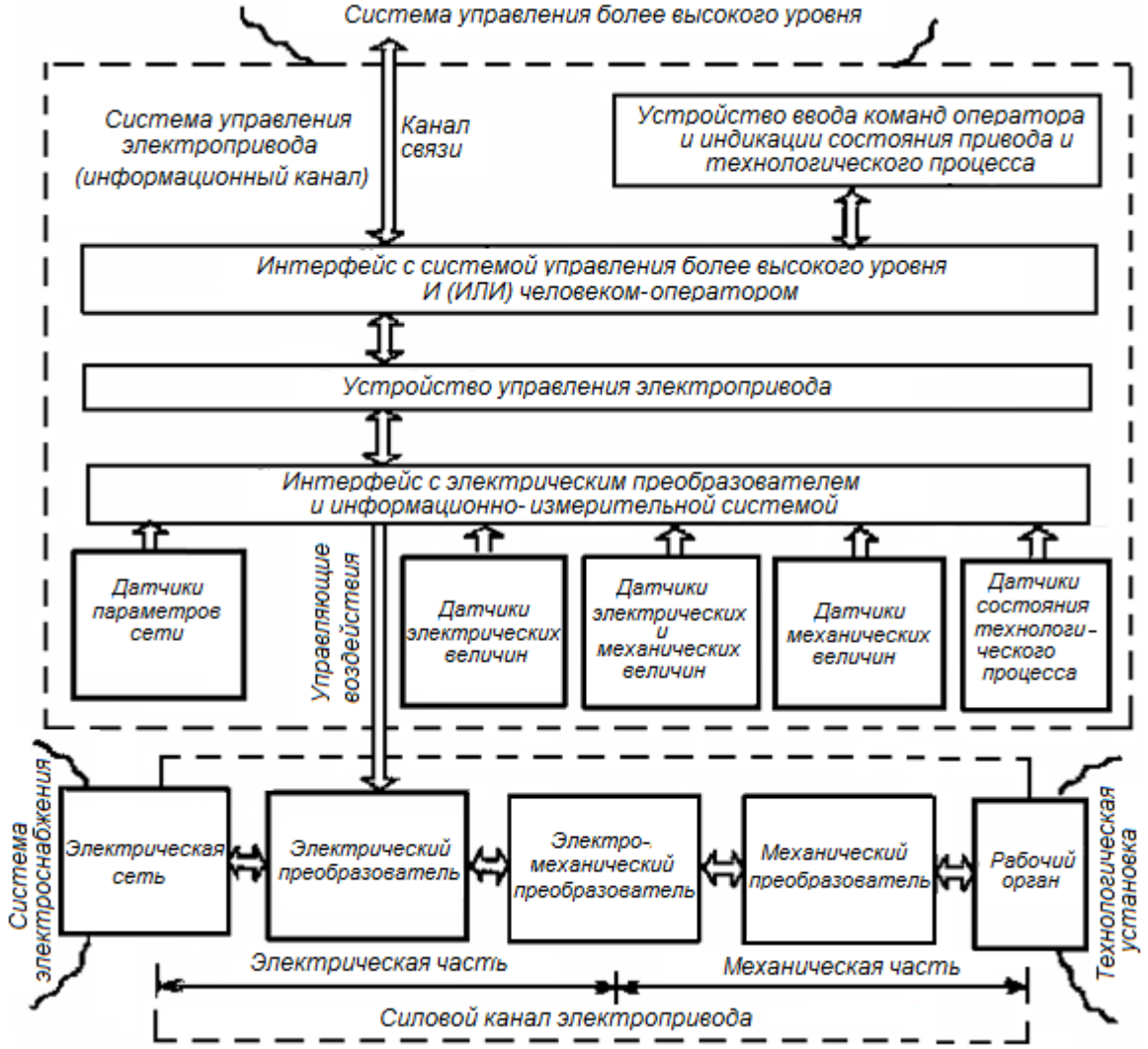


Рисунок 1.3 - Электропривод как управляемая электромеханическая система

Совокупность всех элементов информационного канала, участвующих в процессе управления, назовем системой управления электропривода (рисунок 1.3). Она состоит из устройства управления, устройства ввода команд оператора, устройства вывода информации о состоянии привода и технологического процесса для контроля и принятия оператором управленческих решений, информационно-измерительной системы и схем сопряжения (интерфейса) устройства управления с вышеперечисленными устройствами.

Информационно-измерительная система (ИИС) может включать в себя: датчики параметров сети (напряжения, частоты и др.); датчики электрических переменных внутри и на выходных зажимах электрических преобразователей (напряжения, тока, мощности и др.); датчики электрических и

электромагнитных величин, характеризующих состояние электромеханического преобразователя (напряжения, тока, потока и т.д.); датчики механических переменных на валу двигателя и (или) рабочего органа (скорости, положения, ускорения, момента, усилия); датчики параметров технологического процесса (температуры, давления, расхода и т.д.). Под датчиками будем понимать устройства, обеспечивающие преобразование величин физических переменных в электрический сигнал. Идеальный датчик обеспечивает линейность преобразования во всем диапазоне измеряемых переменных. Будем считать, что в состав ИИС входит один или несколько датчиков.

Итак, устройство управления на основе информации о значениях задающих воздействий и информации, поступающей с объекта управления через ИИС о фактических значениях координат, вырабатывает управляющие воздействия на объект управления. ИИС находится на границе между силовым и информационным каналами электропривода. Поэтому ее, с одной стороны, относят к системе управления, а с другой - к объекту управления. Классическое изображение электропривода как системы, принятое в теории автоматического управления показано на рисунке 1.4.

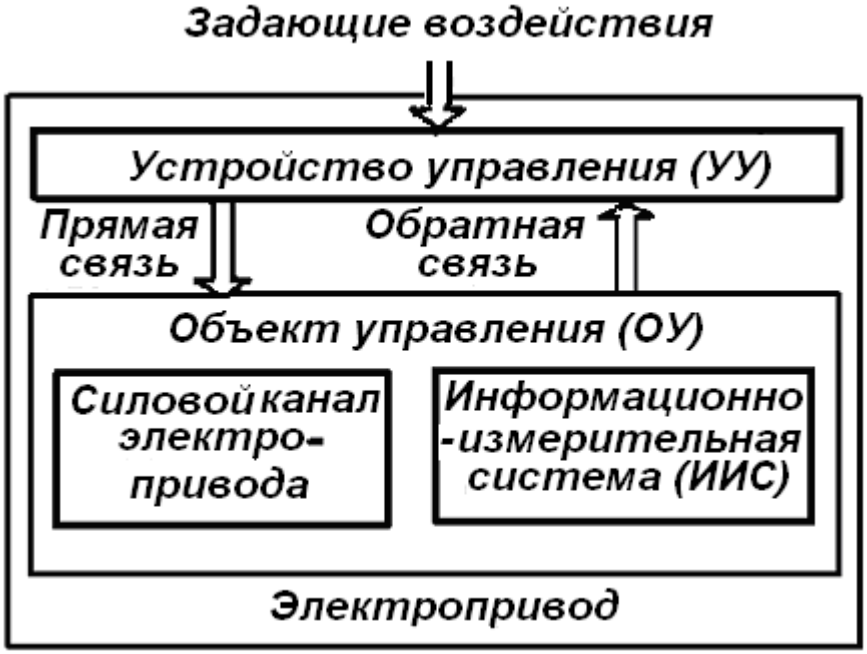


Рисунок 1.4 - Классическое изображение электропривода как системы

Термины «система управления электроприводом» и «система управления электроприводами» будем использовать для обозначения систем управления более высокого уровня, относящихся уже не к отдельному электроприводу, а к технологической установке в целом. По отношению к системе управления такой установки электропривод является подсистемой.

Так, система управления металлорежущего станка управляет несколькими подсистемами: приводом главного движения, подачи,

вспомогательным оборудованием (насосы для подачи в зону обработки охлаждающей жидкости, устройства автоматической смены инструмента и др.).

В составе отдельного электропривода всегда можно выделить подсистемы управления более низкого уровня, например подсистему управления тиристорного преобразователя, которая в свою очередь содержит подсистемы еще более низкого уровня управления, например, подсистему управления тиристорного ключа (рисунок 1.5).

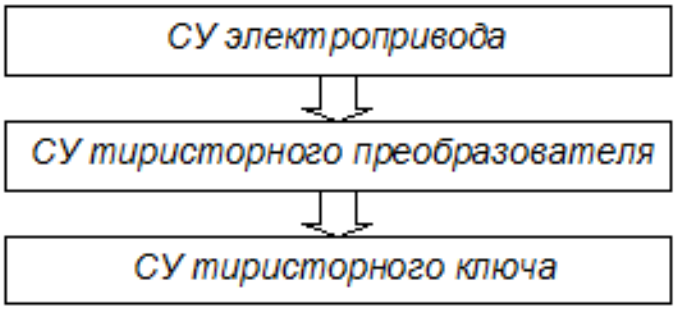


Рисунок 1.5 - Иерархия управления в электроприводе по системе преобразователь – двигатель

Принцип организации многоуровневых иерархических систем управления иллюстрирует рисунок 1.6. Все системы более низкого уровня для системы управления верхнего уровня рассматриваются в качестве объектов управления или подсистем (ПС). Здесь устройство управления (*УУ)* третьего уровня вырабатывает управляющие воздействия для *n* подсистем второго уровня, устройство управления второго уровня - для *k* подсистем первого уровня и т. д. В каждой подсистеме могут быть свои локальные ИИС.

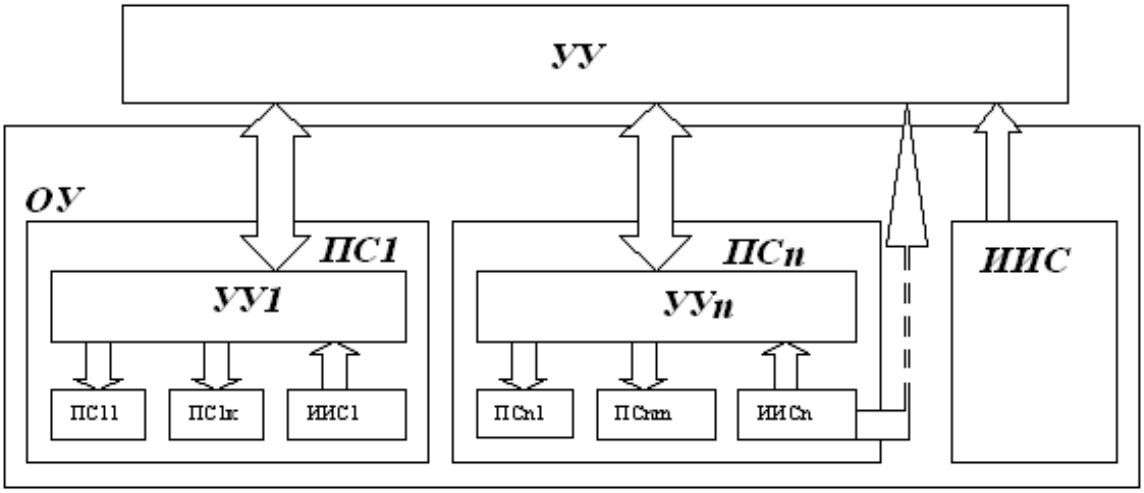


Рисунок 1.6 - Принцип организации многоуровневых систем управления

Некоторые датчики (штриховые линии на рисунке 1.6) могут использоваться системами управления различных уровней одновременно.

Электропривод как изделие всегда поставляется со встроенным устройством управления, которое придает ему определенные свойства. При этом управление электроприводом может сводиться лишь к формированию в той или иной форме задающего воздействия от системы управления верхнего уровня, например, уставки скорости или положения. Все остальные операции управления по воспроизведению заданного значения регулируемой координаты будут выполняться автоматически устройством управления электропривода.

1.3 Общие требования к электромеханической системе привода

Познакомившись в самом общем виде с понятием «электропривод», сформулируем общие требования к нему как к системе, ответственной за управляемое электромеханическое преобразование энергии, т. е. определим главные показатели, которые характеризуют электропривод.

Прежде всего, назовем надежность. Как и любой технический объект, электропривод обязан выполнять заданные функции в оговоренных условиях в течение определенного промежутка времени. Если это не обеспечено, все остальные его качества окажутся бесполезными - именно поэтому требование надежности мы называем первым. Его правильно назвать первым и потому, что надежность нужно рассматривать как неотъемлемое свойство системы, закладываемое на самых первых стадиях ее проектирования и обеспечиваемое в процессе ее создания и эксплуатации. И, наконец, мы начинаем с надежности потому, что ей иногда (даже часто) уделяется недопустимо мало внимания, что приводит к тяжелым издержкам.

Второй общий показатель - точность - отнесем к главной функции электропривода - осуществлять управляемое движение. Правильнее говорить не о точности вообще, а об обеспечении приводом необходимой точности, т.е. об отличии какого-либо показателя движения от заданного, не превышающем допустимого значения. Так, неточность остановки кабины даже очень хорошего лифта может достигать ± 1 мм; погрешность позиционирования щупа, осуществляющего тестирование микросхемы в процессе ее изготовления, не должна превышать ±10 мкм и т.д. Электропривод должен поддерживать на заданном уровне скорость движения ленты транспортера независимо от его загрузки, силу натяжения проволоки или нити при их перемотке, ускорение центрифуги при испытании в ней биологических объектов; при этом всегда существуют допустимые отклонения от заданных значений, выходить за которые уже нельзя. Если функция привода - воспроизводит какую-либо траекторию движения (такой привод называют следящим), то обязательно существует коридор вокруг воспроизводимой траектории, из которого нельзя выходить, и т. д.

Третий показатель, часто связанный со вторым, - быстродействие, т. е. способность системы достаточно быстро реагировать на различные воздействия. Здесь, конечно, опять речь идет о необходимом, нужном

быстродействии. Например, нужно очень быстро, за сотые доли секунды, устранять отклонения от заданного положения антенны радиотелескопа, вызванные порывами ветра. Напротив, неумеренно быстрое троганье с места троллейбуса приводит к неприятным последствиям.

Связь быстродействия с точностью легче всего увидеть на следующем примере: если задание изменилось очень быстро, практически мгновенно, привод должен успеть достаточно быстро отработать его изменение, иначе различие между заданной и фактической траекториями превысит допустимое и выйдет из разрешенного коридора.

Быстродействие, очевидно, связано с какими-то изменениями во времени, с динамическими процессами в системе. С ними связан четвертый показатель – качество динамических процессов, т.е. обеспечение определенных закономерностей их протекания во времени. Например, в лифте каждый испытывал разницу между хорошо функционирующим приводом, когда ускорение и замедление неощутимы, и плохим приводом, когда динамический процесс сопровождается неприятными ощущениями даже у нестарых пассажиров.

Пятый показатель, ставший особенно существенным в последнее время, - энергетическая эффективность. Поскольку любой процесс передачи и преобразования энергии сопровождается ее потерями, важно, какова удельная доля этих потерь. Яснее всего, пожалуй, применительно к электроприводу этот показатель выразится удельным расходом электроэнергии на получение конечного технологического результата. Например, если электропривод выполняет операцию сматывания в бухту проволоки данного диаметра и материала, получаемой с волочильного стана, то важно, сколько электроэнергии будет затрачено, например, на 1 тонну готовой продукции, конечно, при заданном ее качестве (здесь будут существенны предыдущие показатели). Для электропривода пресса будет интересен расход энергии на 1 тонну деталей данного типа и т. п.

Часто энергетическую эффективность оценивают КПД - отношением полезно истраченной энергии к ее полному расходу в данном процессе. При этом необходимо отметить, что неоправданно большие потери - это зря истраченные энергетические ресурсы и труд людей по превращению их в энергию, это вред, нанесенный окружающей среде, - вклад в усиление «парникового эффекта», который уже не на шутку стал тревожить человечество.

Шестой показатель – совместимость электропривода с системой электроснабжения («сосед слева») и информационной системой более высокого уровня («сосед сверху»). Мы не называем здесь «соседа справа» - технологическую установку, но не делаем это лишь потому, что этой совместимости посвящены предшествующие пять показателей. Этот показатель также стал существенным лишь в последнее время, когда в состав электропривода вошли полупроводниковые преобразователи, генерирующие высшие гармоники и в силу этого вредно влияющие на питающую сеть, а иногда и на электронные управляющие устройства.

Проблема совместимости доставляет много хлопот сегодня в электроприводах большой мощности (сотни - тысячи киловатт). Вместе с тем переход к управляемым, а, следовательно, оборудованным полупроводниковыми устройствами, электроприводам массовых промышленных установок распространит эту неприятную и непростую проблему на широкую область массового электропривода.

В качестве седьмого показателя назовем ресурсоемкость, т.е. материалоемкость и энергоемкость, заложенные в конструкцию и технологию производства, трудоемкость при изготовлении, монтаже, наладке, эксплуатации, ремонте. Этот показатель, как легко видеть, самый сложный, комплексный, связанный как с предыдущими показателями, так и с уровнем технологии, экономической ситуацией, со многими другими факторами.

Приведем здесь лишь один пример, характеризующий конъюнктурный характер этого показателя, - рассмотрим изменение массы промышленных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей общего назначения небольшой мощности (1-10 кВт), являющихся главным элементом простейшего массового электропривода. В Японии, где мало природных ресурсов, но очень высок уровень технологии, с 1950 по 1986 г. масса таких двигателей снизилась в среднем в 2,5 раза за счет лучших материалов, лучшего качества их обработки, оптимальной конструкции и т. п. По имеющимся прогнозам процесс снижения массы двигателей там еще продолжается.

В США до середины 70-х годов также происходило снижение массы таких двигателей. Однако сейчас в связи с повышением цен на энергию и большими запасами материалов резко выросло производство так называемых энергосберегающих двигателей, масса которых увеличена по сравнению с обычными на 40-50%. Итак, мы назвали семь показателей, характеризующих электропривод. Они, конечно, далеко не исчерпывают всех сторон этого сложного объекта. Так, среди них нет таких важных для практики показателей, как комплектность, заводская готовность, нет эргономических, дизайнерских характеристик, нет отдельного показателя, отражающего удобство и эффективность эксплуатации, и т. д. Это не значит, что названные стороны электропривода не важны, более того - иногда они оказываются решающими. Просто они менее специфичны, чем названные семь, а в небольшой книге нельзя написать обо всем.

Отметим одно общее свойство приведенных показателей. Обычно не очень трудно (а значит, и не очень дорого) получить какой-нибудь показатель на хорошем уровне. Так, погрешность позиционирования рабочего органа установки, производящей микросхемы, не превышающую несколько микрометров, сравнительно несложно получить под микроскопом, если не лимитировано время. Так это недавно и делалось. Однако заставить остановиться с такой погрешностью рабочий орган автоматизированной установки, движущийся со скоростью 0,5-0,6 м/с, - это уже совсем не простая задача, и ее решение потребовало бы значительных усилий и затрат. Иными словами, только точно или только быстро - это не сложно, а вот быстро и

точно - неизмеримо сложнее. Еще сложнее - быстро, точно и надежно, но именно эти задачи, да еще при выполнении многих других условий и должен решать инженер при управлении современными электромеханическими системами.

2 Основные элементы силового канала электропривода-электромеханические и электрические преобразователи

2.1 Исполнительные двигатели постоянного и переменного тока, механические характеристики двигателей и механизмов

2.1.1 В состав любого электропривода, сколь бы прост или сложен он ни был, обязательно входит электромеханический преобразователь энергии - электрическая машина. Другие компоненты могут отсутствовать или, наоборот, быть очень развиты - это зависит от функций электропривода, но электромеханический преобразователь присутствует всегда, он - неотъемлемая часть системы, называемой электроприводом [1,2,3,4,5]. Основной вид электромеханического преобразователя – электромагнитный поскольку абсолютное большинство электрических машин, как постоянного, так и переменного тока выполнялись и выполняются на основе принципа «проводник в магнитном поле» и являются по существу его различными реализациями. В настоящее время, в связи с развитием силовой полупроводниковой техники и созданием преобразователей частоты в качестве исполнительных двигателей переменного тока применяются почти исключительно асинхронные машины с короткозамкнутым ротором, отличающиеся своей простотой и надежностью.

Приступая к изучению установившихся режимов электропривода, для которых уравнение движения имеет вид

$$\pm M \pm M_C = 0, \qquad (2.1)$$

введем понятие о *механической характеристике.*

Момент двигателя и момент статической нагрузки в общем случае являются функциями скорости.

Зависимость $\omega=f_1(M)$ носит название механической характеристики двигателя, а зависимость $\omega=f_2(M_C)$ - механической характеристики механизма.

На рисунке 2.1 показан примерный вид механических характеристик двигателей различных типов - асинхронного 1, синхронного 2, постоянного тока независимого возбуждения 3, последовательного возбуждения 4. На рисунке 2.2 изображены механические характеристики некоторых типичных механизмов - подъемника 1, механизма подачи металлорежущего станка 2, вентилятора 3.

Моменты статической нагрузки могут обладать реактивными или активными свойствами. Реактивные моменты возникают в результате реакции внешних сил на движение, всегда направлены в сторону, обратную движению

и, следовательно, меняют свой знак при изменении знака скорости. Активные моменты сохраняют свой знак при изменении направления движения, могут быть как движущими, так и моментами сопротивления движению. Так, сила веса груза в механизме подъема крана создает активный момент, а сила трения в механизме перемещения тележки крана - реактивный.

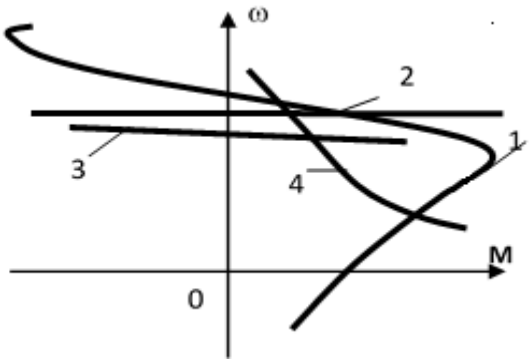


Рисунок 2.1 – Механические характеристики двигателей

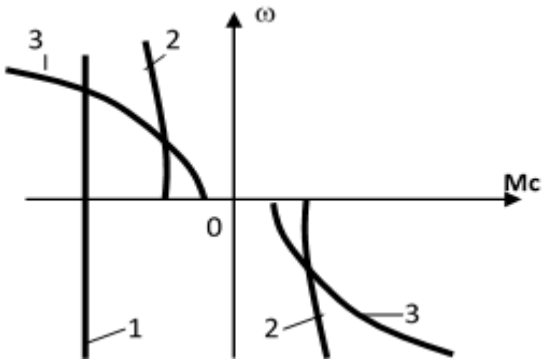


Рисунок 2.2 – Механические характеристики механизмов

На рисунке 2.2 характеристика 1 соответствует активному моменту статической нагрузки, характеристики 2 и 3 - реактивному моменту. Момент, развиваемый двигателем, всегда имеет активный характер, что вытекает из свойства обратимости электрической машины, которая может работать как в двигательном, так и в генераторном или тормозном режиме.

В приведенных механических характеристиках двигателей и механизмов степень изменения момента при изменении скорости различна. Величина, характеризующая это изменение, носит название жесткости механической характеристики.

Абсолютной жесткостью характеристики называется отношение приращения момента к приращению скорости

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}, \qquad (2.2)$$

где M и ω выражены в абсолютных единицах.

Жесткость может быть одинаковой в любой точке механической характеристики. Так, для подъемного механизма $\beta = 0$, для синхронного двигателя $\beta = \infty$, для двигателя постоянного тока независимого возбуждения $\beta < \infty$. Очевидно, постоянной жесткостью обладают линейные механические характеристики. Жесткость может быть различной в различных точках характеристики, что имеет место при нелинейных механических характеристиках. Так, например, жесткость характеристики асинхронного двигателя отрицательна и практически постоянна на пологом участке, равна нулю в точках, где момент достигает экстремальных значений, положительна и

переменна на других участках.

Механические характеристики с высокой отрицательной жесткостью называют жесткими, с низкой отрицательной жесткостью - мягкими. Так, на рисунке 6 характеристики 1 на пологом участке и 3 - жесткие; характеристика 2 - абсолютно жесткая; характеристика 4 - мягкая. Иногда на практике вместо приведенной выше оценки жесткости характеристик используют утверждение типа: «При изменении момента от нуля до номинального изменение скорости не должно превышать заданной величины».

Механические характеристики двигателей и механизмов играют исключительно важную роль в теории и практике электропривода, так как позволяют решить следующие задачи:

- найти точку установившегося режима, то есть определить скорость $\omega_{уст}$ и момент $M_{уст}$ в установившемся режиме;
- определить, будет ли устойчиво движение в установившемся режиме;
- определить энергетические режимы работы двигателя и механизма, то есть направление потоков энергии в установившемся режиме;
- сформулировать принципы регулирования скорости и момента электроприводов и дать количественную оценку различным способам регулирования;
- определить при некоторых условиях поведение привода в переходных режимах.

Кроме механических характеристик значительный интерес представляют электромеханические характеристики двигателей, то есть зависимости скорости вращения от тока в силовой цени двигателя $\omega = \varphi(I)$. Эти характеристики позволяют судить об электрических и тепловых нагрузках двигателя, используются для выбора аппаратуры и т. п.

Перейдем к рассмотрению первых двух из указанных выше задач.

Пусть механические характеристики двигателя и механизма имеют вид, представленный на рисунке 2.3 (сплошные линии).

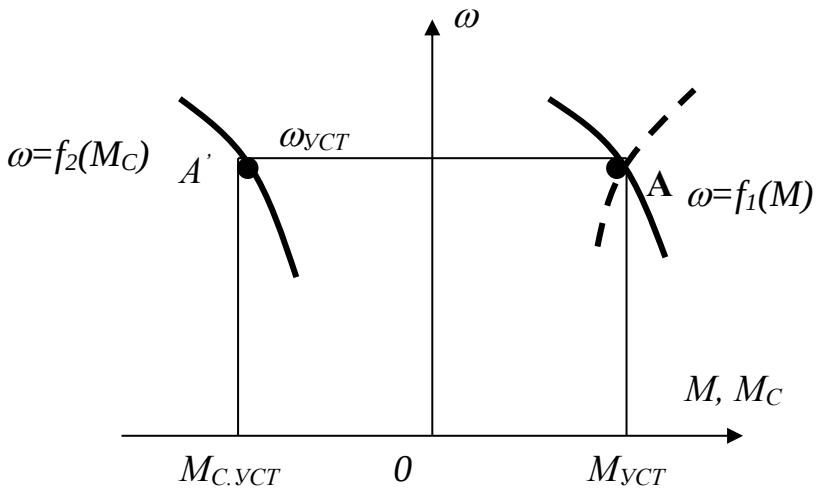


Рисунок 2.3 – Механические характеристики двигателя и механизма при

зеркальном отражении характеристики $\omega=f_2(M_C)$

Как отмечалось уравнение установившегося режима (2.1) выражает равенство величин противоположно направленных моментов двигателя *M* и статической нагрузки *Mc*. Условию (2.1) соответствуют точки *A* и *A′*, для нахождения которых используем зеркальное отражение характеристики $\omega=f_2(M_C)$ относительно оси ординат (пунктир на рисунке 2.3). В установившемся режиме привод будет вращаться со скоростью $\omega_{УСТ}$, двигатель будет развивать момент $M_{УСТ}$, равный по величине $M_{С\ УСТ}$.

Очевидно, что подобное построение может быть выполнено для любых механических характеристик; точки установившихся режимов определятся пересечениями характеристики $\omega=f_1(M)$ с зеркальным отражением характеристики $\omega=f_2(M_C)$.

Некоторое неудобство указанного построения состоит в необходимости получать каждый раз зеркальное отображение характеристики $\omega=f_2(M_C)$. Именно поэтому условились уравнение движения (2.3) записывать с измененным знаком у *Mc*, то есть в виде

$$\pm M - (\pm M_C) = J\frac{d\omega}{dt}$$

или, если не указывать знаки перед *M* и *Mc*

$$M - M_C = J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (2.3)$$

Далее мы будем пользоваться именно этой формой уравнения движения. Для установившегося режима имеем:

$$M - M_C = 0. \qquad (2.4)$$

Теперь поиск точки установившегося режима выполнится проще, как показано на рисунке 2.4.

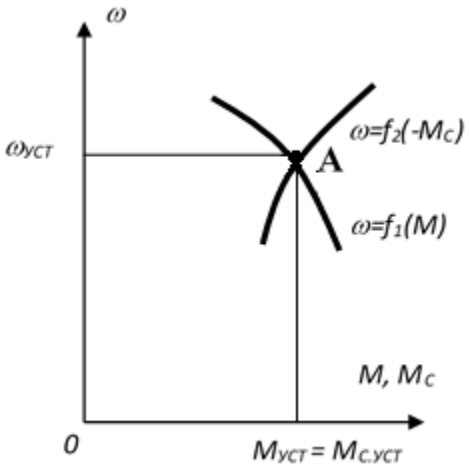


Рисунок 2.4 – Механические

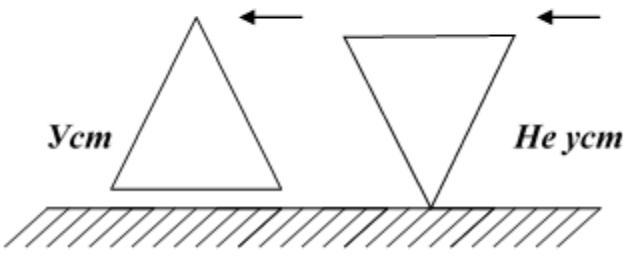


Рисунок 2.4 – К понятию

характеристики двигателя и механизма устойчивости движения привода

Далее мы будем использовать упрощенные обозначения - механическую характеристику двигателя обозначим *M*, а механическую характеристику механизма *Mc*.

Движение привода в установившемся режиме может быть устойчивым или неустойчивым. Если движение устойчиво, то при случайно возникшем отклонении от $\omega_{УСТ}$ привод возвратится в точку установившегося режима При неустойчивом движении любое, даже самое малое, отклонение от $\omega_{УСТ}$ приводит к изменению состояния: привод не возвращается в точку установившегося режима.

Привод с точки зрения устойчивости в какой-то мере подобен пирамидке (рисунок 2.5): если она стоит на основании, то это состояние будет сохраняться несмотря на действие небольших случайных возмущений; если же поставить пирамидку на вершину, то любого, даже самого малого возмущения будет достаточно, чтобы состояние изменилось необратимо.

Рассмотрим вопрос об устойчивости движения привода с характеристиками, показанными на рисунке 2.6.

Пусть по какой-либо причине $\omega_1 < \omega_{УСТ}$. Тогда в соответствии с механическими характеристиками $M_1 > M_{C1}$ и возникает положительный динамический момент $M_1 - M_{C1} = M_{ДИН} > 0$, которому соответствует положительное ускорение, то есть система возвращается в точку установившегося режима - движение устойчиво.

Подобные рассуждения можно провести для проверки на устойчивость любого установившегося режима. При этом следует, конечно, учитывать характер моментов и знак скорости.

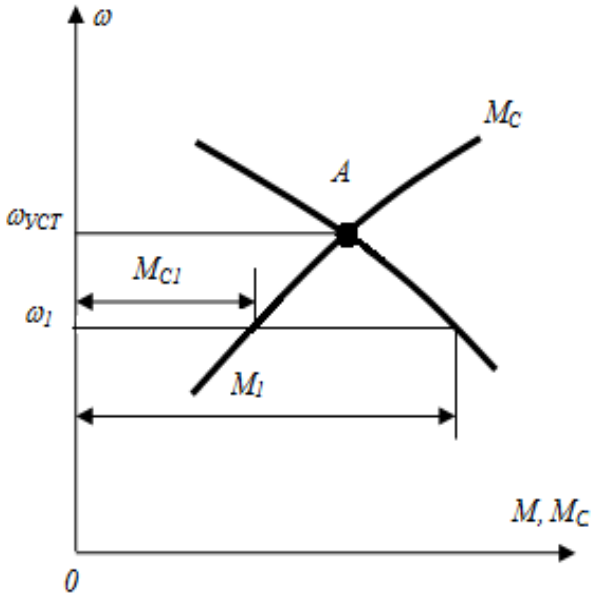


Рисунок 2.6 – Устойчивое движение привода при M'_C

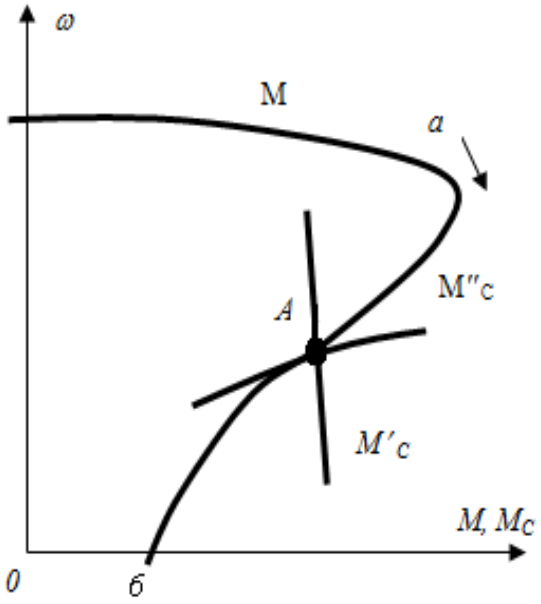


Рисунок 2.7 – Неустойчивое движение привода

Следует отметить, что для решения вопроса об устойчивости движения необходимо одновременно рассматривать механические характеристики двигателя и механизма. Проиллюстрируем это на примере асинхронного двигателя с характеристикой, показанной на рисунке 2.7. Участок характеристики *а-б* называют иногда «неустойчивым». Мы можем теперь уточнить этот термин. Действительно, если механическая характеристика механизма вертикальна (*Mc'* на рисунке 2.7), движение в точке А неустойчиво. Если же двигатель приводит в движение вентилятор с характеристикой *Mc"*, то легко убедиться, что движение в точке А устойчиво.

Приведенный пример позволяет сформулировать условие устойчивости движения в общем виде с использованием введенного выше понятия о жесткости механических характеристик. Движение устойчиво, если в точке установившегося режима выполняется условие:

$$\beta - \beta_C < 0. \qquad (2.5)$$

2.1.2 Понятие регулирования скорости и момента двигателей в электроприводе. Определив условия устойчивого движения привода в установившемся режиме, перейдем к рассмотрению вопросов, связанных с регулированием скорости и момента двигателей в электроприводе.

Из рассмотренного ранее следует, что для изменения условий установившегося режима, то есть для управления работой агрегата, необходимо изменять форму механической характеристики двигателя, что может быть достигнуто изменением электрических параметров двигателя, а также применением специальных схем включения машин.

Будем называть регулированием скорости принудительное изменение скорости рабочего органа механизма в соответствии с требованиями технологического процесса путем воздействия на электрические цепи двигателя. Регулирование скорости осуществляется посредством принудительного изменения механической характеристики двигателя. Частным случаем регулирования скорости является поддержание скорости на заданном уровне при изменении момента статической нагрузки.

Понятие регулирования скорости не следует смешивать с изменением скорости, которое вызывается ростом или снижением нагрузки и происходит в соответствии со свойствами механической характеристики двигателя.

Рассмотрим две характерные ситуации, показанные на рисунке 2.8. В первом случае имеет место значительное изменение скорости = ω_1 - ω_2 индексы «уст» здесь и далее опущены), однако оно вызвано изменением *Mc* от Mc_1 до Mc_2 и не связано с воздействием на механическую характеристику двигателя. Регулирование скорости в этом случае не производится. На втором графике изменение скорости существенно меньше (или его нет совсем), однако

двигатель работает на различных характеристиках M_1 и M_2, то есть имеет место регулирование скорости.

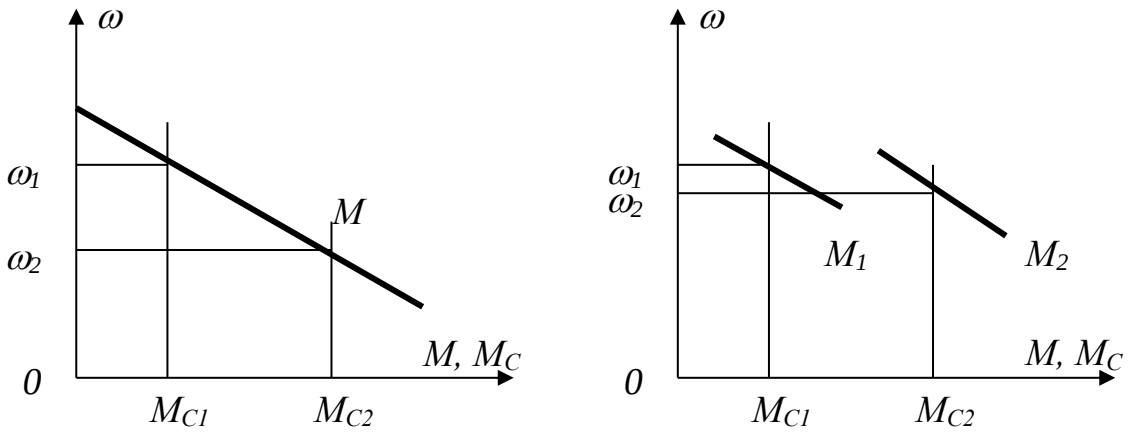


Рисунок 2.8 – Регулирование скорости
в электроприводе

В ряде случаев оказывается необходимым регулирование момента, развиваемого двигателем. Если, например, привод с двигателем Д (рисунок 2.9) должен обеспечить намотку нити Н на барабан Б с заданным натяжением F, причем скорость поступления нити *v*, задаваемая извне, может изменяться, то желательно получить механические характеристики двигателя в виде вертикальных прямых, расстояние которых от оси ординат определится требуемым натяжением и радиусом барабана. Задачи такого типа, то есть регулирование момента двигателя, представляют самостоятельный интерес, однако в дальнейшем мы будем рассматривать главным образом вопросы, связанные с регулированием скорости, так как они значительно чаще возникают на практике.

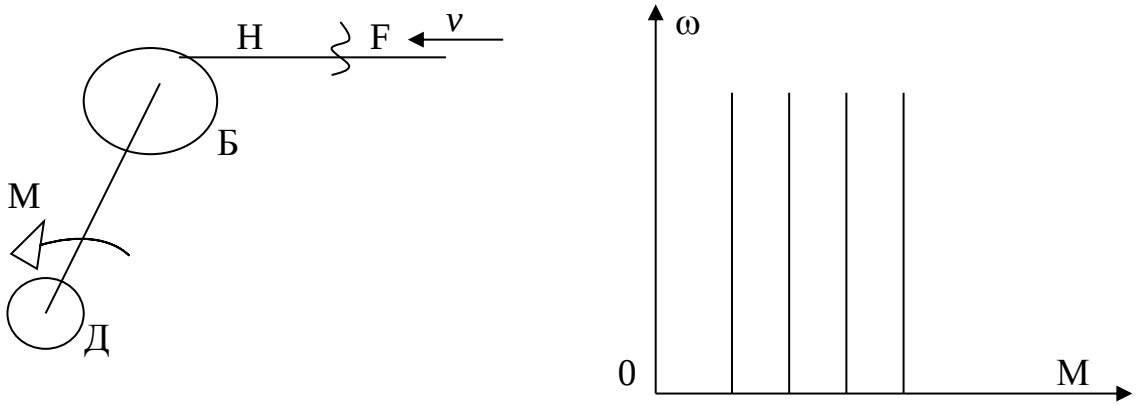


Рисунок 2.9 – Регулирование момента в электроприводе

Итак, связывая регулирование скорости с направленным формированием механической характеристики двигателя, выделим одну из возможных

характеристик в качестве основной. Будем считать основной характеристикой естественную характеристику двигателя, то есть такую характеристику, которая имеет место при номинальных значениях всех величин, определяющих работу двигателя. Далее, при рассмотрении различных характеристики. Все другие характеристики, создаваемые в целях регулирования скорости, будем называть искусственными.

Регулирование скорости, то есть получение искусственных характеристик, отличных от основной, может осуществляться различными способами, обеспечивающими различный технический и экономический эффект. Рассмотрим показатели, по которым будем проводить сопоставление способов регулирования скорости.

а) Направление регулирования, определяемое возможностью получения характеристик выше; или ниже основной. Будем различать однозонное регулирование вниз от основной скорости, когда искусственные характеристики располагаются ниже естественной, однозонное регулирование вверх от основной скорости, когда искусственные характеристики располагаются выше естественной, и двухзонное регулирование, когда имеется возможность получать характеристики выше и ниже естественной.

б) Диапазон регулирования

$$D = \frac{\omega_{МАКС}}{\omega_{МИН}}, \qquad (2.6)$$

то есть отношение максимальной возможной скорости к минимальной при заданных пределах изменения момента статической нагрузки. Пусть, например, искусственные характеристики двигателя представляют собою прямые, пересекающиеся в точке ω_0 (рисунок 2.10) и располагающиеся ниже естественной. Пусть известен расчетный момент статической нагрузки $M_{СР}$ и возможные пределы его изменения $\pm\Delta M_{СР}$. Максимальная и минимальная скорости при этом показаны на рисунке 2.10.

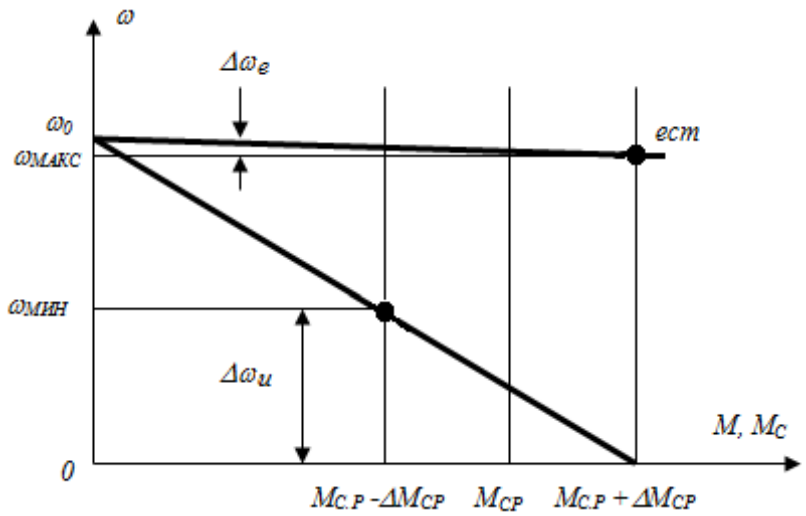


Рисунок 2.10 - К понятию диапазона регулирования и стабильности скорости

Использование характеристики с большим наклоном теряет смысл, так как это привело бы при $Mc=M_{CP}+\Delta M_{CP}$ к изменению знака скорости, то есть двигатель перестал бы приводить в движение рабочий орган механизма. В дальнейшем мы будем полагать, что M_{CP} равен номинальному моменту двигателя, а МСР составляет 15 - 25% от номинального момента.

в) Плавность регулирования будем характеризовать отношением двух реализуемых соседних значений скорости и ω_{i+1}. При плавном регулировании $\omega_{I+1}/\omega_i \to 1$, то есть характеристики располагаются как угодно близко друг к другу. Примером ступенчатого регулирования может служить такое регулирование, когда доступны лишь несколько определенных характеристик и величина ω_{I+1}/ω_i существенно отличается от единицы.

г) Стабильность скорости на искусственных характеристиках при изменении *Mc*. Этот показатель тесно связан с жесткостью искусственных характеристик. Так, на рисунке 2.10 одному и тому же изменению *Mc* соответствуют различные перепады скорости $\Delta\omega_e$ и $\Delta\omega_u$, то есть стабильность скорости при данном способе уменьшается за счет уменьшения жесткости искусственных характеристик.

д) Допустимая нагрузка на искусственных характеристиках, то есть наибольшая величина момента, который двигатель способен развивать длительно при работе на любой искусственной характеристике. Главным критерием при решении этого вопроса является нагрев двигателя. Допустимая нагрузка на естественной характеристике двигателя известна - это номинальный момент, при котором двигатель нагрет до допустимой температуры. Для упрощения решения задачи применительно к искусственным характеристикам введем два допущения: будем считать, что, нагрев двигателя определяется лишь потерями в меди, зависящими от тока в силовых цепях двигателя; примем, что теплоотдача двигателя не зависит от скорости вращения. Тогда допустимой нагрузкой можно считать такую, при которой ток в силовых цепях равен номинальному току двигателя. Так как момент любой электрической машины пропорционален току *I* и магнитному потоку *Ф*, то

$$M_{ДОП} \equiv I_H \Phi . \qquad (2.7)$$

При анализе различных способов регулирования мы будем оценивать характер изменения *Ф* и на этом основании судить о $M_{ДОП}$. Такая оценка, несмотря на ее приближенный характер очень важна.

е) Экономичность регулирования является одним из важнейших показателей и определяет, как правило, выбор того или иного способа. В рамках данного курса мы не имеем возможности изучать все аспекты этой большой и сложной проблемы и ограничимся рассмотрением лишь двух вопросов: оценкой капитальных затрат на реализацию данного способа регулирования и эксплуатационных расходов при работе данного регулируемого привода. О капитальных затратах будем судить по тому дополнительному оборудованию,

которое должно быть включено в состав привода с целью осуществить регулирование скорости. Об эксплуатационных расходах будем судить по их главной составляющей - потерям энергии или потерям мощности, оцениваемым как разность между мощностью, потребляемой из электрической сети P_1, и полезной мощностью на валу двигателя $P_2=M\omega$. В ряде случаев оценивая экономичность регулирования, будем интересоваться весом, габаритами оборудования, его надежностью, влиянием на питающую сеть и т.п.

Приведенные шесть показателей дают в совокупности достаточно полную характеристику различных способов регулирования скорости. Идеальным способом был бы такой, при котором осуществлялось двухзонное регулирование в широком диапазоне, плавное, с постоянной и высокой жесткостью характеристик, с допустимой нагрузкой, примерно равной фактической, при небольших капитальных затратах и эксплуатационных расходах, малом весе и габаритах оборудования, высокой эксплуатационной надежности.

Очевидно, что такого идеального способа не существует, но задача заключается в том, чтобы правильно использовать имеющиеся возможности для получения наиболее рациональных технических решений.

2.2 Шаговые или импульсные двигатели

В последнее время при автоматизации самых разнообразных технологических процессов всё большее применение находят цифровые системы управления электроприводом, которые повышают точность и быстродействие управления, тем самым, увеличивая производительность и качество технологических процессов. Особенно широко применяются системы числового программного управления с использованием шаговых или так называемых импульсных двигателей [1,4,5].

Выше были приведены примеры двигателей постоянного и переменного тока с неограниченным вращательным движением. При подаче питания такие двигатели вращаются до тех пор, пока их не отключат.

Однако в практике встречаются случаи, когда желательно иметь такие электромеханические устройства, которые при подаче одиночного импульса питания поворачивались бы на определенный угол (шаг), а при его прекращении останавливались. При подаче каждого последующего импульса эти устройства должны делать такой же шаг дальше, не возвращаясь в исходное положение. Похожим образом работают шаговые распределители с электромагнитным приводом, но, как правило, они используются только для поворота переключателей.

Поэтому в ряде устройств, особенно в таких, где требуется превращать импульсные электрические сигналы в неограниченные углы поворота (счетчики, цифровые следящие системы и т.п.), с успехом применяются шаговые двигатели. Наиболее удобны шаговые двигатели с ротором в виде постоянного магнита, так как такой ротор четко фиксируется в любом из своих устойчивых состояний даже при выключении питания, т. е. обладает свойством запоминания.

Схематическое изображение такого двигателя показано на рисунке 2.11. Статор состоит из трех явно выраженных полюсов с обмотками, соединенными в звезду. Питание двигателей осуществляется по трем проводам, причем так, что к одному проводу подводится напряжение одной полярности, а к двум другим – напряжение противоположной полярности. Порядок коммутации при вращении ротора по часовой стрелке приведен в таблице 2.1.

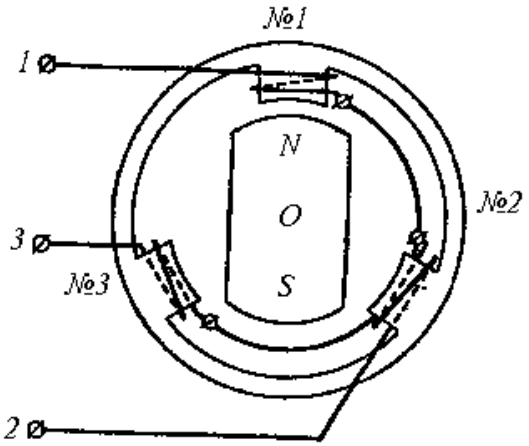


Рисунок 2.11 – Конструкция шагового двигателя

Таблица 2.1 - Порядок коммутации обмоток статора

Полярность полюса №1	S	S	→ N	N	N	→ S
То же №2	N	→ S	S	S	→ N	N
То же №3	→ N	N	N	→ S	S	*S*
Угол поворота ротора	0°	60°	120°	180°	240°	300°

Нетрудно заметить, что при каждом шаге двигателя требуется изменение полярности только одного из полюсов. Такую коммутацию нетрудно осуществить как контактным (с помощью реле или переключателя), так и бесконтактным способом. При изменении порядка коммутации ротор двигателя будет вращаться в противоположную сторону. Шаг двигателя составляет 60°.

При отключении питания ротор фиксируется в своем последнем положении, так как полосы его магнита притягиваются к явновыраженным полюсам статора.

Импульсный двигатель может иметь на статоре шесть выступающих полюсов с уложенными вокруг них обмотками, то шаг двигателя будет составлять 30°. При этом ротор двигателя имеет также двутавровую форму, образующую два выступа. Очевидно, ротор двигателя установится так, чтобы магнитная проводимость на пути созданного обмотками *1 – 1* потока была наибольшей, т. е. продольная ось ротора совпадает с осью полюсов *1 – 1*. Это положение ротора и полярность полюсов статора показаны на рисунке 2.12, а, причем для ясности катушки не показаны.

При поступлении следующего импульса, меняющего полярность коммутации наибольшая магнитная проводимость для потока, создаваемого в

этом случае парами катушек (*1 – 1* и *2 – 2*), будет иметь место при положении ротора, показанном на рисунке2.12, б, т. е. при повороте ротора, на 30°, из исходного положения (рисунок 2.12, а) и т.д.

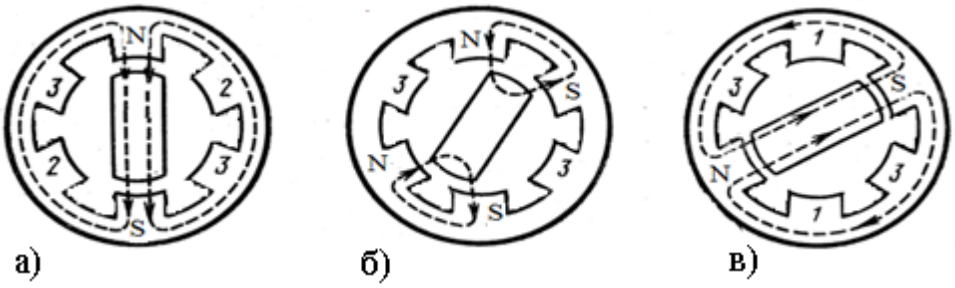


Рисунок 2.12 – Схема работы импульсного двигателя с ротором двутаврового профиля

Импульсный двигатель может обеспечить значительно большую точность работы установки, если придать ротору крестообразную форму, как показано на рисунке 2.13. Из рисунка видно, что при переходе из положения *а* в положение *б, в,* т. е. при той же последовательности импульсов, что и в предыдущем случае (с двутавровым ротором), ротор перемещается каждый раз скачком лишь на 15° и притом вращается в сторону, противоположную направлению вращения поля. Следовательно, скорость вращения ротора будет в этом случае в 2 раза меньше, чем в предыдущем случае.

Рисунок 2.13 – Схема работы импульсного двигателя с ротором крестообразного профиля

С целью уменьшения величины шага применяются многополюсные реактивные шаговые двигатели с одновременным использованием всех полюсов и обмоток для создания рабочего потока в воздушном зазоре машины. Исполнение двигателей одностаторное. На статоре с единой полюсной системой размещены две или три одновременно включенные на напряжение постоянного тока обмотки, трансформаторно связанные между собой. Изменением полярности включения одной из обмоток поле в воздушном зазоре деформируется, смещаясь на шаг в ту или иную сторону.

Величина шага равна зубовому делению и, следовательно, может быть весьма малой. Благодаря наличию трансформаторной связи между обмотками энергия поля, накопленная при отработке импульса, с поступлением следующего импульса не рассевается в виде тепла в коммутирующем устройстве, а трансформируется в одну или несколько смежных обмоток. Электромагнитная постоянная времени снижается во много раз.

Практически используемые шаговые двигатели развивают на валу мощность до 600 – 700 Вт., что дает возможность использовать их в качестве электромеханического преобразователя небольшой мощности со статическим синхронизирующим моментом до 1500 Г·дм. Естественно, что момент двигателя может быть увеличен за счет передаточного числа механического редуктора, связывающего шаговый двигатель с рабочим органом электропривода.

2.3 Тиристорный преобразователь в электроприводе постоянного тока

Приводы по схеме тиристорный преобразователь - двигатель **(**ТП-Д) (рисунок 2.14) являются наиболее распространенными регулируемыми приводами постоянного тока [1,2,3].

Уравнения электромеханической (2.8) и механической (2.9) характеристик при питании якоря двигателя постоянного тока (ДПТ) от тиристорного преобразователя (ТП) имеют следующий вид

$$\omega = \frac{U_{ТП}}{k\Phi_{Н}} - \frac{(R_{Я} + R_{П})}{k\Phi_{Н}} I_{Я} \ ; \qquad (2.8)$$

$$\omega = \frac{U_{ТП}}{k\Phi_{Н}} - \frac{(R_{Я} + R_{П})}{(k\Phi_{Н})^{2}} M \ , \qquad (2.9)$$

где $R_{П}$ – эквивалентное сопротивление тиристорного преобразователя;

$U_{ТП}$ – напряжение на выходе ТП;

$I_{Я}$ – ток в цепи якоря ДПТ;

$R_{Я}$ – сопротивление цепи якоря ДПТ;

$R_{П}$ – внутреннее сопротивление ТП;

$\Phi_{Н}$ – номинальное значение потока возбуждения ДПТ;

k –электромеханичсеский коэффициент ДПТ.

В результате влияния сопротивления преобразователя, характеристики ЭД в разомкнутой схеме управления становятся менее жесткими, чем естественная характеристика (рисунок 2.15). Однако в современных ТП применяются различного рода обратные связи, стабилизирующие скорость при изменении нагрузки.

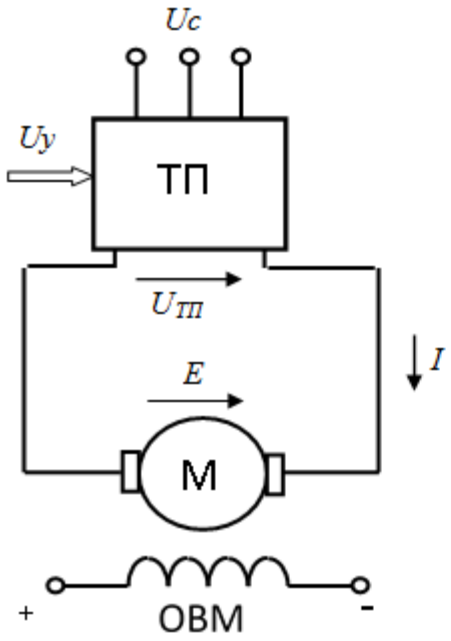


Рисунок 2.14 – Схема ТП

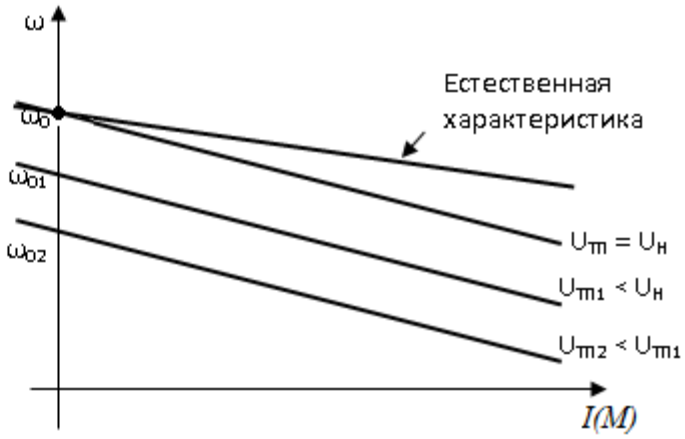


Рисунок 2.15 – Электромеханическая и механическая характеристики ДПТ

Принцип действия ТП основан на том, что в положительный полупериод питающего напряжения тиристор, подобно ключу, открывается и подает напряжение к двигателю только часть этого полупериода (рисунок 2.16). При этом среднее выпрямленное напряжение на нагрузке U_{CP} определяется углом задержки отпирания вентиля α, называемым углом управления.

Пример схемы ТП (трехфазная нулевая реверсивная) приведен на рисунке 2.17. Для *m* – фазного управляемого выпрямителя при непрерывном токе

$$U_{CP} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} mU \sin\frac{\pi}{m} \cos\alpha = U_{CP.\max} \cos\alpha \,. \qquad (2.10)$$

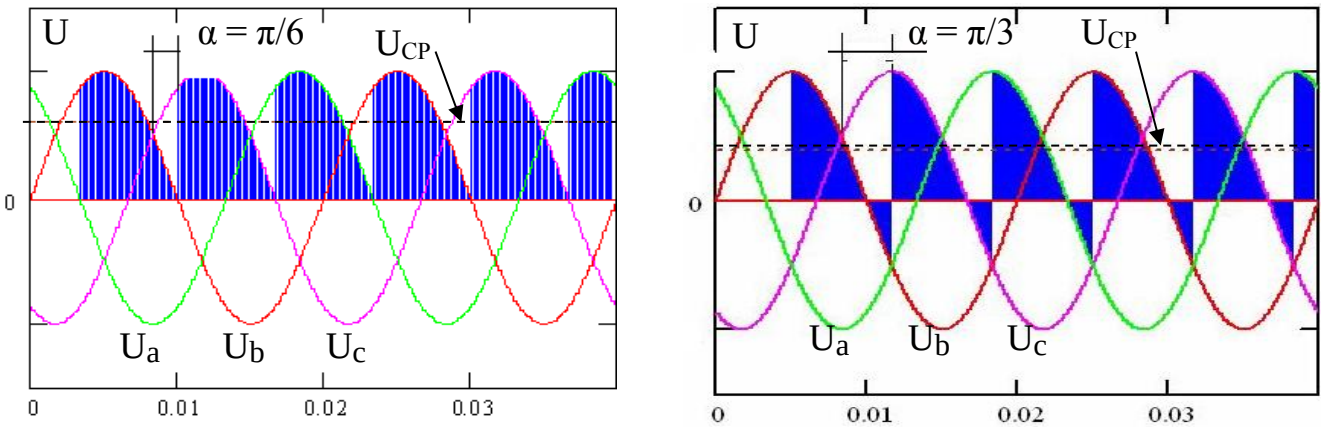


Рисунок 2.16 – К принципу действия ТП

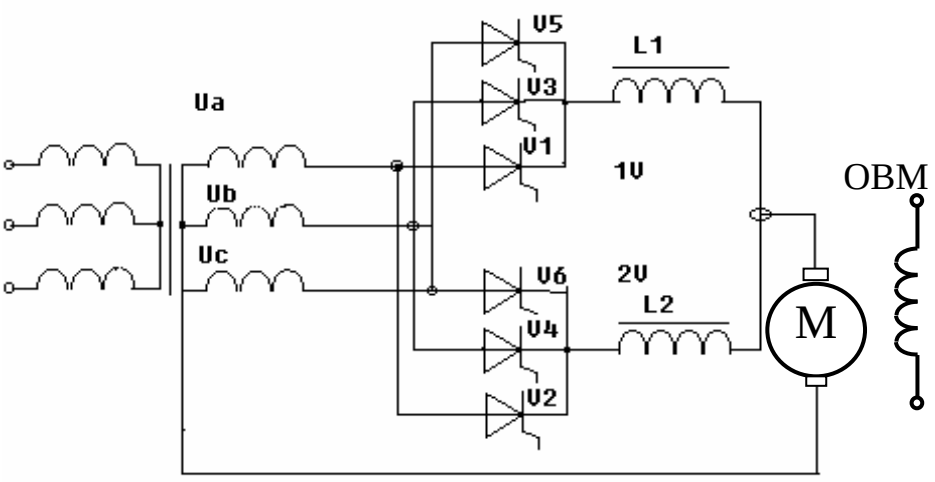


Рисунок 2.17 – Трехфазная реверсивная схема ТП

Таким образом, в (2.8), (2.9) $U_{ТП} = U_{d0}\cos\alpha$, где U_{d0} максимальное выпрямленное напряжение ТП определяется схемой выпрямления и величиной подводимого к схеме напряжения (вторичного фазного напряжения питающего трансформатора):

$$U_{d0} = k_{СХ}U_{2Ф}. \qquad (2.11)$$

Коэффициент схемы равен 2.34 для мостовой схемы и 1.17 – для нулевой схемы выпрямления.

Эквивалентное внутреннее сопротивление преобразователя

$$R_{П}=R_{Т}+n\cdot R_{дТ}+R_{к}. \qquad (2.12)$$

Для мостовых схем R_T вдвое больше (сопротивление двух фазных обмоток трансформатора). Значение коммутационного сопротивления

$$R_K = \frac{x_T \cdot m}{2\pi}, \qquad (2.13)$$

где m - число фаз (для мостовых схем m=6).

Величина n указывает число последовательно соединенных тиристоров (для мостовых схем удвоенное).

При анализе статических свойств ТП его структурную схему удобно представить в виде двух последовательно включенных звеньев (рисунок 2.18): системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и собственно тиристорного преобразователя (силового блока). Входным сигналом СИФУ является напряжение управления U_y, которое преобразуется в угол регулирования тиристоров α и определяет среднее значение выпрямленного напряжения U_d на выходе силового блока.

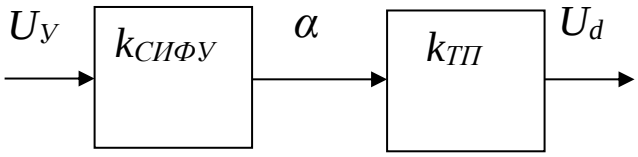


Рисунок 2.18 – Структурная схема ТП

Коэффициент передачи СИФУ представляет собой отношение приращения угла регулирования к приращению напряжения управления.

$$k_{СИФУ} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta U_у}\left(\frac{эл.град}{В}\right). \qquad (2.14)$$

Коэффициент передачи собственно тиристорного преобразователя есть отношение приращения среднего значения выпрямленного напряжения к приращению угла регулирования тиристоров

$$k_{ТП} = \frac{\Delta U_d}{\Delta\alpha}\left(\frac{В}{эл.град}\right). \qquad (2.15)$$

Общий коэффициент усиления зависимого инвертора представляет собой отношение приращения среднего значения выпрямленного напряжения к приращению напряжения управления

$$k_n = \frac{U_d}{U_у} \qquad (2.16)$$

и в соответствии со структурной схемой

$$k_n = k_{СИФУ} k_{ТП}. \qquad (2.17)$$

В преобразователях используются СИФУ с линейными или так называемыми арккосинусоидальными характеристиками (рисунок 2.19). Во втором случае получаем линейную в пределах рабочего диапазона зависимость *Ed = f(Uy)*.

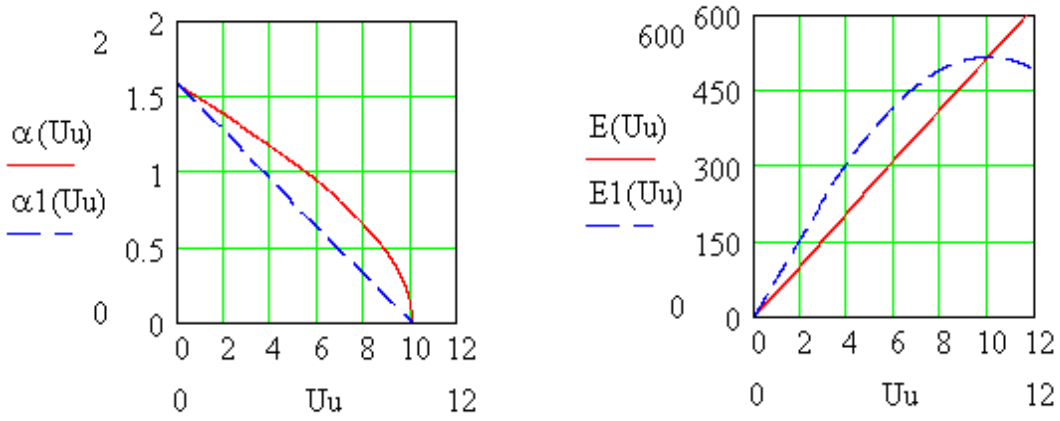


Рисунок 2.19 – Характеристики СИФУ

2.4 Преобразователь частоты в электроприводе переменного тока

2.4.1 Преобразователь частоты - это устройство, предназначенное для преобразования переменного тока (напряжения) одной частоты в переменный ток (напряжение) другой частоты.

Современный частотно регулируемый электропривод (ЧРП) состоит из асинхронного или синхронного электрического двигателя и преобразователя частоты, где ПЧ - преобразователь частоты, ИО - исполнительный орган (рисунок 2.20) [1,2,3].

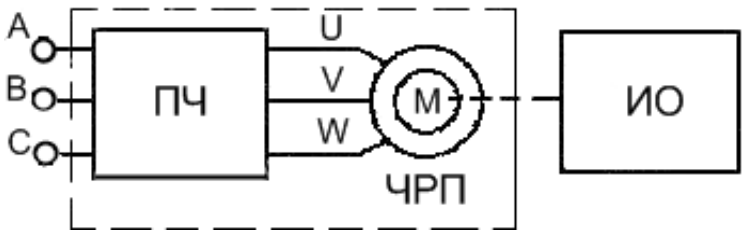


Рисунок 2.20 - Структурная схема частотно регулируемого привода

Электрический двигатель преобразует электрическую энергию в механическую энергию и приводит в движение исполнительный орган технологического механизма.

Преобразователь частоты управляет электрическим двигателем и представляет собой электронное статическое устройство. На выходе преобразователя формируется электрическое напряжение с переменными амплитудой и частотой.

Название «частотно регулируемый электропривод» обусловлено тем, что регулирование скорости вращения двигателя осуществляется изменением частоты напряжения питания, подаваемого на двигатель от преобразователя частоты.

На протяжении последних 10-15 лет в мире наблюдается широкое и успешное внедрение частотно регулируемого электропривода для решения различных технологических задач во многие отрасли экономики. Это объясняется в первую очередь разработкой и созданием преобразователей частоты на принципиально новой элементной базе, главным образом на биполярных транзисторах с изолированным затвором IGBT.

Области применения – металлургия (например, привод рольгангов), текстильная промышленность, станкостроение (например, электрошпиндели и металлорежущие станки), центрифуги, полировальные машины, электропривод вентиляторов и насосов и другие.

Зарубежные фирмы, в частности Siemens, Fanyk, ABB и др. широко применяют частотное управление для вентиляторов, насосов в горизонтальных и вертикальных роботах, транспортерах. Американские и английские фирмы широко используют частотное управление приводами в нефтяной и газовой

промышленностях. Используются привода, как с централизованным, так и с индивидуальными преобразователями.

При дальнейших рассуждениях будем говорить о трехфазном частотно-регулируемом электроприводе, так как он имеет наибольшее промышленное применение.

В синхронном электрическом двигателе частота вращения ротора n_2 в установившемся режиме равна частоте вращения магнитного поля статора n_1.

В асинхронном электрическом двигателе частота вращения ротора n_2 в установившемся режиме отличается от частоты вращения n_1 на величину скольжения s.

Частота вращения магнитного поля n_1 зависит от частоты напряжения питания. При питании обмотки статора электрического двигателя трехфазным напряжением с частотой f создается вращающееся магнитное поле.

Скорость вращения этого поля определяется по известной формуле

$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{p}, \tag{2.18}$$

где p - число пар полюсов статора.

Переход от скорости вращения поля ω_1, измеряемой в радианах, к частоте вращения n_1, выраженной в оборотах в минуту, осуществляется по следующей формуле

$$n_1 = \frac{60}{2\pi}\omega_1, \tag{2.19}$$

где - 60 коэффициент пересчета размерности.

Подставив в уравнение (2.19) скорость вращения поля ω_1, получим

$$n_1 = \frac{60 f}{p}. \tag{2.20}$$

Таким образом, частота вращения ротора синхронного и асинхронного двигателей зависит от частоты напряжения питания.

На этой зависимости и основан метод частотного регулирования т.е. изменяя с помощью преобразователя частоту f на входе двигателя, мы регулируем частоту вращения ротора.

Выходная частота в современных преобразователях может изменяться в широком диапазоне и быть как выше, так и ниже частоты питающей сети.

Схема любого преобразователя частоты состоит из силовой и управляющей частей. Силовая часть преобразователей обычно выполнена на тиристорах или транзисторах, которые работают в режиме электронных ключей.

Управляющая часть выполняется на цифровых микропроцессорах и обеспечивает управление силовыми электронными ключами, а также решение большого количества вспомогательных задач (контроль, диагностика, защита).

Преобразователи частоты, применяемые в регулируемом электроприводе, в зависимости от структуры и принципа работы силовой части разделяются на два класса:

1. Преобразователи частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока.

2. Преобразователи частоты с непосредственной связью - НПЧ (без промежуточного звена постоянного тока).

Каждый из существующих классов преобразователей имеет свои достоинства и недостатки, которые определяют область рационального применения каждого из них.

2.4.2 Исторически первыми появились НПЧ (рисунок 2.21), в которых силовая часть представляет собой управляемый выпрямитель и выполнена на тиристорах или транзисторах. Система управления поочередно отпирает группы тиристоров или транзисторов и подключает статорные обмотки двигателя к питающей сети.

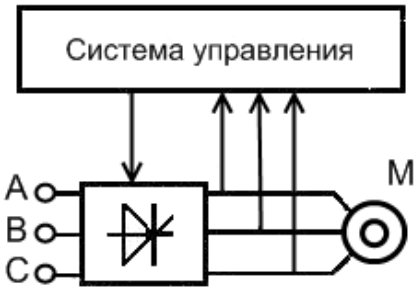


Рисунок 2.21 - Структурная схема НПЧ

Для уяснения принципа преобразования на рисунке 2.22 приведена простейшая схема НПЧ, осуществляющего преобразование трехфазного напряжения промышленной частоты f_1 в однофазное напряжение регулируемой частоты f_2.

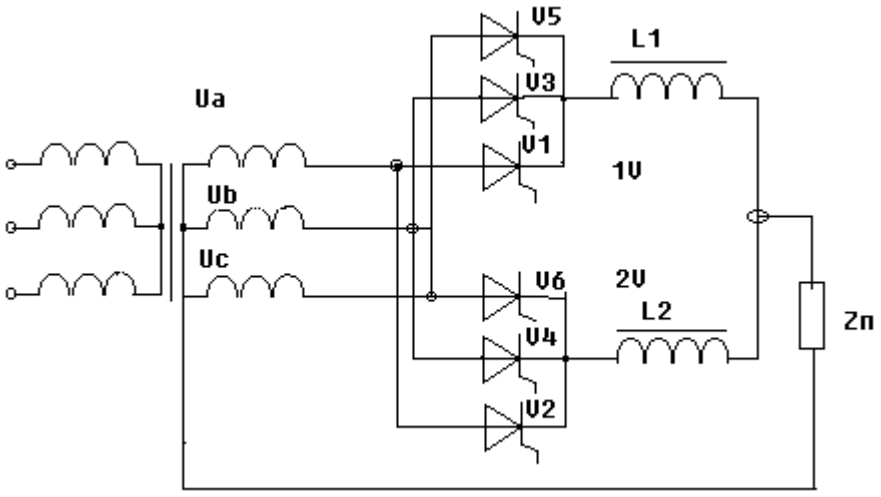


Рисунок 2.22 - Схема силовой части НПЧ

Выходное напряжение переменного тока необходимой частоты, амплитуды и фазы формируется из кривых напряжения многофазной системы переменного тока на входе. В устройствах данного типа функции выпрямления напряжения сети и его преобразование в напряжение или ток требуемой частоты выполняются в одном устройстве. Это обусловливает однократное преобразование энергии и высокое значение КПД, малые габариты и массу НПЧ. Они выполняются по тем же схемам, что и выпрямители (однофазные, многофазные, нулевые, мостовые).

Преобразователь выполнен по схеме двухкомплектного реверсивного выпрямителя по встречно-параллельной нулевой схеме. Каждая группа *1V* и *2V* открывается на время, равное полупериоду выходного напряжения $T_2/2$, причем положительная полуволна формируется при работе группы *1V*, отрицательная – группы *2V*. Выходное напряжение преобразователя формируется из «вырезанных» участков синусоид входного напряжения и представляет собой огибающую фазных напряжений которую условно можно аппроксимировать синусоидой (рисунок 2.23). Форма этого напряжения зависит от числа фаз сети, частоты выходного напряжения, которую можно регулировать путем изменения длительности проводимости групп 1V и 2V, и т.д.

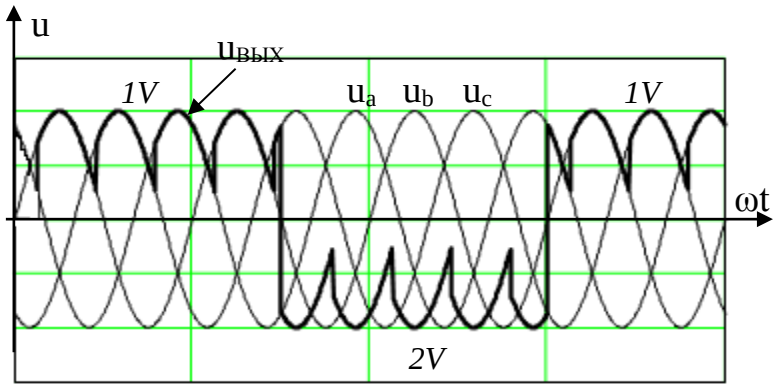


Рисунок 2.23 – Форма выходного напряжения

Недостатком НПЧ является ограниченный диапазон выходной частоты. При частоте питающей сети, равной *50 Гц*, верхний предел регулирования f_2 составляет *25 Гц*. Как следствие малый диапазон управления частоты вращения двигателя (не более 1:10). Дальнейшее повышение частоты связано с отказом от естественной коммутации вентилей, увеличением фаз питания или подачей на преобразователь напряжения повышенной частоты. Это ограничение не позволяет применять такие преобразователи в современных частотно-регулируемых приводах с широким диапазоном регулирования технологических параметров. Потому область применения НПЧ в регулируемом электроприводе ограничена тихоходными безредукторными электроприводами и схемами управления по цепи ротора (машины двойного питания).

Использование не запираемых тиристоров требует относительно сложных систем управления, которые увеличивают стоимость НПЧ.

«Резаная» синусоида на выходе преобразователя является источником высших гармоник, которые вызывают дополнительные потери в электрическом двигателе, перегрев электрической машины, снижение момента, очень сильные помехи в питающей сети. Применение компенсирующих устройств, приводит к повышению стоимости, массы, габаритов, понижению к.п.д. системы в целом.

Наряду с перечисленными недостатками НПЧ, они имеют определенные достоинства. К ним относятся:

- высокий КПД относительно других преобразователей (98,5% и выше);
- способность работать с большими напряжениями и токами, что делает возможным их использование в мощных высоковольтных приводах;
- относительная дешевизна, несмотря на увеличение абсолютной стоимости за счет схем управления и дополнительного оборудования.

Подобные схемы преобразователей используются в старых приводах и новые конструкции их практически не разрабатываются.

2.4.3 Наиболее широкое применение в современных, частотно регулируемых приводах находят ПЧ с явно выраженным звеном постоянного тока. ПЧ со звеном постоянного тока можно подразделить на преобразователи с управляемым выпрямителем - УВ и автономными инверторами напряжения или тока - АИ (рисунок 2.24) и ПЧ с неуправляемым выпрямителем - В и широтно-импульсной модуляцией выпрямленного напряжения - ШИМ (рисунок 2.25).

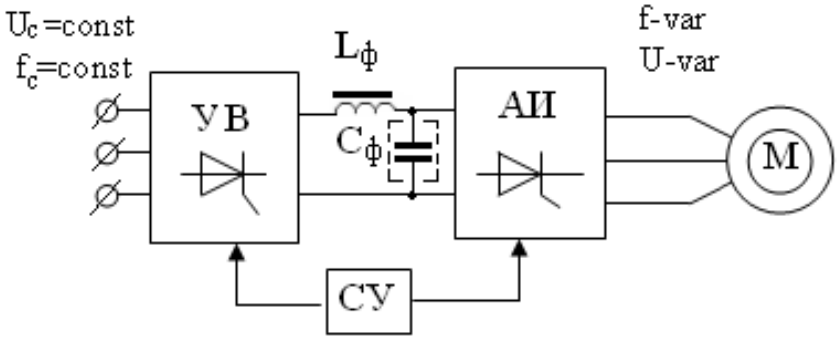


Рисунок 2.24 – ПЧ с управляемым выпрямителем и автономными инверторами напряжения или тока

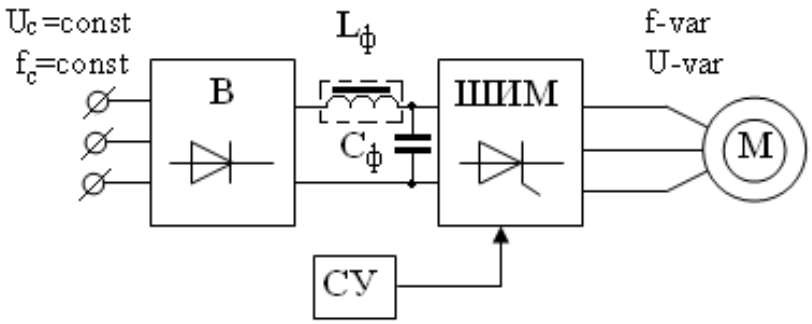


Рисунок 2.25 – ПЧ с неуправляемым выпрямителем и ШИМ

Регулировочные данные приведенных схем практически одинаковы, использование ШИМ позволяет качественно улучшить гармонический состав выходного напряжения, однако увеличение частоты коммутации вентилей в ПЧ с ШИМ приводит к росту потерь в преобразователе. Необходимо также отметить, что для формирования синусоидального переменного напряжения используются как автономные инверторы напряжения, так и автономные инверторы тока. При этом инвертор тока отличается от инвертора напряжения наличием реактора $L_Ф$ и отсутствием емкости $C_Ф$ и наоборот в инверторе напряжения присутствует емкость $C_Ф$, но отсутствует реактор $L_Ф$. Преимущество той или иной схемы определяется элементами силовой схемы преобразователя и системой её управления. В связи с этим в зависимости от элементной базы ПЧ отдельные известные фирмы производители отдают предпочтение автономным преобразователям напряжения (Siemens, Rubicon, Toshiba, General Electric, Mitsubishi Electric и т.д.), а другие предпочитают токовую идеологию (Allen-Bradley, Hyundai, Ross Hill, Ansaldo и т.д).

Типовая схема ПЧ с явно выраженным звеном постоянного тока представлена на рисунке 2.26. В нижней части рисунка изображены графики напряжений и токов на выходе каждого элемента преобразователя.

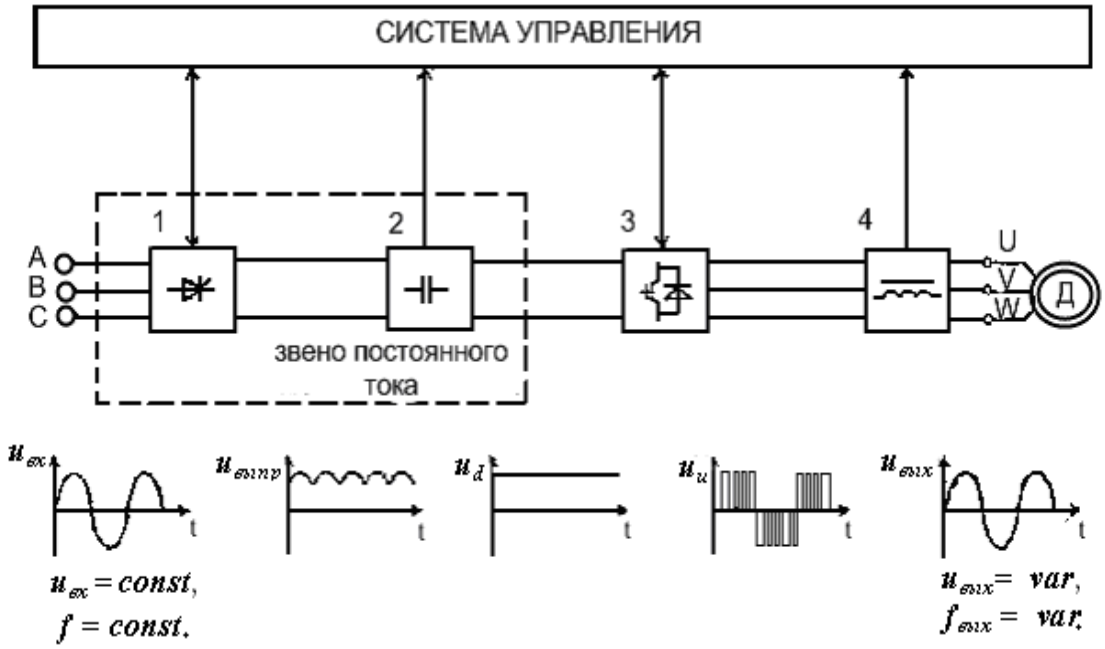


Рисунок 2.26 – Типовая схема преобразователя частоты с явно выраженным звеном постоянного тока

Переменное напряжение питающей сети $u_{вх}$ с постоянной амплитудой и частотой ($u_{вх} = const$, $f = const$) поступает на управляемый или неуправляемый выпрямитель (1).

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения $u_{выпр}$ используется фильтр (2), Выпрямитель и емкостный фильтр (2) образуют звено постоянного тока.

С выхода фильтра постоянное напряжение u_d поступает на вход автономного инвертора (3).

На рассматриваемом рисунке изображена схема преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения или тока как получившая наибольшее распространение.

В инверторе осуществляется преобразование постоянного напряжения u_d в трехфазное (или однофазное) импульсное напряжение u_u изменяемой амплитуды и частоты. По сигналам системы управления каждая обмотка электрического двигателя подсоединяется через соответствующие силовые транзисторы или тиристоры инвертора к положительному и отрицательному полюсам звена постоянного тока. Длительность подключения каждой обмотки в пределах периода следования импульсов модулируется по синусоидальному закону. Наибольшая ширина импульсов обеспечивается в середине полупериода, а к началу и концу полупериода уменьшается. Таким образом, система управления обеспечивает широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) напряжения, прикладываемого к обмоткам двигателя. Амплитуда и частота напряжения определяются параметрами модулирующей синусоидальной функции. При высокой несущей частоте ШИМ (2 ... 15 кГц) обмотки двигателя вследствие их высокой индуктивности работают как фильтр. Поэтому в них протекают практически синусоидальные токи.

В схемах преобразователей с управляемым выпрямителем (1) изменение амплитуды напряжения u_u может достигаться регулированием величины постоянного напряжения u_d, а изменение частоты – режимом работы инвертора.

При необходимости на выходе автономного инвертора устанавливается фильтр (4) для сглаживания пульсаций тока, (В схемах преобразователей на IGBT в силу низкого уровня высших гармоник в выходном напряжении потребность в фильтре практически отсутствует).

Таким образом, на выходе преобразователя частоты формируется трехфазное (или однофазное) переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды ($u_{вых} = var$, $f_{вых} = var$).

В преобразователях этого класса используется двойное преобразование электрической энергии: входное синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой и частотой выпрямляется в выпрямителе (В), фильтруется фильтром (Ф), сглаживается, а затем вновь преобразуется, инвертором (И) в переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды. Двойное преобразование энергии приводит к снижению к.п.д. и к некоторому ухудшению массогабаритных показателей по отношению к преобразователям с непосредственной связью.

2.4.4 В качестве электронных ключей в инверторах применяются запираемые тиристоры GTO и их усовершенствованные модификации GCT, IGCT, SGCT, и биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT.

Главным достоинством тиристорных преобразователей частоты, как и в схеме с непосредственной связью, является способность работать с большими токами и напряжениями, выдерживая при этом продолжительную нагрузку и

импульсные воздействия. Они имеют более высокий КПД (до 98%) по отношению к преобразователям на IGBT транзисторах (95 - 98%).

Преобразователи частоты на тиристорах в настоящее время занимают доминирующее положение в высоковольтном приводе в диапазоне мощностей от сотен киловатт и до десятков мегаватт с выходным напряжением 3-10 кВ и выше. Однако их цена на один кВт выходной мощности самая большая в классе высоковольтных преобразователей. Типичная схема силовой части ПЧ с АИТ на GTO тиристорах приведена на рисунке 2.27.

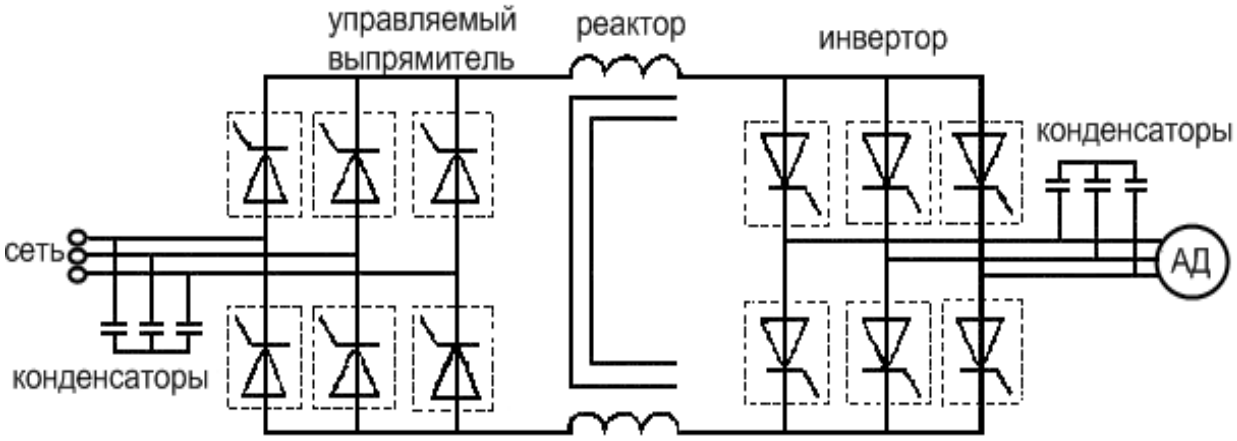


Рисунок 2.27 - Типичная схема силовой части ПЧ с АИТ на GTO тиристорах

До недавнего времени преобразователи частоты на GTO тиристорах составляли основную долю и в низковольтном частотно регулируемом приводе. Но с появлением IGBT транзисторов произошел «естественный отбор» и сегодня преобразователи на их базе общепризнанные лидеры в области низковольтного частотно-регулируемого привода.

Тиристор является полу управляемым прибором: для его включения достаточно подать короткий импульс на управляющий вывод, но для выключения необходимо либо приложить к нему обратное напряжение, либо снизить коммутируемый ток до нуля. Для этого в тиристорном преобразователе частоты требуется сложная и громоздкая система, управления.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT отличают от тиристоров полная управляемость, простая неэнергоемкая система управления, самая высокая рабочая частота. Вследствие этого преобразователи частоты на IGBT транзисторах позволяют расширить диапазон управления скорости вращения двигателя, повысить быстродействие привода в целом.

Для асинхронного электропривода с векторным управлением преобразователи на IGBT позволяют работать на низких скоростях без датчика обратной связи.

Применение IGBT с более высокой частотой переключения в совокупности с микропроцессорной системой управления в преобразователях частоты снижает уровень высших гармоник, характерных для тиристорных

преобразователей. Как следствие меньшие добавочные потери в обмотках и магнитопроводе электродвигателя, уменьшение нагрева электрической машины, снижение пульсаций момента и исключение так называемого «шагания» ротора в области малых частот. Снижаются потери в трансформаторах, конденсаторных батареях, увеличивается их срок службы и изоляции проводок, уменьшаются количество ложных срабатываний устройств защиты и погрешности индукционных измерительных приборов.

Преобразователи на транзисторах IGBT по сравнению с тиристорными преобразователями при одинаковой выходной мощности отличаются меньшими габаритами, массой, повышенной надежностью в силу модульного исполнения электронных ключей, лучшего теплоотвода с поверхности модуля и меньшего количества конструктивных элементов. Они позволяют реализовать более полную защиту от бросков тока, и от перенапряжения, что существенно снижает вероятность отказов и повреждений электропривода

На настоящий момент низковольтные преобразователи на IGBT транзисторах имеют более высокую цену на единицу выходной мощности, вследствие относительной сложности производства транзисторных модулей. Однако по соотношению цена/качество, исходя из перечисленных достоинств, они явно выигрывают у тиристорных преобразователей, кроме того, на протяжении последних лет наблюдается неуклонное снижение цен на IGBT модули. На рисунке 2.28 приведена схема ячейки на IGBT транзисторах.

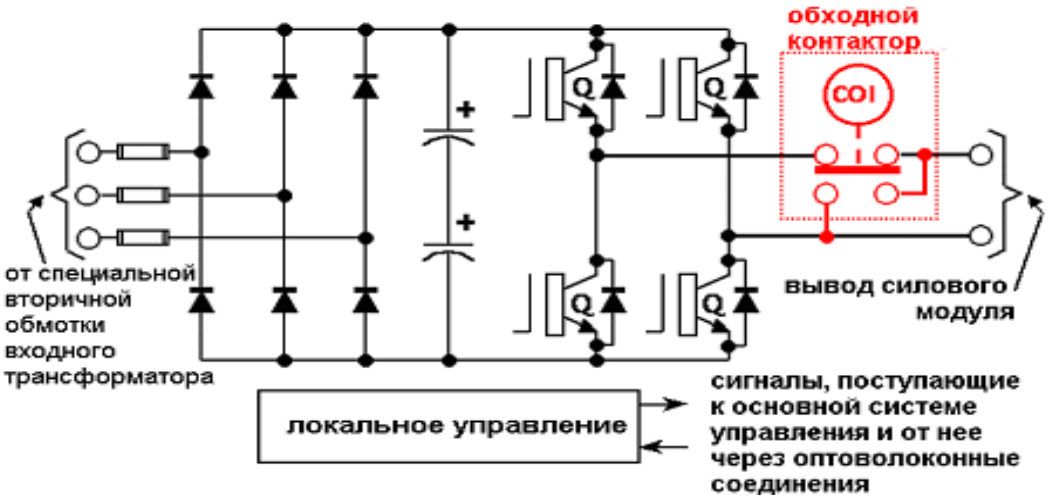


Рисунок 2.28 – Силовая схема ячейки на IGBT транзисторах

Главным препятствием на пути их использования в высоковольтном приводе с прямым преобразованием частоты и при мощностях выше 1 -2 МВт на настоящий момент являются технологические ограничения. Увеличение коммутируемого напряжения и рабочего тока приводит к увеличению размеров транзисторного модуля, а также требует более эффективного отвода тепла от кремниевого кристалла.

Новые технологии производства биполярных транзисторов направлены па преодоление этих ограничений, и перспективность применения IGBT очень

высока также и в высоковольтном приводе. В настоящее время IGBT транзисторы применяются в высоковольтных преобразователях в виде последовательно соединенных нескольких единичных модулей.

В последние годы многие фирмы большое внимание, которое диктуется потребностями рынка, уделяют разработке и созданию высоковольтных частотных преобразователей. Требуемая величина выходного напряжения преобразователя частоты для высоковольтного электропривода достигает 10 кВ и выше при мощности до нескольких десятков мегаватт.

Для таких напряжений и мощностей при прямом преобразовании частоты применяются весьма дорогие тиристорные силовые электронные ключи со сложными схемами управления. Подключение преобразователя к сети осуществляется либо через входной токоограничивающий реактор, либо через согласующий трансформатор.

Предельные напряжение и ток единичного электронного ключа ограничены, поэтому применяют специальные схемные решения для повышения выходного напряжения преобразователя. Кроме того, это позволяет уменьшить общую стоимость высоковольтных преобразователей частоты за счет использования низковольтных электронных ключей.

Таким образом в настоящее время для реализации частотного управления машинами переменного тока применяют различные варианты преобразователей частоты, отличающиеся принципом действия, схемными решениями, алгоритмами управления и т.д. они достаточно глубоко разработаны.

Развитие элементной базы и техники управления, появление новых датчиков, применение микропроцессорного и компьютерного управления обусловливают непрерывное совершенствование системы частотного асинхронного электропривода.

К достоинствам системы ПЧ-АД следует отнести следующее:

- высокий КПД в широком диапазоне регулирования скорости АД, так как последний во всем диапазоне регулирования работает с малой величиной скольжения ротора (малыми потерями скольжения);

- хорошие регулировочные свойства, обеспечивающие возможность плавно регулировать скорость и формировать требуемые характеристики и законы регулирования;

- надежность используемого в системе АД с короткозамкнутым ротором.

Схемные решения силовой части преобразователей, используемых в ПЧ с АИ и ПЧ с ШИМ, достаточно устоявшиеся – это обычно классические трехфазные мостовые схемы. Для уменьшения высших гармоник тока питающей сети и выпрямленного напряжения применяют многофазные схемы выпрямления. Так как значительное увеличение пульсности преобразователей (18-ти, 24-х-пульсные схемы) связано с увеличением их стоимости и конструктивными сложностями, обычно ограничиваются 12-пульсными схемами, получаемыми последовательным или параллельным включением двух 6-пульсных схем.

На рисунке 2.29 приведена схема трехфазного преобразователя частоты с автономным инвертором, содержащего трехфазный мостовой управляемый выпрямитель *1В*, дроссель фильтра *Д1*, конденсатор реактивной энергии C_0 и автономный трехфазный мостовой инвертор напряжения с коммутирующими емкостями. Двигатель, питающийся от этого преобразователя, не может работать в генераторном режиме параллельно с сетью, т.к. выпрямитель *1В* обладает односторонней проводимостью энергии. Для создания возможности генераторного режима необходимо включить встречно – параллельно выпрямителю *1В* зависимый, ведомый сетью инвертор. Выпрямитель *1В* собран на тиристорах *V1-V6*, диодах *V7-V12*, емкостях *C1-C6*. На блок – схеме обозначено: *БУВ* - блок управления выпрямителем, *БУИ* - блок управления инвертором, *УК* - устройство коррекции, *ДН* - датчик напряжения, *ДТ* - датчик тока.

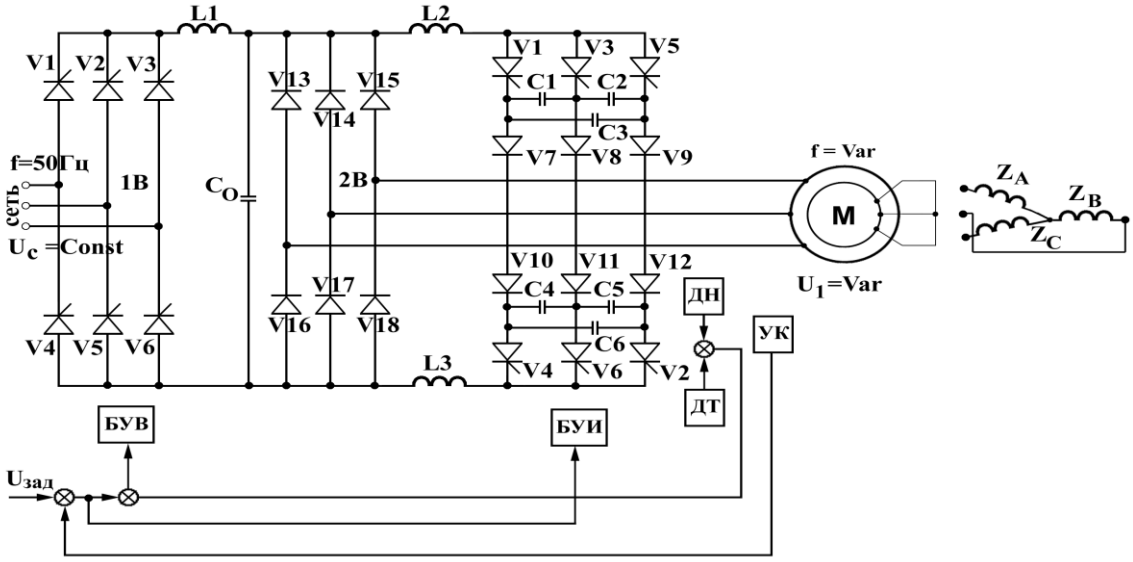


Рисунок 2.29 - Схема трехфазного ПЧ с автономным инвертором

Рассмотрим принцип действия АИ без учета электромагнитных коммутационных процессов, считая тиристоры идеальными ключами (рисунок 2.30).

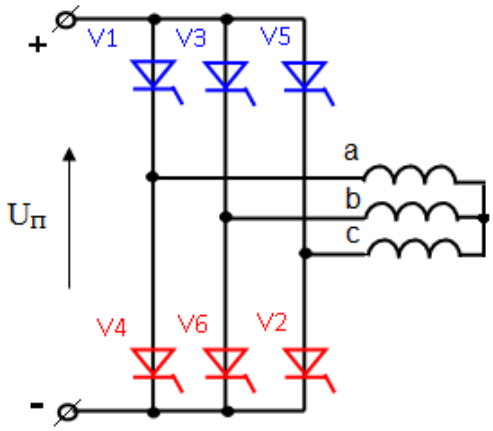


Рисунок 2.30 – Схема автономного инвертора

Для построения алгоритма учитывается, что сдвиг фаз между напряжениями U_a, U_b, U_c составляет $2\pi/3$. На рисунке 2.12. отмечена коммутация соответствующих тиристоров *V1-V6*. На первом интервале (*0-2π/3)* открыты ключи *V1* анодной группы и (поочередно) *V6* и *V2* катодной группы. Ток протекает по цепи «+»→*V1*→фаза «a» (начало) → «0» статора→фаза «b» (фаза «c») →*V6(V2*)→ «-». К фазе «a» статора будет приложено напряжение $U_П/2$. На интервале (2π/3-*π)* открыты ключи *V3* анодной группы и *V2* катодной группы. Ток протекает по цепи «+»→*V3*→фаза «b» (начало) → «0» статора→фаза «c» →*V2*→ «-». К фазе «a» статора напряжение не приложено. На интервале (π-*5π/3)* открыты ключи *V3*, *V5* (поочередно) анодной группы и *V4* катодной группы. Ток протекает по цепи «+»→*V3(V5)*→фаза «b» (фаза «c») → «0» статора→фаза «a» →*V4*→ «-». К фазе «a» статора будет приложено напряжение -$U_П/2$.

Линейное напряжение находится, как $U_{ab}=U_a-U_b$. Полученная форма напряжения (рисунок 2.31) показывает, что напряжение питания в значительной степени отличается от синусоиды. Аналогичное построение для других фаз показывает, что на выходе сформирована трехфазная система напряжений, сдвинутых относительно друг друга на 120 эл. градусов.

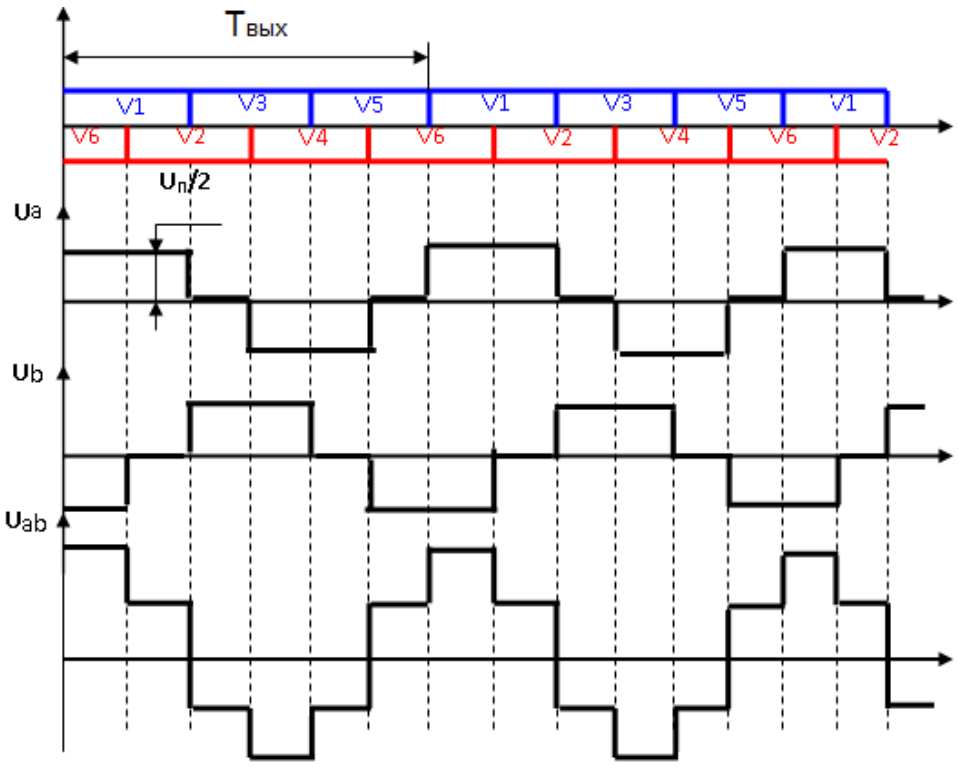


Рисунок 2.31 - Формирование напряжения на выходе автономного инвертора

На рисунке 2.32 представлен однофазный инвертор напряжения с ШИМ. Формирование кривой выходного напряжения иллюстрируется рисунком 2.33.

В качестве примера рассмотрена двухполярная односторонняя ШИМ, когда в виде опорного напряжения используется пилообразное напряжение U_H с высокой частотой ω_H, с которой коммутируются вентили силовых групп.

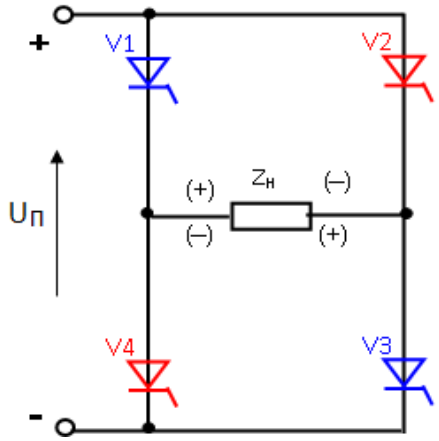


Рисунок 2.32 – Однофазный инвертор напряжения с ШИМ

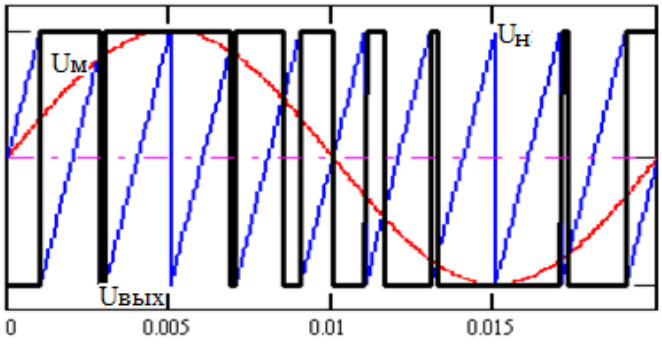


Рисунок 2.33 – Формирование напряжения на выходе инвертора с ШИМ

Длительность импульсов несущей частоты изменяется с каждым периодом в соответствии с формой модулирующего напряжения U_M. Это достигается сравнением опорного напряжения U_H с модулирующим, и переключение вентилей происходит в момент их равенства.

Тогда выходное напряжение описывается логической функцией

$$U_{вых}(t) = \begin{cases} U_П, & if \;\; U_H(t) < U_М(t) \\ -U_П, & if \;\; U_H(t) \geq U_М(t). \end{cases} \qquad (2.21)$$

Выходное напряжение, усредненное за период несущей частоты, можно записать, как

$$U_{вых} = U_П \frac{t_1 - t_2}{T_Н}; \qquad (2.22)$$

где $U_П$ – выпрямленное напряжение на входе инвертора;

t_1, t_2 – время включенного состояния вентильных групп;

$T_H = 2\pi/\omega u_{нес}$ – период опорного напряжения.

При синусоидальной ШИМ, обеспечивающей минимальное содержание высших гармонических в $U_{вых}$,

$$U_{вых} = \mu U_П \sin \omega_{вых} t, \qquad (2.23)$$

где $\mu = U_M/U_{Mmax}$ – относительное значение глубины модуляции;

U_{Mmax} – максимальное напряжение модулирующего напряжения;

$\omega_{вых}$ – частота выходного напряжения.

Таким образом осуществляется регулирование величины и частоты выходного напряжения ПЧ с ШИМ.

3 Электрические микромашины информационного канала электропривода

3.1 Общие сведения и классификация информационных электрических машин

Информационный канал ранее был представлен одним общим блоком и связями его с другими блоками (рисунок 1.1), и этого было достаточно на начальном уровне изучения элементов электропривода. Новые цели вызывают необходимость значительно более детального представления этого канала и введения новых понятий поскольку информационный канал содержит устройства ввода команд оператора, устройства вывода информации о состоянии привода и технологического процесса для контроля и принятия оператором управленческих решений, информационно-измерительной системы (ИИС) со схемами преобразования информации и сопряжения (интерфейса) устройства управления с вышеперечисленными устройствами и силовым каналом.

Устройство управления данной системы на основе информации о значениях задающих воздействий и информации, поступающей с объекта управления (силовой канал электропривода) через ИИС о фактических значениях координат, вырабатывает управляющие воздействия на объект управления. При этом ИИС включает в себя большой класс так называемых информационных электрических машин, которые относятся к датчикам механических переменных на валу двигателя и (или) рабочего органа [4,5].

Основное требование, предъявляемое к информационным электрическим машинам автоматизированного электропривода - высокая точность преобразования электрических или механических входных величин (сигналов управления) соответственно в механические или электрические выходные величины, находящиеся в строго постоянной и вполне определенной функциональной зависимости от входной величины. Например, частота вращения n преобразуется в выходное напряжение $U_{ВЫХ}$, что имеет место тахогенераторах; величина угла поворота α – в значения выходных напряжений, изменяющихся по вполне определенному закону в зависимости от α, что имеет место во вращающихся трансформаторах, сельсинах, магнесинах и т.п.

К информационным электрическим машинам не предъявляется строгих требований в отношении их энергетических показателей (КПД, $cos\ \varphi$), как это имеет место в обычных силовых (энергетических) машинах. Эти требования здесь отступают на второй план, не являясь основными.

Информационные машины весьма разнообразны как по устройству, принципу действия, роду тока, так и по функциям, которые они выполняют в схемах автоматики. Укрупненная классификация информационных электрических машин представлена на рисунке 3.1.

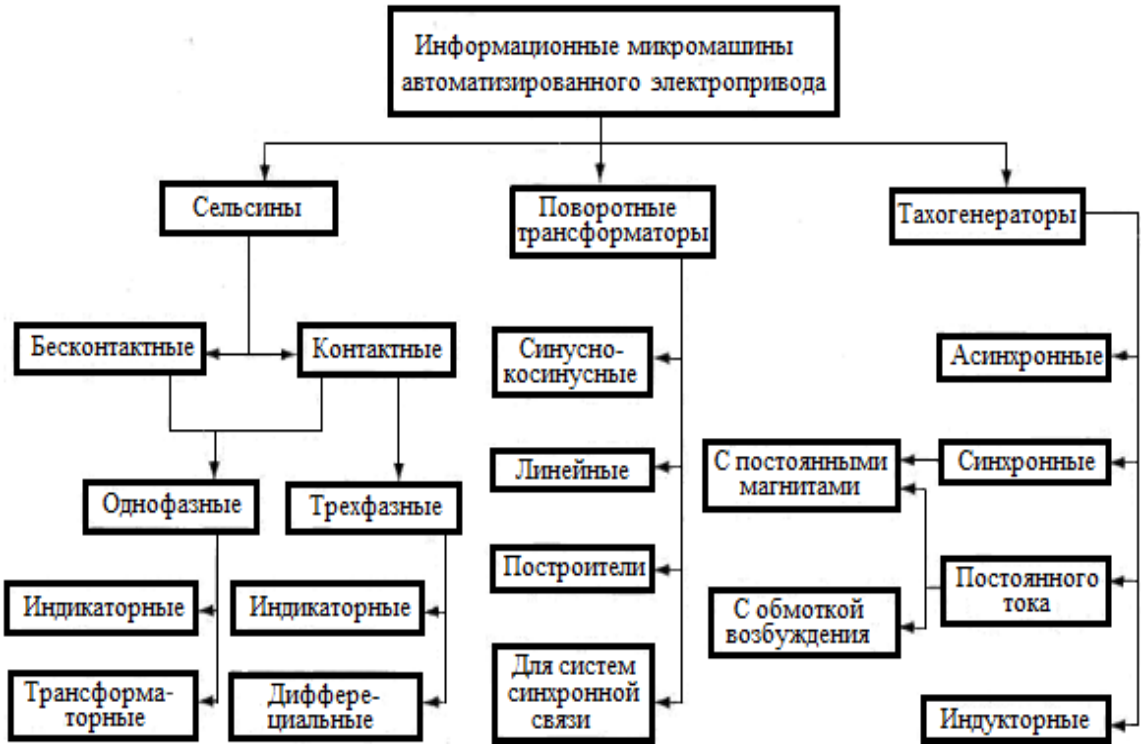


Рисунок 3.1 - Классификация информационных электрических машин

Ниже рассмотрим основные типы информационных электрических микромашин, которые применяются в автоматизированном электроприводе.

3.2 Тахогенераторы. Устройство, принцип действия и выходные характеристики

3.2.1 Наиболее часто регулируемым параметром в электроприводе является угловая частота вращения - ω механического вала, которая преобразуется тахогенератором в выходное напряжение $U_Г$. Поэтому данный класс электромеханических преобразователей представлен наиболее широко.

По роду тока можно различать тахогенераторы переменного и постоянного тока. Тахогенераторы переменного тока могут быть асинхронными и синхронными.

Тахогенераторы постоянного тока могут быть либо с постоянными магнитами, либо с электромагнитным возбуждением (с обмоткой возбуждения).

Тахогенераторы в схемах автоматики используются для следующих целей:

- измерения скорости вращения. В этом случае выходное напряжение подается на вольтметр, шкала которого отградуирована об/мин;
- осуществления обратной связи по скорости в следящих системах и системах регулирования скорости;
- осуществления электрического дифференцирования;
- осуществления электрического интегрирования.

Основные требования, предъявляемые к тахогенераторам:

- высокая линейность выходной характеристики - минимальное отклонение ее от прямой $U_Г = k\omega$, являющейся идеальной выходной характеристикой тахогенератора;

- большая крутизна выходной характеристики $k = U_Г/\omega$, мВ/(об/мин);

- симметрия выходного напряжения: $U_Г(+\omega) = U_Г(-\omega)$;

- минимальное значение нулевого напряжения $U_Г$ при $\omega = 0$ (у тахогенераторов переменного тока) и минимальная зона нечувствительности (у тахогенераторов постоянного тока);

- максимальная выходная мощность при минимальной потребляемой мощности;

- минимальная пульсация выходного напряжения (у тахогенераторов постоянного тока);

- минимальное изменение фазы выходного напряжения (у тахогенераторов переменного тока);

- малый момент инерции ротора и малый момент сопротивления; стабильность выходной характеристики при изменении окружающих условий;

- малые габаритные размеры и масса;

- высокие показатели надежности (ресурс, интенсивность отказов и др.).

В зависимости от цели применения к тахогенераторам могут предъявляться различные требования.

Так, к тахогенераторам, обеспечивающим обратную связь по скорости и демпфирование следящих систем, предъявляются повышенные требования по крутизне выходной характеристики и мощности выходного сигнала. Линейность выходной характеристики для них не играет существенной роли.

К тахогенераторам, предназначенным для выполнения операций дифференцирования и интегрирования, наоборот, предъявляются повышенные требования в отношении линейности, точности, стабильности характеристик, в то время как значение мощности выходного сигнала и крутизна выходной характеристики здесь не являются определяющими факторами. Рассмотрим работу тахогенераторов в качестве дифференцирующих и интегрирующих элементов.

Для дифференцирования какой-либо функции необходимо вращать ротор тахогенератора – поворачивать его на углы α, пропорциональные данной функции. Выходное напряжение при этом будет прямо пропорционально производной заданной функции:

$$U_{\text{г}} = k_1(^{d\alpha}/_{dt}).$$

В тех случаях, когда производная заданной функции должна быть представлена в виде угловой величины, необходимо использовать специальную схему (рисунок 3.2, *а*), состоящую из асинхронного тахогенератора (АТ), исполнительного двигателя (ИД), редуктора (Р),

линейного поворотного трансформатора (ЛПТ). Частота вращения ЛПТ пропорциональна производной *dα/dt.*

Для интегрирования заданной функции по времени (рисунок 3.2, *б*) нужно преобразовывать ее в электрическое напряжение *U(t)* и вращать ротор тахогенератора так, чтобы его выходное напряжение $U_Г(t)$ в любой момент времени компенсировало напряжение *U(t).* Тогда угол поворота ротора тахогенератора будет пропорционален интегралу заданной функции по времени:

$$\alpha = \frac{1}{k}\int U(t)dt \approx \int \beta dt.$$

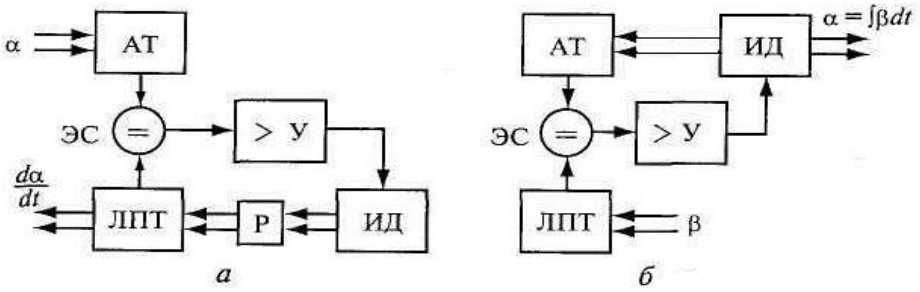


Рисунок 3.2 – Схемы использования тахогенератора для дифференцирования (а) и интегрирования (б) функций

3.2.2 Асинхронный тахогенератор с полым ротором. Наиболее часто применяемым в настоящее время в автоматических схемах тахогенератором переменного тока является асинхронный тахогенератор с полым ротором. По своим свойствам он практически удовлетворяет всем требованиям, и может быть доведен до высокой точности. Его существенным достоинством является, кроме того, независимость частоты выходного напряжения от скорости вращения ротора.

Принципиальная схема асинхронного тахогенератора показана на рисунке 3.3. К одной из статорных обмоток (в данном случае к *У*) подводится постоянное напряжение по амплитуде и частоте напряжение $U_у$. Вторая обмотка (в данном случае В) замкнута на внешнее нагрузочное сопротивление $Z_Н$. Как будет показано ниже, выходное напряжение U изменяется по величине вместе со скоростью вращения ротора, сохраняя постоянной частоту, равную частоте $U_у$, т.е. частоте сети, питающей обмотку У.

На рисунке 3.4 показана несколько преобразованная по сравнению с рисунком 3.3 схема тахогенератора преобразование заключается в том, что мы заменяем действительную обмотку ротора обмоткой с коллектором и двумя парами щеток: *dd* и *qq*, расположенными по осям статорных обмоток У и В. Между щетками каждой пары включена, разумеется, вся обмотка ротора, но для удобства рассмотрения можно представить себе ротор состоящим всего из двух катушек, присоединенных каждая к одной паре щеток: *dd* или *qq.* Очевидно, что при неподвижных щетках присоединенные к ним катушки также

неподвижны, хотя образующие их проводники вращаются вместе с ротором, и, таким образам, в разные моменты времени катушка состоит из различных проводников. Физически, конечно, никаких щеток на роторе асинхронного тахогенератора нет, и они служат лишь в качестве координатных осей. Будем называть обмотку (катушку), присоединенную к щеткам *dd*, продольной, а обмотку (катушку), присоединенную к щеткам *qq*, - поперечной.

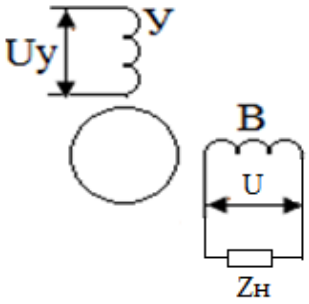


Рисунок 3.3 – Схема асинхронного тахогенератора

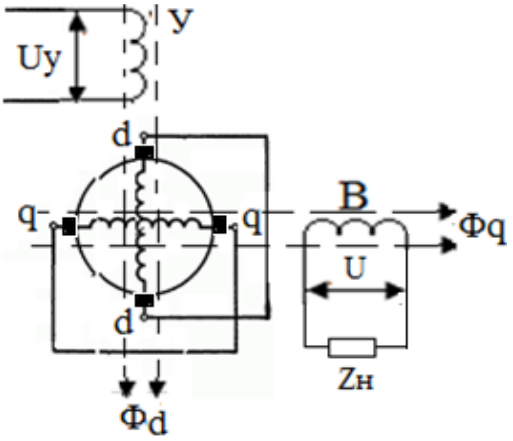


Рисунок 3.4 – Преобразованная схема асинхронного тахогенератора

Допустим, что к статорной обмотке У подведено напряжение U_y и ротор неподвижен. Тогда созданный намагничивающей силой (н.с.) обмотки У магнитный поток пронизывает ротор в вертикальном направлении и индуктирует э. д. с. только в той его обмотке, ось которой совпадает с осью статорной фазы У, т.е. в продольной обмотке, присоединенной к щеткам *dd.* Эта э. д. с. носит тот же характер, что и э. д. с., наводимая пульсациями магнитного потока во вторичной обмотке трансформатора, и может быть поэтому названа трансформаторной э. д. с. или э. д. с. пульсации. Так как продольная обмотка замкнута щетками *dd* накоторотко, то по ней будет проходить ток, н. с. которого вызовет поток, направленный против потока статорной обмотки У. Геометрическая сумма н. с. статорной обмотки У и продольной обмотки ротора создаст результирующий продольный магнитный поток машины Φ_d. Наведенная им в продольной обмотке ротора трансформаторная э. д. с. будет иметь эффективное значение

$$E = 4{,}44 k_{wR} w_R f \Phi_d \qquad (3.1)$$

и частоту *f* питающего обмотку *У* напряжения сети U_y. Здесь w_R и k_{wR} – число витков и обмоточный коэффициент обмотки ротора.

Что касается поперечной обмотки, присоединенной к щеткам *qq*, то при неподвижном роторе в ней э. д. с. наводиться не будет, так как ось ее и ось продольного потока Φ_d взаимно перпендикулярны и между ними нет электромагнитной связи. Поэтому же и в статорной обмотке В э. д. с. при неподвижном роторе также равна нулю.

Если привести ротор во вращение, то весь процесс возникновения трансформаторной э. д. с. E_d в продольной обмотке ротора сохранится, так как ось этой обмотки фиксируется неподвижными щетками *dd,* хотя составляющие эту обмотку проводники будут непрерывно сменяться. Так как проводники ротора все же вращаются, то они будут пересекать линии потока Φ_d и в них будет наводиться э. д. с. вращения. Так же, как и в машине постоянного тока или в коллекторном двигателе переменного тока, результирующая э. д. с. вращения может проявиться только между поперечными щетками, так как в витках продольной обмотки э. д. с. вращения при суммировании взаимно уничтожаются. Мгновенное значение э. д. с. вращение между щетками *qq*

$$e_q = l v B_d \sin \omega t = l \frac{\pi D n}{60} B_d \sin \omega t, \tag{3.2}$$

где l – суммарная длина активных частей проводников обмотки, D – диаметр ротора и $B_d sin\omega t$ – мгновенное значение индукции, созданной мгновенным значением продольного потока $\Phi_d sin\omega t$. Так как l и D – постоянные, а индукция пропорциональна потоку, то

$$e_q = an\Phi_d \sin \omega t, \tag{3.3}$$

а ее эффективное значение

$$E_q = \frac{a}{\sqrt{2}} n\Phi_d, \tag{3.4}$$

т. е. величина э. д. с. вращения E_q при постоянстве потока Φ_d определяется скоростью вращения n, а ее частота – частотой потока Φ_d, т.е. частотой сети, и не зависит от скорости вращения.

Так как поперечная катушка ротора замкнута щетками *qq* накоротко, то под действием э. д. с. E_q по ней пойдет ток I_q, н. с. которого создаст поток Φ_q, направленный по оси поперечной катушки и неподвижной в пространстве, поскольку эта ось фиксируется неподвижными щетками *qq.* Величина потока Φ_q, так же как и величина э. д. с. E_q и величина тока I_q, пропорциональна скорости вращения n. Поток Φ_q пульсируя с частотой вызвавшего тока I_q, т.е. с частотой сети, питающей статорную обмотку У, будет сцеплен витками статорной обмотки В и наведет в ней трансформаторную э. д. с. Е той же частоты f, имеющую эффективное значение

$$E = 4{,}44 k_{ws} w_s f \Phi_q. \tag{3.5}$$

Так как здесь

$$4{,}44 k_{ws} w_s f = const, \text{ а } \Phi_q \equiv n,$$

то

$$E = c' n = c\Omega. \tag{3.6}$$

Если замкнуть обмотку В на внешнее нагрузочное сопротивление $Z_н$, то по ней пойдет ток $I_в$, и тогда поток Φ_q будет создаваться геометрической суммой н. с. поперечной обмотки ротора и обмотки В, что скажется на величине коэффициентов «c'» и «c» в выражении (3.6).

3.2.3 Синхронный тахогенератор является простейшим тахогенератором переменного тока, схема конструкции которого представлена на рисунке 3.5.

Внутри статора C_m набранного из листовой электротехнической стали, вращается ротор P_m, представляющий собой дискообразный постоянный магнит с несколькими (в данном случае с четырьмя) полюсами чередующейся полярности. На статоре имеются пазы (на рисунке 3.5 показаны только два паза), в которые заложена обмотка. Концы обмотки выведены на зажимы К. При вращении ротора в статорной обмотке, наводится ЭДС эффективное значение которой пропорционально скорости вращения n и определяемое по выражению

$$E_0 = 4{,}44 k_{обм} w f \Phi_0 = 4{,}44 k_{обм} w \frac{pn}{60} \Phi_0 = c_1 n \tag{3.7}$$

или

$$E_0 = k_T \omega,$$

где $c_1 = 4{,}44 \frac{k_{обм}}{60} wp\Phi_0; k_T = 4{,}44 k_{обм} w \frac{p}{2\pi} \Phi_0$ - передаточный коэффициент тахогенератора, рассматриваемого как усилительное звено с передаточной функцией

$$W(p) = E_0(p)/\omega(p) = k_T .$$

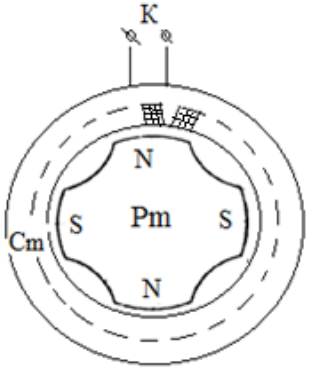


Рисунок 3.5 - Конструкция четырехполюсного синхронного тахогенератора

Таким образом, при холостом ходе тахогенератора выходное напряжение пропорционально его частоте вращения. Однако поскольку частота э. д. с. E является функцией скорости вращения n, то при использовании этой машины в автоматических устройствах возникает затруднение, а именно в нагруженном

тахогенераторе реактивная составляющая (индуктивная и емкостная) и индуктивное сопротивление обмотки самой машины изменяются с изменением частоты, что вызовет переход на другую выходную характеристику. Поэтому выходная характеристика *U = f(n)* синхронного тахогенератора не линейна.

Зависимость частоты выходного напряжения от частоты вращения и нелинейность выходной характеристики снижают точность работы синхронных тахогенераторов. Поэтому, несмотря на простоту устройства и отсутствие скользящих контактов, эти тахогенераторы в автоматических системах применяют редко.

Широкое распространение эта машина получила лишь в качестве индикаторного тахометра для непосредственного измерения скорости вращения различных механизмов. В этом случае тахогенератор работает на вольтметр со специально отградуированной шкалой, непосредственно показывающей число оборотов в минуту (об/мин.).

3.2.4 Выходная характеристика тахогенераторов переменного тока. Преобразование механического вращения в электрический сигнал должно подчиняться закону пропорциональности между скоростью вращения вала тахогенератора и индуктируемой в его выходной обмотке э. д. с. (при условии постоянства магнитного потока) следующим образом

$$E = c\Omega = c\frac{d\alpha}{dt}, \tag{3.8}$$

где Ω – угловая скорость вращения вала, равная первой производной от угла поворота *α*. Уравнение (3.8) определяет так называемую выходную характеристику идиального тахогенератора. Тем самым появляется возможность использовать тахогенератор как для электрического дифференцирования в вычислительных устройствах, так и для получения ускоряющих и замедляющих сигналов, так же являющихся производными по времени от соответствующих обобщенных координат автоматической схемы.

Практически при работе тахогенератора в реальных устройствах по его обмоткам проходит ток, создающий в них падение напряжения и вызывающий электромагнитную реакцию, проявляющуюся в изменении виличины потока, индуктирующего э.д.с. Е, по сравнению с потоком холостого хода. Под влиянием этих факторов изменяется, во-первых, величина входящего в уравнение (3.8) масштабного коэффициента *«с»* и, во-вторых, поскольку условие постоянства магнитного потока не соблюдается, коэффициент «с» перестает быть постоянным и в результате выходная характеристика теряет линейный характер зависимости Е от Ω. Очевидно, оба эти явления будут проявляться тем сильнее, чем больше ток, проходящий по выходной обмотки тахогенератора, т.е. чем меньше величина внешнего нагрузочного сопротивления и чем выше скорость вращения.

Если выходная обмотка помещается на вращающейся части машины, то между ней и внешней цепью приходится устраивать скользящий контакт

(кольца или коллектор и щетки), который так же может явиться источником погрешностей тахогенератора.

Наконец существенное влияние на точность выходной характеристики нагруженного тахогенератора, т.е. зависимости

$$U = f(\Omega)$$

при постоянной вешней нагрузке, может оказывать изменение сопротивления обмоток под влиянием нагревания машины.

В тахогенераторах переменного тока указанные погрешности выходной характеристики дополняются еще и фазовыми погрешностями, заключающимися в том, что фаза вектора выходного напряжения при изменении режима работы также более или менее изменяется.

Уменьшение погрешности тахогенератора связанно с рядом трудностей как расчетного, так и технологического порядка. Если машина предназначена лишь для создания ускоряющих и замедляющих сигналов, то можно вполне удовлетвориться отклонением выходной характеристики от линейности, составляющим до 2- 4%, и достигнуть такой точности сравнительно нетрудно. При работе же в качестве дифференцирующего звена в вычислительных устройствах требования, предъявляемые к точности, во много раз повышаются и нередко отклонение от линейности допускается лишь в приделах десятых и даже сотых долей процента.

В настоящее время можно построить тахогенератор переменного тока, у которого при надлежащих параметрах конструкции и тщательной технологии изготовления отклонение от линейности (амплитудная погрешность) составляет 0,01%, а фазовая погрешность не превышает 0,01°, т.е. 36″. В обычных схемах вычислительных устройств можно удовлетвориться ошибкой 0,3- 0,4% по амплитуде и 0,5- 1,0° по фазе.

Помимо основного требования возможной линейности выходной характеристики и возможного постоянства фазы выходного напряжения, к тахогенераторам предъявляются и другие требования, главнейшими из которых являются:

а) отсутствие радиопомех;

б) бесшумность работы;

в) простота устройства;

г) эксплуатационная надежность;

д) быстодействие (малая электромеханическая постоянная времени);

е) малые размеры и вес.

3.2.5 Тахогенераторы постоянного тока. Наряду с тахогенераторами переменного тока широкое распространение получили и машины постоянного тока. Несмотря на более сложную конструкцию, наличие скользящего контакта между коллектором и щетками, более высокую стоимость, необходимость устройства защитных фильтров от радиопомех и т. д., применение тахогенераторов постоянного тока оправдывается прежде всего там, где

требуется полное отсутствие фазовой погрешности. Кроме того, здесь, очевидно, не существует нагрузок различного характера (активной, индуктивной, емкостной), отражающихся на величине выходного напряжения и форме выходной характеристики.

Генератор с постоянными магнитами показан в разобранном виде на рисунке 3.6. Слева находится якорь с обмоткой и коллектором, посередине – корпус, внутри которого видны постоянные магниты в виде выступающих полюсов, и справа – подшипниковый щит с укрепленными на нем щеткодержателями и щетками.

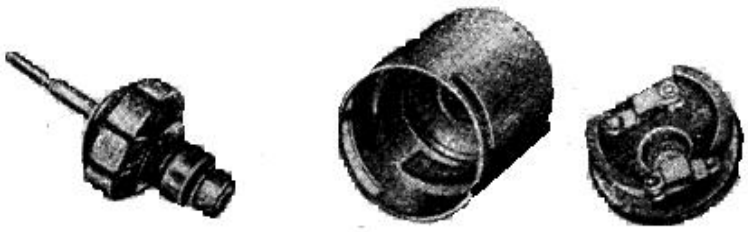


Рисунок 3.6 – Детали тахогенератора постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов

Существует два типа тахогенераторов постоянного тока: с возбуждением от постоянных магнитов и с электромагнитным возбуждением от независимого источника постоянного тока.

Существенными достоинствами тахогенератора с постоянными магнитами являются отсутствие необходимости иметь источник энергии для возбуждения и малое влияние нагрева. Изменение с течением времени магнитных свойств постоянных магнитов может быть компенсировано при помощи специальных магнитных шунтов (тонких перемычек между полюсами). Впрочем, современные магнитные сплавы типов альнико, магнико и др. обладают весьма высокой стабильностью магнитных свойств в течение длительного времени.

В тахогенераторах с электромагнитным независимым возбуждением значительное влияние на величину выходного напряжения оказывают колебания напряжения питающей обмотку полюсов сети, так как при этом теряется постоянство потока возбуждения. Однако в некоторых случаях это свойство может оказаться и положительным, если в нагрузочной цепи тахогенератора имеются элементы, масштабный коэффициент которых так же и в такой же мере изменяется под влиянием колебаний возбуждающего напряжения.

3.2.6 Выходная характеристика тахогенераторов постоянного тока. Электродвижущие силы якоря (входная э. д. с.), так же, как и у тахогенератора переменного тока, пропорциональна при постоянном потоке возбуждения скорости вращения:

$$E_0 = c' n = c\Omega. \tag{3.9}$$

Эта линейная зависимость показана на рисунке 3.6 (для $R_н = \infty$). При нагрузке машины на внешнее сопротивление напряжение на зажимах, если поток сохранил прежнюю величину, уменьшится на величину падения напряжения и будет равно:

$$U = E_0 - Ir_a, \tag{3.10}$$

где I – ток нагрузки, а r_a – сопротивление цепи якоря, включающее сопротивление переходного контакта между коллектором и щетками.

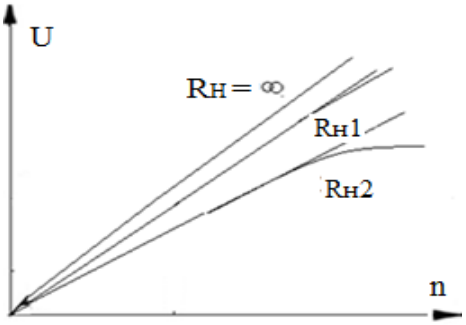


Рисунок 3.7 – Выходные характеристики тахогенератора

Так как

$$I = \frac{U}{R_н},$$

где $R_н$ – сопротивление внешней нагрузки, то

$$U = E_0 - U\frac{r_a}{R_н},$$

откуда

$$U = \frac{E_0}{1+\frac{r_a}{R_н}} = \frac{c'}{1+\frac{r_a}{R_н}}n. \tag{3.11}$$

При постоянстве r_a и $R_н$

$$U = c''n, \tag{3.12}$$

где новый масштабный коэффициент

$$c'' = \frac{c'}{1+\frac{r_a}{Rн}} = c'\frac{R_н}{R_н + ra} \tag{3.13}$$

тем больше, чем больше внешнее нагрузочное сопротивление.

3.3 Поворотные трансформаторы. Устройство, принцип действия и назначение

3.3.1 Вращающиеся или поворотные трансформаторы – это индукционные электрические машины переменного тока, предназначенные для преобразования угла поворота ротора в напряжение, амплитуда которого связана с углом определённой функциональной зависимостью.

Поворотные трансформаторы применяются в автоматических устройствах для получения на выходе напряжений, пропорциональных некоторым функциям угла поворота ротора α, например, sin α или cos α, или самому углу α. В некоторых случаях поворотные трансформаторы применяются в качестве так называемых построителей для решения тригонометрических задач (определение гипотенузы прямоугольного треугольника по двум его катетам). Для всех этих целей может быть использована одна и та же машина путем различных способов включения ее обмоток.

Конструктивно поворотный трансформатор выполняется так же, как асинхронный двигатель с фазным ротором. Статор и ротор набраны из листовой электротехнической стали и имеют пазы, в которые заложены обмотки. Воздушный зазор между статором и ротором имеет постоянную величину. Концы статорных обмоток непосредственно присоединены к неподвижным зажимам, а концы роторных обмоток выведены на контактные кольца, к которым прижимаются металлические щетки, соединенные с неподвижными зажимами. Иногда, имея в виду, что угол поворота ротора ограничен, концы роторных обмоток соединяют с зажимами так же непосредственно при помощи гибких проводников.

Как правило, на статоре и роторе размещено по две обмотки, сдвинутые между собой на угол 90 *эл. град.* Пространственное размещение обмоток показано на рисунке 3.8. Здесь S_1 - S_2 – главная статорная обмотка; $К_1$ – $К_2$ – вспомогательная статорная обмотка; $А_1$ – $А_2$ и $В_1$ – $В_2$ – синусная и косинусная обмотки ротора (смысл этих названий выяснится в дальнейшем). Обычно обе статорные обмотки (S и К) выполняются одинаковыми, т.е. с одним и тем же числом витков, одним и тем же сечением обмоточного провода, одной и той же схемой соединения секции. Точно так же обычно одинаковыми выполняются и обе роторные обмотки.

Ротор может поворачиваться при помощи точного редукторного механизма на произвольный угол α относительно статора. Условимся в дальнейшем отсчитывать угол α от оси статорной обмотки К (или от перпендикуляра к оси статорной обмотки S) до оси синусной роторной обмотки А.

Для уменьшения числа выводных зажимов с 8 до 6 иногда применяют одностороннее соединение статорных обмоток и одностороннее соединение роторных обмоток внутри машины, как показано на рисунке 3.9.

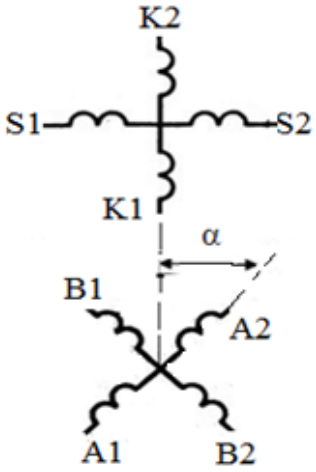


Рисунок 3.8 – Обмотки поворотного трансформатора

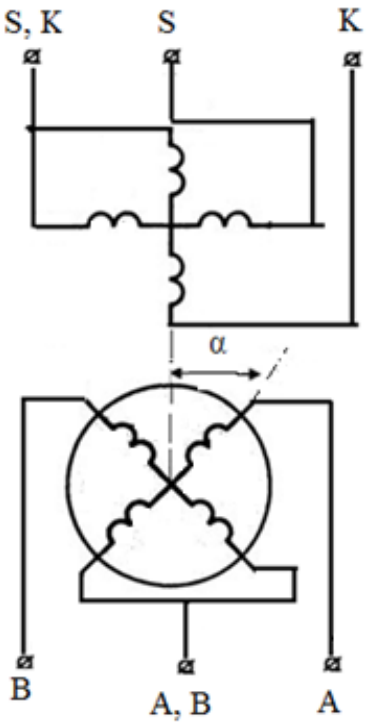
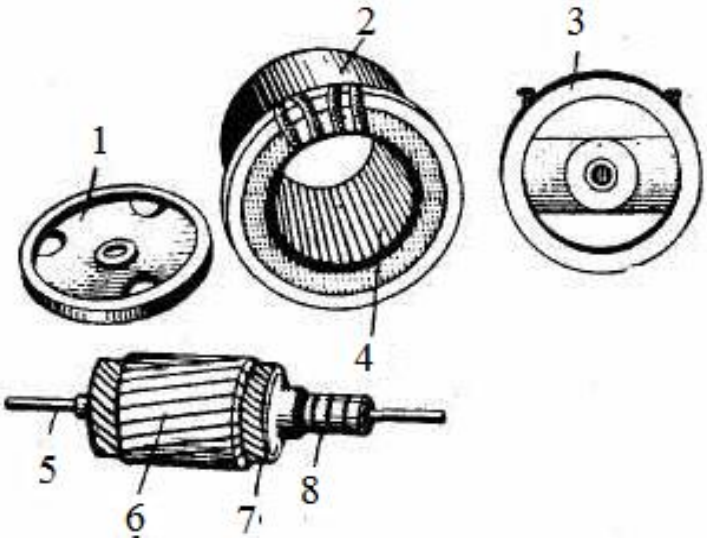


Рисунок 3.9 – Схема соединения обмоток поворотного трансформатора

На рисунке 3.10 показан поворотный трансформатор в разобранном виде.



1 и 3 - подшипниковые щиты; 2 - корпус; 4 - сердечник статора; 5 - вал; 6 - сердечник ротора; 7 - обмотка ротора; 8 - контактные кольца.

Рисунок 3.10 - Детали и узлы поворотного трансформатора

Каково бы ни было назначение поворотного трансформатора, его конструкция должна обеспечивать изменение взаимоиндуктивности между обмотками статора и ротора при поворачивании последнего по закону,

возможно более близкому к идеальной синусоиде. Допускаемые погрешности не должны во многих случаях превосходить 0,05%, т.е. ординаты действительной кривой изменения взаимоимоиндуктивности от угла поворота ротора и любой точке не должны отличаться от ординат идеальной синусоиды более чем на 0,0005 от амплитуды последней. Столь высокие требования могут быть соблюдены лишь при соответствующем выборе типа обмоток, чисел пазов статора и ротора, величины воздушного зазора, материала степени насыщения магнитопровода, а так же при самой тщательной технологии изготовления, обеспечивающей точность штамповки, правильную сборку пакетов, отсутствие эксцентриситета между осью вала и наружной поверхностью ротора и между поверхностями статора и ротора т. д.

Редуктор со шкалами грубого и точного отсчета должен обеспечивать весьма высокую точность измерения угла поворота ротора. Этот редукторный механизм либо встраивают в корпус машины, либо изготавливают в виде самостоятельного узла, сочленяемого затем жестко с валом поворотного трансформатора.

3.3.2 Синусный поворотный трансформатор. Допустим, что главная статорная, обмотка S присоединена к источнику переменного тока с эффективным напряжением U_S постоянной величины. Роторная обмотка *A* питает внешнюю нагрузку, характеризуемую сопротивлением $Z_{нА}$. Вторая статорная обмотка *K* и вторая роторная обмотка B разомкнуты. Тогда схема подобного поворотного трансформатора может быть представлена на рисунке 3.11, на котором обмотки *K* и *B* отсутствуют, как не принимающие никакого участия в работе.

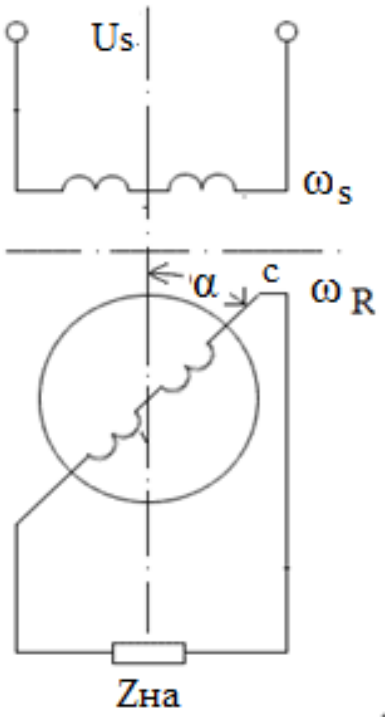


Рисунок 3.11 – Схема синусного поворотного трансформатора

Допустим далее, что выбор типа обмоток, расчет машины, ее конструкция и технологическое выполнение обеспечили строгую синусоидальную зависимость взаимоиндуктивности между обмотками *S* и *A* от угла поворота ротора *α*. Тогда, очевидно,

$$M_{SA} = (M_{SA})_{макс} \sin\alpha, \tag{3.14}$$

где максимальное значение взаимоиндуктивности $(M_{sA})_{макс}$ соответствует углу α = 90°, т. е. совпадению осей обмоток S и A. Так как взаимоиндуктивность пропорциональна произведению чисел витковэлектромагнитно связанных обмоток, то уравнение (3.14) можно заменить уравнением

$$M_{SA} = a w_S w_R \sin\alpha, \tag{3.15}$$

где *a* – коэффициент пропорциональности, w_S – число витков обмотки S и w_R – число витков обмотки A*.

Таким образом, взаимоиндуктивность между обмотками *S* и A при угле поворота ротора α такая же, как если бы оси этих обмоток совпадали, но число витков обмотки A было бы равно не действительной величине w_R, а $w_R sin\ \alpha$. Отсюда следует, что полное число витков обмоток A можно рассматривать (рисунок 3.12) как геометрическую сумму «продольных витков» $w_R sin\ \alpha$, ось которых совпадает с осью обмотки *S*, и «поперечных витков» $w_R cos\ \alpha$, ось которых перпендикулярна оси обмотки *S*. В таком случае схема рисунка 3.12 может быть заменена равноценной ей схемой, представленной на рисунке 3.13.

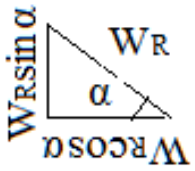


Рисунок 3.12 – Разложение обмотки ротора на продольные и поперечные витки

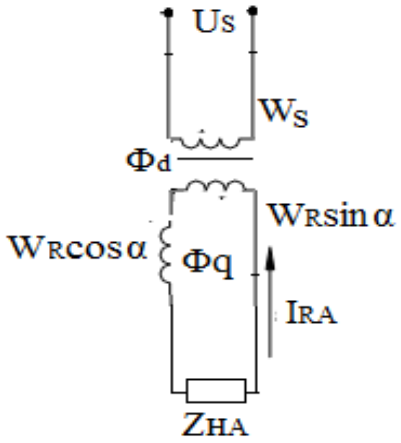


Рисунок 3.13 – Преобразованная схема синусного поворотного трансформатора

Рассмотрим сперва холостой ход поворотного трансформатора, когда роторная обмотка A разомкнута, т. е. $Z_{HA} = \infty$. Так как в этом случае ток по

обмотке А не проходит, то э. Д. С. Ротора E_{RA} будет определяться только потоком взаимоиндукции между обмоткой *S* и продольными витками $w_R \sin\alpha$, т. е. только продольным потоком Φ_d. Тогда

$$\dot{E}_{RA} = (\dot{E}_{RA})_{макс} \sin\alpha, \tag{3.16}$$

где

$$(\dot{E}_{RA})_{макс} = \dot{E}_S \frac{w_R}{w_S} = k\dot{E}_S . \tag{3.17}$$

представляет собой максимальное значение э. д. с., соответствующее углу поворота а = 90° и равное значению э. д. с. статорной обмотки E_S, умноженному на коэффициент трансформации

$$k = \frac{w_R}{w_S}.$$

Следовательно,

$$\dot{E}_{RA} = k\dot{E}_S \sin\alpha. \tag{3.18}$$

Таким образом, машина, работающая по рассматриваемой схеме, представляет собой синусный поворотный трансформатор, у которого при холостом ходе э. д. с. ротора является синусоидальной функцией угла поворота α.

При нагрузке роторной обмотки на сопротивление $Z_{нА}$ по ней проходит ток I_{RA}. Продольный поток Φ_d, создаваемый теперь совместным действием н. с. статорный обмотки *S* и роторных продольных витков $w_R \sin\alpha$, по-прежнему индуктирует в этих витках э. д. с. взаимоиндукции

$$\dot{E}_{RM} = k\dot{E}_S \sin\alpha. \tag{3.19}$$

Проходя по поперечным виткам $w_R \cos\alpha$, ток I_{RA} создает поперечный поток Φ_d, не сцепленный с обмоткой статора S, который индуктирует и этих витках э. д. с. самоиндукции

$$\dot{E}_{RL} = -j\omega L\dot{I}_{RA} . \tag{3.20}$$

Самоиндуктивность

$$L = (w_R \cos\alpha)^2 \Lambda, \tag{3.21}$$

где Λ – магнитная проводимость, не зависящая вследствие равномерности воздушного зазора от угла поворота ротора. Полная э. д. с., индуктируемая в обмотке А, будет представлять собой сумму э. д. с. $\dot{E}_{RM}$ и $\dot{E}_{RL}$, т. е.

$$\dot{E}_{RA} = \dot{E}_{RM} + \dot{E}_{RL} = k\dot{E}_S \sin\alpha - j\omega\dot{I}_{RA}(w_R \cos\alpha)^2 \Lambda. \tag{3.22}$$

Ток ротора

$$\dot{I}_{RA} = \frac{\dot{E}_{RA}}{Z_{нA} + Z_{RA}}, \tag{3.23}$$

где Z_{RA} – собственное сопротивление обмотки А. Тогда

$$\dot{E}_{RA} = k\dot{E}_S \sin\alpha - j\omega \frac{\dot{E}_{RA}}{Z_{нA} + Z_{RA}} w_R^2 \cos^2\alpha\Lambda = k\dot{E}_S \sin\alpha - b\dot{E}_{RA}\cos^2\alpha, \tag{3.24}$$

где постоянный комплексный множитель

$$b = j\frac{\omega w_R^2 \Lambda}{Z_{нA} + Z_{RA}}. \tag{3.25}$$

Из (3.25) находим:

$$\dot{E}_{RA} = \frac{k\dot{E}_S \sin\alpha}{1 + b\cos^2\alpha}. \tag{3.26}$$

Из этого уравнения следует, что при нагрузке синусного поворотного трансформатора происходит искажение синусоидального характера зависимости E_{RA} от угла α, так как во втором члене знаменателя содержится $\cos^2$ α. Физически это искажение обусловлено появлением при нагрузке поперечного потока Φ_q, т.е. поперечной реакцией ротора.

Характер получаемого при этом искажения приведен на рисунке 3.14.

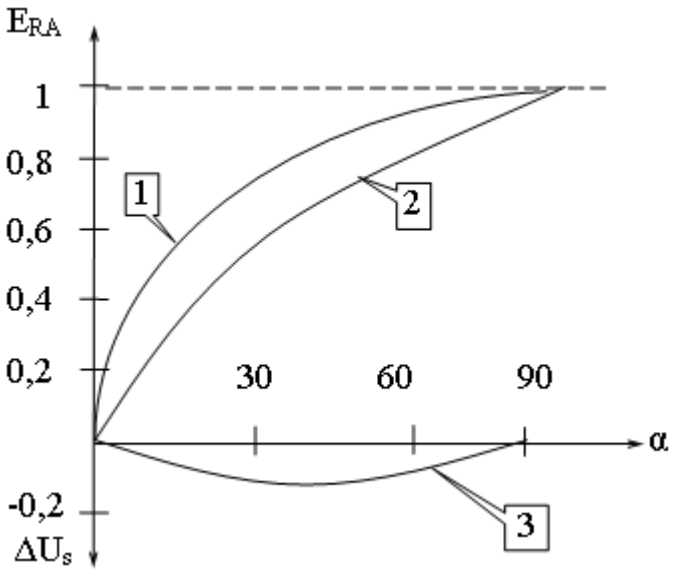


Рисунок 3.14 – Зависимость погрешности синусного поворотного трансформатора от угла поворота ротора

На рисунке 3.14, кривая 1 представляет собой синусоиду э. д. с. холостого хода (если пренебречь изменением продольного потока при нагрузке за счет размагничивающего действия продольных витков ротора), а кривая 2, построенная в том же масштабе по уравнению (3.26), действительную э. д. с. ротора с учетом влияния поперечного поля. Кривая 3 соответствует разности кривых 1 и 2, т.е. является кривой погрешности. Так как величина b в уравнении (3.26) принята при расчете кривой 2 равной 1, то искажение получилось весьма преувеличенным по сравнению с тем, что наблюдается в действительности, когда $b < 1$.

Если разомкнуть (или удалить) роторную обмотку А и нагружать обмотку В, то легко видеть, что взаимоиндуктивность между статорной обмоткой S и роторной В равна

$$M_{SB} = (M_{SB})_{макс} \cos\alpha. \tag{3.27}$$

Тогда при холостом ходе

$$\dot{E}_{RB} = (\dot{E}_{RB})_{макс} \cos\alpha, \tag{3.28}$$

т. е. машина превратилась в косинусный поворотный трансформатор. Повторяя те же рассуждения, что и в предыдущем случае, получим следующее выражение для э. д. с. при нагрузке обмотки В на внешнее сопротивление $Z_{HB.}$

$$\dot{E}_{RB} = \frac{k\dot{E}_S \sin\alpha}{1 + b\cos^2\alpha}. \tag{3.29}$$

т. е. здесь искажение косинусоидальной зависимости обусловлено членом знаменателя, содержащим $\sin^2 \alpha$.

Так как в поворотных трансформаторах выходное напряжение должно строго следовать закону синуса или косинуса угла поворота, то на практике приходится прибегать к так называемому симметрированию, т.е. устранению погрешности от реакции ротора путем компенсации ее, т.е. путем соответствующей нагрузки второй роторной обмотки (вторичное симметрирование) или второй статорной обмотки (первичное симметрирование).

3.3.3 Поворотный трансформатор-построитель. Схема поворотного трансформатора-построителя, показанная на рисунке 3.15, может быть использована для определения гипотенузы (как по величине, так и по углу) прямоугольного треугольника по двум заданным катетам. Здесь обмотки статора S и К присоединяются к одной и той же однофазной сети через потенциометры (или детали напряжения ионного типа с плавным регулированием), позволяющие устанавливать на входе обмоток требуемые величины напряжения Us и Uк. Роторная обмотка включена на прибор, который может быть отградуирован непосредственно в линейных мерах. Вторая роторная обмотка В питает (если нужно, через усилитель) обмотку управлении исполнительного двигателя ИД. Обмотка возбуждения этого

двигателя присоединяются к той же сети, что и статорные обмотки поворотного трансформатора. Роторы исполнительного двигателя и поворотного трансформатора связаны механически через редуктор.

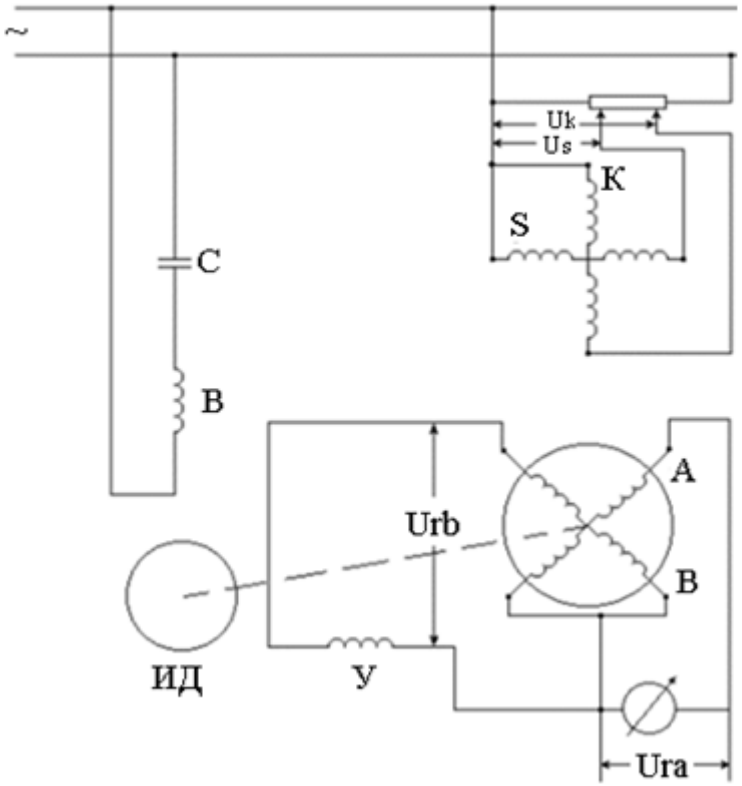


Рисунок 3.15 – Схема поворотного трансформатора-построителя

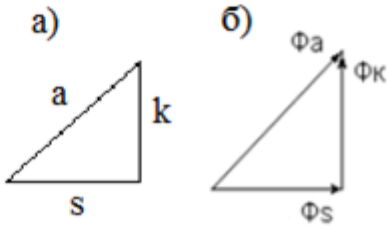


Рисунок 3.16 – К определению гипотенузы треугольника

Работа схемы происходит следующим образом. Пусть заданы катеты s и k прямоугольного треугольника (рисунок 3.16, *а*) и требуется определить его гипотенузу *a*. Если подвести к обмоткам S и K поворотного трансформатора снятые с потенциометров напряжения

$$U_S \equiv S,$$

$$U_K \equiv k,$$

то н. с. этих обмоток $I_S w_S$ и $I_K w_K$ создадут неподвижные в пространстве, пульсирующие по осям обмоток S и K потоки Φ_S и Φ_K (рисунок 3.16, *б*), которые при отсутствии насыщения магнитопровода будут пропорциональны вызвавшим их напряжениям U_S и U_K. В результате геометрического сложения этих потоков возникнет результирующий магнитный поток Φ_A, расположенный в пространстве относительно обмотки S и K под теми же углами, что и гипотенуза *a* исходного прямоугольного треугольника по отношению к катетам s и k. Очевидно также, что величины потоков Φ_S ,Φ_K и Φ_A пропорциональны сторонам s, k и *a* треугольника. Пронизывая обмотки ротора, результирующий магнитный поток Φ_A наведет в них э. д. с. E_{RA} и E_{RB}.

Электродвижущая сила E_{RB} обмотки В создаст на зажимах обмотки управления напряжение U_{RB}, под действием которого ротора исполнительного двигателя придет во вращение и начнет поворачивать ротор поворотного трансформатора. Электродвижущая сила обмотки А создает на зажимах прибора напряжения U_{RA}. При поворачивании ротора напряжения U_{RA} и U_{RB} будут изменяться по величине в зависимости от положения поворачивающихся вместе с ротором осей обмоток А и В. Когда обмотка В займет положение, при котором ее ось будет перпендикулярна оси магнитного потока Φ_A, э. д. с. этой обмотки станет равной нулю и ротор исполнительного двигателя остановится. При этом ось обмотки А совпадет с осью потока $\Phi_{A,}$ и прибор покажет напряжение U_{RA} максимальной возможной величины, которое, очевидно, и будет пропорционально гипотенузе.

3.4 Сельсины. Назначение, устройство, принцип действия и режимы работы

3.4.1 В электроприводе очень часто возникает необходимость синхронизации вращения или поворота различных осей механизмов, находящихся на значительном расстоянии друг от друга и механически между собой не связанных. Эта задача чаще всего решается с помощью электрических систем синхронной связи.

Применяемые в данных системах в качестве датчиков и приемников микромашины получили название сельсинов, характеризующее их основное свойство – способность к самосинхронизации (от первых слогов английских слов self-synchro – nizing).

По идее устройства сельсины представляют собой не что иное, как поворотные трансформаторы, у которых при вращении ротора происходит плавное изменение взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора. Происходящие при этом изменения величины или фазы (или и того, и другого) наведенных в обмотках датчика э. д. с. вызывают соответствующие изменения в приемнике, вследствие чего происходит отработка. Обмотки датчика и приемника, соединенные между собой линией связи, носят название обмоток синхронизации, а обмотки, присоединяемые к питающей сети и предназначенные для создания магнитного потока машины, - обмоток возбуждения.

Индукционные системы синхронной связи, так же, как и применяемые для них сельсины-датчики и сельсины-приемники, можно разделить на две группы: трехфазные и однофазные.

Трехфазные сельсины конструктивно ничем не отличается от обычных асинхронных двигателей, имеющих как на статоре, так и на роторе распределенные трехфазные обмотки. Для возможности присоединения роторной обмотки (являющейся в этом случае обмоткой синхронизации) к линии связи концы ее выведены на контактные кольца, к которым

прижимаются щетки, соединенные с неподвижными зажимами на корпусе машины.

Трехфазные сельсины получили распространение лишь при относительно больших мощностях в так называемых системах «электрического вала», применяемых в тех случаях, когда требуется строго синхронное вращение двух двигателей, удаленных друг от друга (механизм для разводки мостов, бумагоделательные машины, портальные краны т.д.).

У однофазных сельсинов питание обмоток возбуждения происходит от однофазной сети. Обмотки синхронизации в подавляющем большинстве случаев выполняются по типу трехфазных обмоток, т. е. состоят из трех сдвинутых на 120° отдельных обмоток, соединенных в звезду. При этом весьма редко применяются сельсины, у которых обмотка синхронизации выполнена в виде одноосной обмотки.

С точки зрения характеристик системы безразлично, где расположена обмотка возбуждения: на статоре или на роторе, однако это имеет значение с точки зрения эксплуатационных свойств. Если разместить обмотку возбуждения на роторе, то мы получим то преимущество, что число контактных колец сократится до 2, т. е. уменьшится количество слабых в отношении эксплуатационной надежности узлов. Однако при этом через щетки и кольца будет непрерывно проходить ток возбуждения, что может вызвать при длительном нахождении системы в состоянии покоя местные перегревы в местах соприкосновения колец и щеток и привести к пригоранию последних. В то же время если расположить на роторе обмотку синхронизации, то, хотя число колец увеличится до 3, при работе системы в индикаторном режиме ток будет проходить через щетки лишь в то время, пока происходит отработка. Кроме того, при размещении на роторе обмотки синхронизации создадутся лучшие условия для балансировки. Поэтому большинство сельсинов строится с обмоткой возбуждения на статоре.

Обмотка синхронизации выполняется всегда распределенной и укладывается в пазы цилиндрического пакета, набранного из листовой электротехнической стали аналогично роторной обмотке асинхронного двигателя с фазным ротором. Обмотка возбуждения может быть, как распределенной, так и сосредоточенной, т. е. в виде катушек возбуждения явно полюсных машин. Недостаток распределенной обмотки заключается в том, что она дает характеристику момента, обладающую меньшей крутизной в начальной части (при малых углах рассогласования), что в случае индикаторной передачи вызывает увеличенную погрешность. Для устранения этого недостатка необходимо применять дополнительную обмотку, образующую короткозамкнутый контур по поперечной оси машины, что усложняет и удорожает конструкцию. Сельсины с распределенной обмоткой возбуждения (без поперечной обмотки) часто применяются в качестве приемников в системах, работающих в трансформаторном режиме.

Таким образом, нормальным типом однофазного сельсина следует считать машину, имеющую сосредоточенную обмотку возбуждения на статоре

и распределенную обмотку синхронизации на роторе. Для возможности самосинхронизации в пределах одного оборота число полюсов всегда берут равным 2. Поперечный разрез статора и ротора такого сельсина показан на рисунке 3.17. Полюсы имеют полюсные наконечники с углом охвата 120 - 130°. Для приближения формы кривой поля в воздушном зазоре к синусоиде величина воздушного зазора увеличивается по мере удаления от середины полюса. Пазы ротора скошены для ослабления зубцовых гармоник. Для уменьшения переходного сопротивления между кольцами и щетками последние чаще всего выполняются в виде металлических пластинок с серебряными напайками в местах прикосновения к кольцам. Пакет статора также набирается из листовой электротехнической стали.

На рисунке 3.18 показан сельсин в разобранном виде. Здесь слева расположен статор машины, посредине – ротор с кольцами, справа – подшипниковый щит со щеткодержателями.

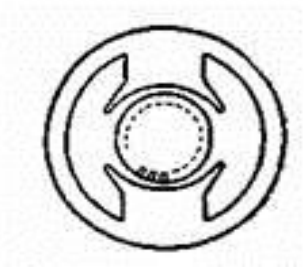


Рисунок 3.17 – Поперечный разрез магнитопровода

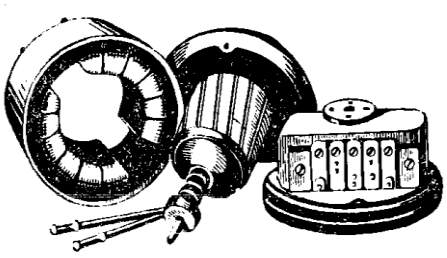


Рисунок 3.18 – Детали контактного сельсина

В тех случаях, когда индикаторная схема или следящий привод должны отрабатывать угол, равный сумме или разности двух задаваемых углов, применяется система синхронной связи, использующая в качестве одного из элементов дифференциальный сельсин.

Дифференциальный сельсин конструктивно аналогичен трехфазному асинхронному двигателю, имеющему на статоре и роторе по три разделенные обмотки, оси которых сдвинуты между собой 120°. Начало обмоток соединены в общую точку, а концы выведены на зажимы, причем роторные обмотки соединены с неподвижными зажимами через контактные кольца и щетки. По числу витков, расположению катушек, числу пазов и параметрам обмотки статора и ротора выполнены одинаково.

3.4.2 Дифференциальные сельсины могут быть использованы в схемах синхронной связи либо как приемники, работающие от двух датчиков, либо как вторые датчики.

На рисунке 3.19 показана индикаторная схема, имеющая два сельсина-датчика обычного типа: СД1 и СД2. Обмотки синхронизации их присоединены к обмоткам статора и ротора дифференциального сельсина ДС, выполняющего роль приемника П, на валу которого помещена уравновешенная стрелка.

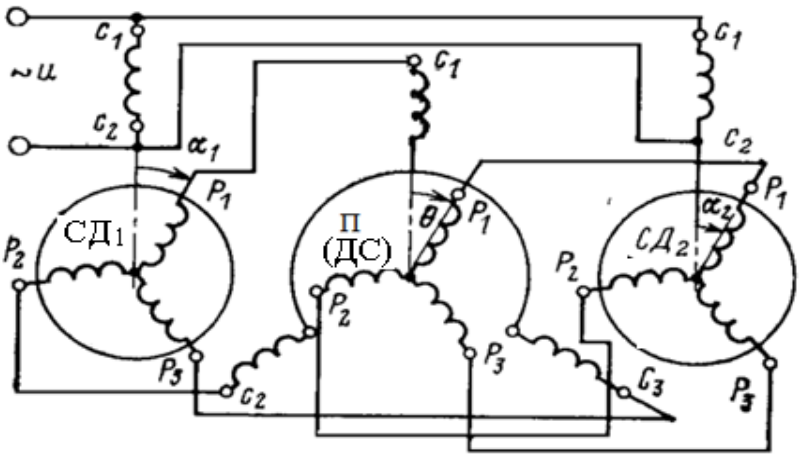


Рисунок 3.19 – Схема индикаторной передачи с дифференциальным сельсином, работающим в качестве приемника от двух датчиков

Если ротор датчика СД2 повернуть на угол α_2 в сторону, противоположную направлению поворота ротора датчика СД1, то магнитные потоки окажутся сдвинутыми на угол $\alpha_2 + \alpha_1$, в результате чего и ротор дифференциального сельсина также повернется на этот же угол.

Таким образом, если ротор сельсина-дифференциала может свободно поворачиваться, то при установке углов α_1 и α_2 на датчиках Д1 и Д2 в зависимости от направления поворота он отработает угол

$$\alpha = \alpha_2 \pm \alpha_1. \tag{3.30}$$

Широкое распространение получили в настоящее время бесконтактные сельсины. Отсутствие скользящих контактов позволяет получить лучшую устойчивость характеристик и длительно сохранить класс точности. Устройство современного бесконтактного сельсина показано схематически на рисунке 3.20.

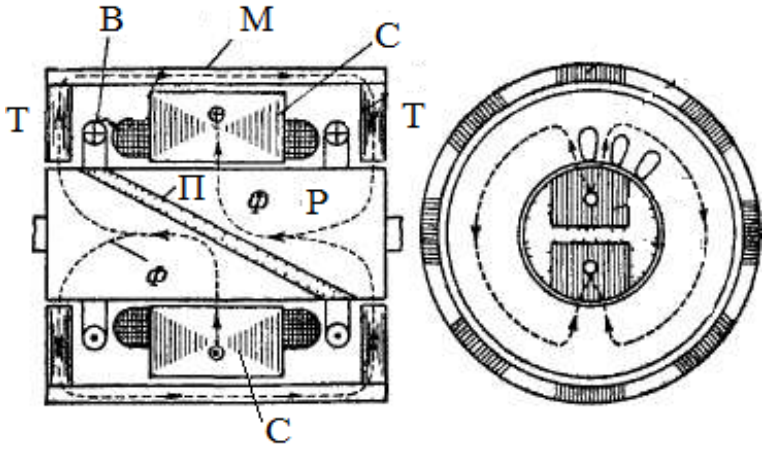


Рисунок 3.20 – Схема устройства бесконтактного сельсина

Ротор Р представляет собой два пакета, набранные из листовой стали, разделенные косым промежутком П из немагнитного материала. Плоскости отдельных листов ротора расположены параллельно оси вала. Оба пакета запрессованы в пластмассу и обработаны в виде цилиндра. Никакой обмотки на роторе нет. Статор машины состоит из основного пакета С и двух боковых колец (тороидов) Т. Пакет и тороиды также набраны из листовой стали, причем плоскости листов, как обычно, перпендикулярны оси вала. На внутренней поверхности основного пакета С выштампованы пазы, в которые уложена распределенная обмотка синхронизации, выполненная по типу трехфазной. На тороидах обмотки нет. К тороидам примыкают пакеты внешнего магнитопровода М, набранные из листовой стали (параллельно оси вала) и залитые в наружный цилиндрический корпус, изготовленный из алюминиевого сплава. Между тороидами и основным статорным пакетом расположены обмотки возбуждения В в виде кольцевых катушек, намотанные из изолированного провода, охватывающие ротор. Как и в случае контактных сельсинов, обмотки возбуждения (соединенные последовательно) присоединяются к однофазной сети, а обмотка синхронизации – к линии связи.

Для выяснения принципа работы бесконтактного сельсина проследим путь магнитного потока, созданного обмотками возбуждения. Пусть в данный момент времени направление тока в обмотках возбуждения будет таким, как показано на рисунке 3.20. Тогда поток будет направлен справа налево. В правой части ротора поток пойдет в аксиальном направлении, но, встретив значительное магнитное сопротивление в виде промежутка *П*, он вынужден будет повернуть вверх, пройти воздушный зазор между ротором и основным статорным пакетом С и затем повернуть за плоскость чертежа (как показано крестиком в кружке). Далее, пройдя по окружности вдоль спинки статора, поток попадает в нижнюю часть статорного пакета (точка в кружке) и через воздушный зазор опять выйдет в ротор, но уже слева от изолирующего промежутка *П*. Затем, пройдя левую часть ротора, поток разделится на две части и через тороиды и внешний магнитопровод *М* вернется в правую часть ротора.

Таким образом, проходя по основному пакету С, поток сцепляется с обмоткой синхронизации. Если поворачивать ротор, то вместе с ним будет поворачиваться и поток, а так как обмотка синхронизации неподвижна, то потокосцепление будет изменяться по такому же закону, как и в контактном сельсине. Поэтому теоретический анализ работы бесконтактного сельсина в системе синхронной связи ничем не отличается от анализа работы контактного сельсина.

3.4.3 Индикаторный режим работы сельсинов. В системах автоматики "передача угла" осуществляется по двум, принципиально разным схемам: индикаторной и трансформаторной.

Индикаторная схема используется там, где на приемной оси небольшой момент статического сопротивления (стрелка, шкала прибора и т.п.). В этих

схемах сельсин-приемник самостоятельно отрабатывает угол, заданный датчиком. Схема индикаторной связи приведена на рисунке 3.21.

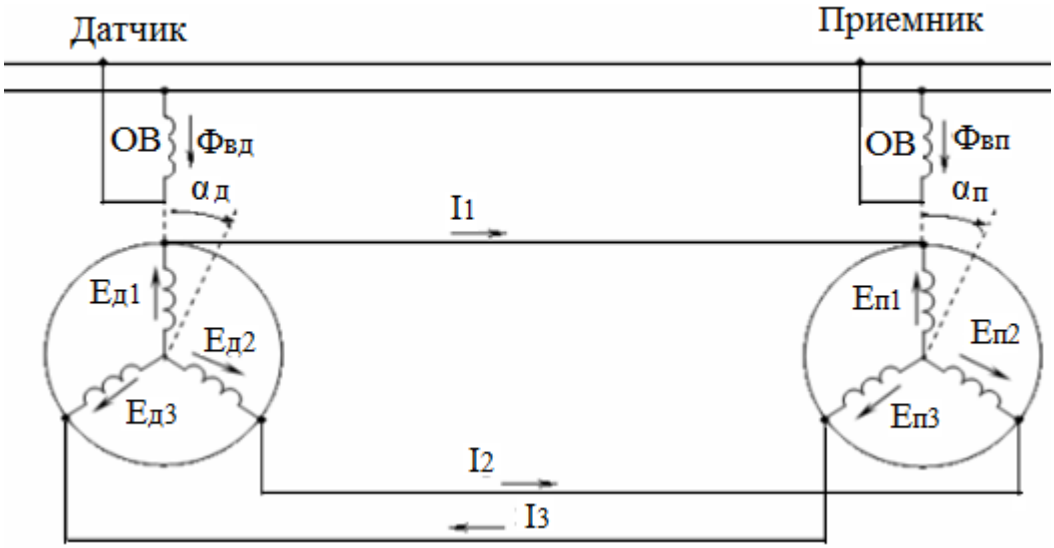


Рисунок 3.21 - Индикаторная схема «передачи угла»

При питании обмоток возбуждения датчика и приемника переменным током возникают пульсирующие потоки возбуждения $\Phi_{вл}$ и $\Phi_{вп}$ которые индуцируют в обмотках синхронизации соответствующие ЭДС в сельсине датчике $E_Д$ и в сельсине приемнике $E_п$. Величина каждой ЭДС зависит от углового положения соответствующей обмотки относительно оси поля возбуждения. Если принять гармонический закон распределения индукции магнитного поля, то:

$$E_{Д1} = E_m \cdot \cos\alpha_Д; \qquad E_{П1} = E_m \cdot \cos\alpha_П;$$

$$E_{Д2} = E_m \cdot \cos(\alpha_Д - 120^0); \quad E_{П2} = E_m \cdot \cos(\alpha_П - 120^0);$$

$$E_{Д3} = E_m \cdot \cos(\alpha_Д - 240^0); \qquad E_{Д3} = E_m \cdot \cos(\alpha_П - 240^0).$$

Здесь E_m - максимальное значение ЭДС, которое получается при соосном положении обмотки синхронизации и обмотки возбуждения.

Если сельсины находятся в согласованном положении, ЭДС одноименных фаз датчика и приемника равны по величине и уравновешивают друг друга, поэтому ток по обмоткам синхронизации протекать не будет. При повороте датчика на угол $\alpha_д$ равенство ЭДС нарушается. По обмоткам синхронизации и линиям связи протекают токи, которые, взаимодействуя с потоками возбуждения, создают моменты, в равной мере действующие на вал датчика и приемника. Поскольку датчик обычно фиксируется, приемник будет поворачиваться в ту же сторону и на такой же угол, ибо только при согласованном положении ЭДС вновь будут уравновешивать друг друга.

Так как одноименные фазы датчика и приемника соединены встречно, то проходящий по ним ток:

$$I_1 = \frac{E_{Д1} - E_{П1}}{2 \cdot Z_Ф}; \quad I_2 = \frac{E_{Д2} - E_{П2}}{2 \cdot Z_Ф}; \quad I_3 = \frac{E_{Д3} - E_{П3}}{2 \cdot Z_Ф},$$

где $Z_ф$ - полное сопротивление обмотки синхронизации одного из сельсинов плюс половина сопротивления линии связи.

Токи, протекая по обмоткам синхронизации, создают намагничивающие силы (НС) отдельных фаз и эти силы складываясь, образуют результирующие НС датчика и приемника. Результирующие НС состоит из продольной составляющей $F_{dп}$, направлена навстречу потоку возбуждения и пытается размагнитить сельсин поперечной составляющей $P_{qп}$, взаимодействуя с потоком обмотки возбуждения $Ф_{вп}$, создает вращающий синхронизирующий момент.

$$M_{СТ} = M_m \cdot \sin\theta \qquad (3.31)$$

где M_m - максимальный синхронизирующий момент;

θ - угол рассогласования между углами поворотов $\alpha_д$ и $\alpha_п$.

Формула (3.31) показывает гармоническую зависимость момента синхронизации от угла рассогласования и, казалось бы, что сельсин имеет два устойчивых положения: при $\theta = 0^o$ и $\theta = 180^o$. Однако положение при $\theta = 180^0$ - положение неустойчивого равновесия. Достаточно малейшего возмущения, чтобы сельсин из положения $\theta = 180^o$ перешел в положение $\theta = 0^0$.

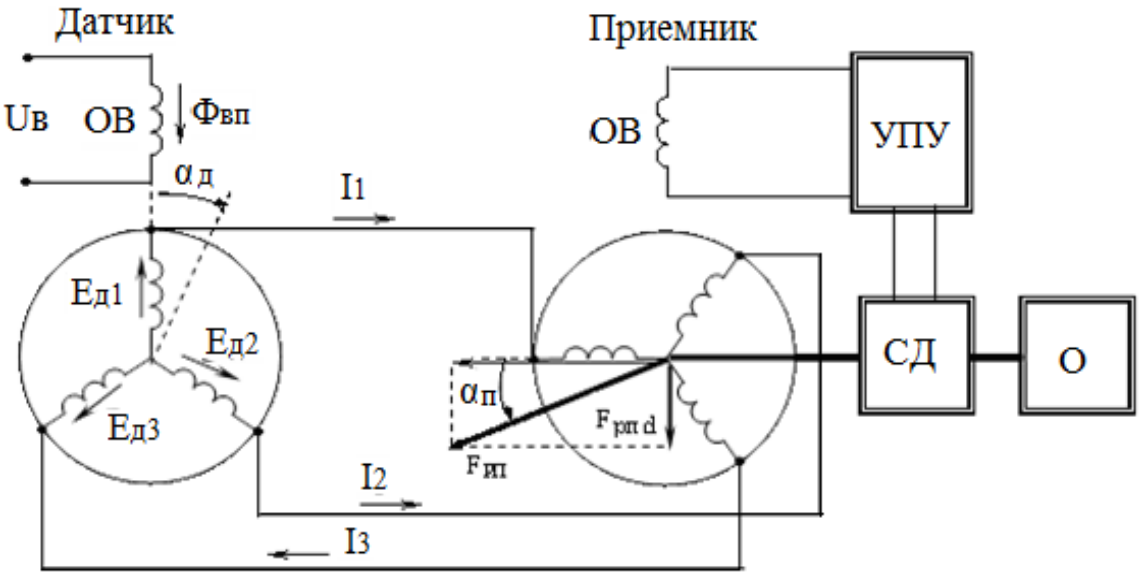
3.4.4 Трансформаторный режим работы сельсинов. Трансформаторная схема применяется в тех случаях, когда на приемной оси имеется значительный момент сопротивления. В таких схемах сельсин-приемник лишь управляет мощным силовым двигателем, осуществляющим поворот какого-то механизма.

Простейшая схема работы сельсинов в трансформаторном режиме показана рисунке 3.22. Однофазная обмотка возбуждения сельсина-датчика создает пульсирующий магнитный поток $Ф_{вд}$, который индуцирует в обмотках синхронизации *ЭДС*:

$$E_{Д1} = E_m \cos\alpha_Д; \quad E_{Д2} = E_m \cos(\alpha_Д - 120^0); \quad E_{Д3} = E_m \cos(\alpha_Д - 240^0).$$

Под действием ЭДС по фазным обмоткам синхронизации и линиям связи протекают токи, которые определяют выражением $I_ф = E_ф / 2Z_ф$. Здесь индекс "$ф$" означает ток фазы, ЭДС и полное сопротивление фазы ротора плюс половину сопротивления линии. Токи, протекая по фазам приемника, создают результирующую намагничивающую силу НС приемника $F_{рп}$. Ее пространственное положение зависит от положения обмоток синхронизации датчика и приемника относительно своих обмоток возбуждения.

За исходное принимается такое положение, при котором эта НС будет перпендикулярна обмотке возбуждения приемника.



УПУ - усилительно-преобразовательной устройство; СД - силовой двигатель; О - объект управления.

Рисунок 3.22 - Трансформаторная схема "передачи угла"

При повороте датчика на какой-то угол $\alpha_д$ на такой же угол, но в обратную сторону повернется результирующая НС приемника. Продольная составляющая этой НС $F_{рпd}$ наведет в обмотке возбуждения приемника ЭДС, которая через усилительно-преобразовательное устройство (УПУ) будет воздействовать на силовой двигатель (СД). Тот придет во вращение и начнет поворачивать объект управления (О), а вместе с ним и ротор сельсина-приемника до тех пор, пока результирующая НС $F_{рп}$ не повернется на заданный угол, т.е. снова не станет перпендикулярной оси обмотки возбуждения приемника, ибо только в этом положении в ней не будет ЭДС и двигатель перестанет вращаться.

Таким образом, результирующая НС обмоток синхронизации сельсина-приемника не зависит от угла рассогласования и всегда в 1,5 раза превышает амплитуду НС одной фазы.

Намагничивающая сила F_d создает магнитный поток Φ_d, который наводит в обмотке возбуждения датчика ЭДС

$$E_{Вых} = 4{,}44 f w_B \Phi_d = 4{,}44 f w_B \Phi_d \sin\theta = E_m \sin\theta \qquad (3.32)$$

т.е. выходная ЭДС является гармонической функцией угла рассогласования датчика и приемника.

Точность трансформаторных сельсинов-приемников определяется так же, как и точность индикаторных сельсинов-датчиков, т.е. ошибкой

асимметрии, в зависимости от которой трансформаторные сельсины-приемники делятся на семь классов точности. Качество работы трансформаторной схемы зависит: от удельного выходного напряжения - U_y; остаточного выходного напряжения - U_O; удельной выходной мощности - P_y.

Удельное выходное напряжение - напряжение при угле $\theta = 1^0$,определяет чувствительность всей системы.

Остаточное напряжение U_O - напряжение на обмотке возбуждения при отсутствии угла рассогласования. Оно обуславливается магнитной связью результирующей НС приемника и перпендикулярной ей обмоткой возбуждения, которая возникает вследствие погрешностей изготовления, наличия потоков рассеяния и других причин, главным образом технологического характера. Обычно U_O - 0,2 – 0,5 В.

Удельная выходная мощность - мощность при $\theta = 1$. Чем выше этот показатель, тем раньше начинает работать усилитель, тем выше становиться чувствительность системы.

3.5 Магнесины. Назначение, устройство и принцип действия

В тех случаях, когда возникает необходимость в передаче угла на небольшое расстояние при весьма малых значениях момента сопротивления со стороны исполнительного механизма и когда размеры и вес установки должны быть минимальными (например, в самолетных устройствах), применение контактных сельсинов не всегда является допустимым, так как их момент трения между кольцами и щетками и момент сопротивления могут быть величинами одного порядка, что неизбежно вызовет большие погрешности.

Бесконтактные сельсины рассмотренного выше типа хотя и не обладают этим недостатком, но имеют относительно большие размер и вес из-за сложности конструкции и для указанных устройств (например, самолетных дистанционных компасов) оказываются слишком громоздкими. Одним из возможных решений этой задачи является применение в качестве датчиков и приемников бесконтактных микромашин весьма простой конструкции и минимальных размеров и веса, получивших название магнесинов. Схема магнесинной передачи угла показана на рисунке 3.23.

Основной частью магнесина является набранный из листового пермаллоя статор С в виде замкнутого кольца (тороида), несущего спиральную обмотку. Ротор Р магнесина представляет собой постоянный магнит цилиндрической формы, намагниченный по диаметру. Датчик Д и приемник П имеют одинаковую конструкцию и их статорные обмотки питаются от общей сети возбуждения. Статорные обмотки имеют по два отвода 1, 2, расположенные под углом 120° друг относительно друга и относительно точки 3 присоединения сети питания. Линия связи Л (одним из каналов которой является и сеть питания) соединяет одноименные точки статорных обмоток датчика и приемника.

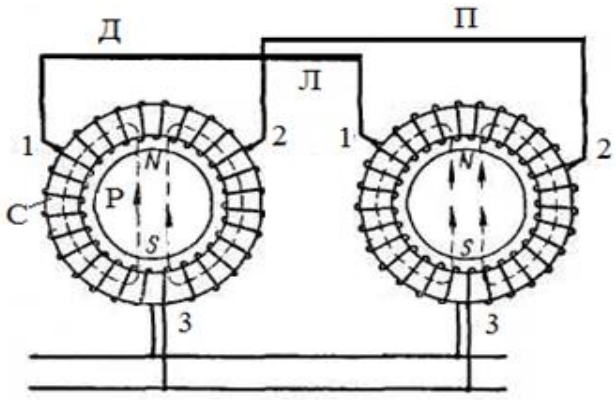


Рисунок 3.23 – Схема магнесинной системы синхронной связи

Из анализа работы сельсинов следует, что для возможности осуществления синхронной связи между датчиком и приемником необходимо, чтобы их обмотки синхронизации пронизывались переменными магнитными потоками и чтобы при повороте ротора изменялось потокосцепление между потоком возбуждения и обмоткой синхронизации.

Поток возбуждения

$$Фв = F\Lambda,$$

представляет собой произведение н. с. обмотки возбуждения на магнитную проводимость пути Λ, по которому проходит поток.

В сельсинах магнитная проводимость является величиной постоянной, и пульсация потока происходит за счет непрерывного изменения во времени н. с. обмотки возбуждения, питаемой переменным током. В магнесине обмотка возбуждения отсутствует и ее роль выполняет магнит-ротор. В этом случае изменение (пульсация во времени) магнитного потока может происходить только за счет периодического изменения магнитной проводимости.

Изменение Λ возникает в силу следующих причин. При питании обмотки статора магнесина переменным током с частотой *f* в замкнутом кольце статора возникает приемный магнитный поток $Ф_В$ той же частоты, создающий в статоре индукцию $В_В$, непрерывно изменяющиеся от максимального положительного до максимально отрицательного значений, как показано на рисунке 3.24, *а*. Пермаллой, из которого изготовлен статор, обладает свойством резко изменять магнитную проницаемость и, кроме того, имеет ничтожную коэрцитивную силу (не более 0,02 ав/см), т.е. обладает практически однозначной зависимостью между индукцией и напряженностью поля как при увеличении, так и при уменьшении $В_В$.

В рассматриваемом случае магнитная проницаемость, *а*, следовательно, и магнитная проводимость статорного кольца будут дважды за один период изменения индукции $В_В$ достигать своих наибольших и наименьших значений (рисунок 3.24, *б*). Так как поток $Ф_с$, создаваемый постоянным магнитом-

ротором, замыкается через статор (как показано пунктиром на рисунке 3.23), то вследствие изменения Λ он также в такт с нею будет изменять свою величину (рисунок 3.24, *в*). Эти флуктуации потока вызовут появление в статорной обмотке э. д. с. E_c, имеющей, как видно из рисунка 3.24, *г*, двойную по сравнению с частотой сети частоту: 2*f*.

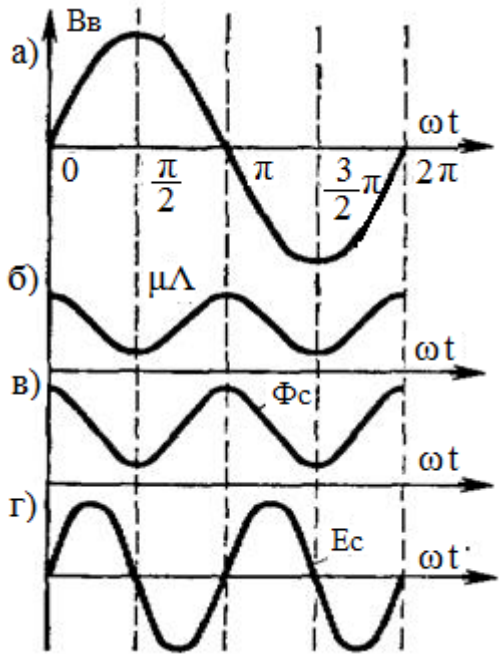


Рисунок 3.24 – К теории магнесина

Для простоты мы представили все величины на рисунке 3.24 синусоидальными функциями времени, в действительности же все они, за исключением B_B, будут иметь значительные высшие гармоники, вызванные нелинейностью соотношения между B_B и H.

Допустим, что система находится в рассогласовании, т.е. магнитные оси роторов датчика и приемника занимают неодинаковое положение. Так как по отношению к э. д. с. основной частоты, индуктируемой в обмотке статора потоком $Ф_в$, точки 1 и 1, 2 или 2, 3 и 3 датчика и приемника являются равнопотенциальными при любом положении ротора, то по соединительным проводам токи основной частоты циркулировать не могут (за исключением намагничивающего тока, проходящего по проводам питания). Что же касается токов двойной частоты, то при различных положениях роторов они будут протекать в линии связи. Так как по отношению к э. д. с. двойной частоты E_c, индуктированным в обмотках статоров вследствие флуктуации магнитного потока $Ф_c$, одинаково обозначенные точки обмоток датчика и приемника имеют в этом случае различные потенциалы.

Это легко понять из рассмотрения рисунка 3.25, из которого видно, что при данном расположении роторов э. д. с. в секции 1 – 2 обмотки датчика равна

нулю, так как половина потока Φ_c пронизывает вторую половину витков этой же секции в противоположном направлении.

Что же касается приемника, то здесь каждая половина потока Φ_c пронизывает различное число витков секции 1 – 2 обмотки статора и, следовательно, между точками 1 – 1 и 2 – 2 обмоток датчика и приемника будут протекать уравнительные токи с частотой $2f$. Те же рассуждения можно применить и к другим секциям обмотки (2 – 3 и 3 – 1).

Созданные токами двойной частоты н. с. будут взаимодействовать с потоками Φ_c (изменяющимися с той же частотой) и создадут вращающие моменты, стремящиеся повернуть роторы датчика и приемника в согласованное положение, по достижении которого потенциалы точек 1 – 1, 2 – 2, 3 – 3 станут одинаковыми и по отношению к э. д. с. двойной частоты, ток в линии связи прекратится и синхронизирующий момент станет равным нулю.

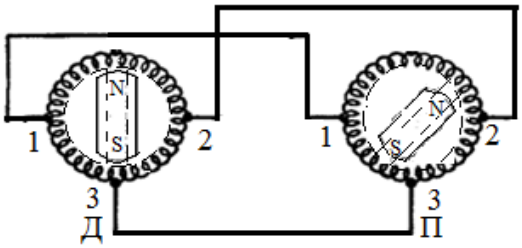


Рисунок 3.25 – Уравнительные токи синхронизации при неодинаковом расположении магнитов-роторов

Магнесин, как и сельсин, обладает свойством самосинхронизации в пределах одного оборота, так как ротор его поляризован.

Хотя удельный синхронизирующий момент магнесина весьма мал, но вследствие малого веса и малой инерции ротора угол ошибки магнесинной передачи при условии тщательного центрирования ротора и отсутствии заметного остаточного магнетизма в статоре составляет всего 1 – 2,5°.

4 Основные элементы информационного канала автоматизированного электропривода

4.1 Общие сведения и классификация элементов

4.1.1 Как было определено выше, электропривод представляет собой физическую систему, которая содержит два канала – силовой и информационный, осуществляющую управляемое электромеханическое преобразование энергии (рисунок 4.1).

Процессом управления в электроприводе называется процесс формирования управляющих воздействий на объект управления (силовой канал) для реализации требуемого закона изменения выходных регулируемых координат, а устройством управления – совокупность технических средств, обеспечивающих процесс управления.

Данная совокупность технических средств представляет собой комплекс отдельных конструктивно законченных устройств или схемных элементов, каждый из которых самостоятельно выполняет определенные функции по преобразованию сигнала (информации) полученной от предыдущего элемента, и передаче ее последующему элементу.

В целом совокупность всех элементов информационного канала, участвующих в процессе управления силовым каналом электропривода, назовем системой автоматического управления. Система состоит из устройства управления, устройства ввода команд оператора, устройства вывода информации о состоянии привода и технологического процесса для контроля и принятия оператором управленческих решений, информационно-измерительной системы и схем сопряжения (интерфейса) устройства управления с вышеперечисленными устройствами.

4.1.2 Таким образом, любая самая сложная автоматическая система состоит из определенного комплекса элементов.

Многообразие автоматических систем порождает и многообразие элементов, что, в свою очередь, приводит к необходимости их классификации. Нередко признаки классификации выбираются произвольно, и она в этом случае не достигает своей цели и даже дезориентирует при выборе требуемого элемента. Поэтому большое значение приобретают выявление и обоснование признаков, которые должны быть положены в основу классификации элементов автоматики. При этом наиболее важны последовательность расположения, выделение главных и вспомогательных признаков, т. е. разработка соответствующей иерархической структуры. Этим вопросам пока еще уделяется недостаточно внимания, вероятно, из-за некоторой неопределенности представления о многих элементах, но именно эти разработки могут помочь провести научную классификацию элементов и способствовать тем самым укреплению основ теории элементов автоматики.

В основу классификационной схемы могут быть положены функциональные признаки [6]. В этом случае элементы подразделяются на следующие классы: элементы информации, сравнения, распределения, усиления, вычисления, памяти, логики, исполнения, вспомогательные (рисунок 4.1).

Известная доля неопределенности заключена в классе вспомогательных элементов, из которых в будущем должны быть сформированы классы с более конкретными функциональными признаками.

Предлагаемый набор классов элементов позволяет собрать любую автоматическую систему измерения, контроля, регулирования и управления. Каждый класс элементов в зависимости от выбранных основных и вспомогательных признаков, в свою очередь, может подразделяться на подклассы, группы, подгруппы, виды, подвиды и т. д.

В приведенной классификационной схеме перечисляются только основные признаки ряда элементов, т. е. она неполная и требует дальнейшего уточнения и развития.

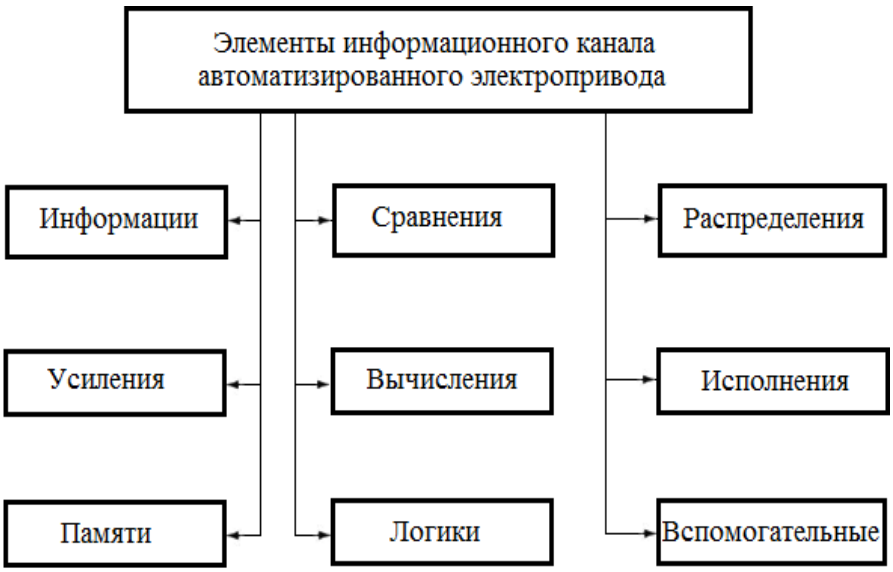


Рисунок 4.1 – Классификационная схема информационного канала

Ни одна система управления не может работать без информации о состоянии объекта управления и его реакции на управляющие воздействия. Элементами систем, обеспечивающими получение такой информации, являются измерительные преобразователи. Специалисты по автоматике также используют термины «первичный преобразователь» или «датчик». В дальнейшем термин «первичный преобразователь» будем использовать при описании принципа действия того или иного измерительного устройства, а термин «датчик» – при пояснении конструктивного исполнения.

Различают два вида датчиков в зависимости от принципа, производимого ими преобразования:

- параметрические (или пассивные), в которых изменение контролируемой величины *x* сопровождается соответствующими изменениями, например, активного, индуктивного и емкостного сопротивлений датчика. Наличие постороннего источника энергии в этом случае является обязательным условием работы параметрического датчика;

- генераторные (или активные), в которых изменение контролируемой величины *x* сопровождается соответствующими изменениями ЭДС на выходе датчика (например, возникновение ЭДС может происходить вследствие термо-, пьезо-, фотоэффекта и других явлений, вызывающих появление электрических зарядов). Эти датчики не требуют дополнительного источника энергии, особенно характерным примером являются тахогенераторы, которые рассмотрены ранее в третьем разделе настоящего учебного пособия.

В зависимости от вида выходного сигнала различают измерительные преобразователи аналоговые, дискретные, релейные, с естественным или унифицированным выходным сигналом.

Необходимо отметить, что внедрение автоматизированного электропривода в разнообразные технологические процессы требует все большего объема измерений различных физических величин, которым должно

соответствовать определенное число измерительных преобразователей. При этом в настоящее время число типов измерительных преобразователей значительно превосходит число измеряемых величин, так как одну и ту же физическую величину можно измерять различными методами и датчиками разных конструкций. Поэтому класс датчиков информационно-измерительной системы электропривода представлен особенно широко.

Устройство сравнения чаще представлено как, самостоятельный элемент в котором и определяется разность между действительным и заданным (опорным) значением регулируемого параметра с устройства ввода задания. При этом сигнал от измерительного устройства может поступать к регулирующему элементу через устройство сравнения (в простейших случаях) без изменений и усилений, либо видоизмененным и значительно усиленным, что наблюдается в подавляющем большинстве случаев поскольку сигнал, получаемый с датчика, бывает недостаточен для приведения в действие регулирующего элемента.

Элементы усиления разделяют прежде всего по выполняемым функциям: усилители тока, напряжения, мощности как постоянного, так и переменного тока. В то же время в зависимости от принципа действия электрические усилители могут быть электронными, магнитными, ионными, электромашинными, электромеханическими, фотоэлектрическими, гальваномагнитными и на основе использования различных нелинейностей. В свою очередь, усилители любого принципа действия имеют также разветвленную схему классификации.

В качестве регулирующих элементов могут быть: подсистемы управления более низкого уровня, например подсистемы управления тиристорного или частотного преобразователя, которые в свою очередь содержит подсистемы еще более низкого уровня управления, например, подсистему управления тиристорного или транзисторного ключа (рисунок 1.5); реостаты вентили и тому подобные устройства. В некоторых случаях регулирующие элементы могут быть конструктивно объединен с объектом регулирования и быть его составной частью, например, руль самолета или центробежный насос.

Для элементов вычисления главным признаком является функциональная зависимость, т.е. то математическое действие, для которого они предназначены — сложение, вычитание, умножение, деление, возведение в степень, извлечение корня, логарифмирование, потенцирование, реализация тригонометрических функций, дифференцирование по времени, параметру, интегрирование по времени, параметру.

Элементы памяти классифицируются как по выполняемым функциям, так и по принципу их действия. Это прежде всего задатчики опорных сигналов, элементы для задания программы, различных временных функций и других параметров.

Элементами исполнения могут быть всевозможные простейшие и сложные устройства, классифицировать которые трудно, хотя, видимо, их

можно подразделить по принципу действия, имея в виду также и разделение в зависимости от характера действия.

К классу вспомогательных элементов можно отнести те, которые не получили еще окончательного конструктивного оформления.

В целом вопросы классификации при формировании определенного научного направления имеют большое значение, поэтому важна и дальнейшая разработка признаков разделения элементов и группирования их с одновременным решением вопросов определения особенностей расчета и исследования каждой группы.

Ниже рассмотрим основные элементы, наиболее часто применяемые в автоматике, разделяя их по выполняемым функциям.

4.2 Параметрические датчики. Устройство, принцип действия, характеристики и назначение

4.2.1 Измерительные преобразователи (ИП), выполненные в виде реостата, подвижный контакт которых перемещается под воздействием входной измеряемой величины, называются реостатными измерительными преобразователями или реостатными датчиками. Чаще всего реостатные датчики включаются в измерительную цепь по схеме потенциометра, поэтому иногда используется термин «потенциометрические преобразователи».

Выходной величиной данных ИП является электрическое сопротивление, функционально связанное с положением подвижного контакта. Реостатные преобразователи служат для преобразования угловых или линейных перемещений в соответствующее изменение сопротивления, тока или напряжения. Так как в перемещение могут быть преобразованы многие неэлектрические величины (давление, расход, уровень и др.), то реостатные датчики очень часто используют в качестве промежуточных преобразователей неэлектрических величин в электрические которые широко применяются в устройствах автоматики.

Данные датчики отличаются высокой точностью и стабильностью функции преобразования, имеют малое переходное сопротивление, низкий уровень собственных шумов, малый температурный коэффициент сопротивления (ТКС). В зависимости от конструктивного исполнения различают реостатные преобразователи с поступательным и вращательным перемещением подвижного контакта. Последние, кроме того, делятся на одно- и многооборотные.

Конструктивно реостатные преобразователи (рисунок 4.2, *а, б)* состоят из каркаса *1,* обмотки из изолированного провода *2* и токосъемного контакта *3* в виде щетки или движка, скользящего по виткам провода, очищенного от изоляции.

Каркас выполняется из изоляционного материала и может иметь форму стержня, кольца, изогнутой пластины. Обмотку выполняют изолированным проводом виток к витку или с заданным шагом. Материал обмотки должен

отвечать следующим требованиям: высокое удельное электрическое сопротивление, высокая коррозионная стойкость, стабильность характеристик во времени, малый ТКС, большая прочность на разрыв и истирание. В качестве обмоточного провода применяют константан и манганин, при работе в условиях повышенных температур – железо- и никель хромовые сплавы.

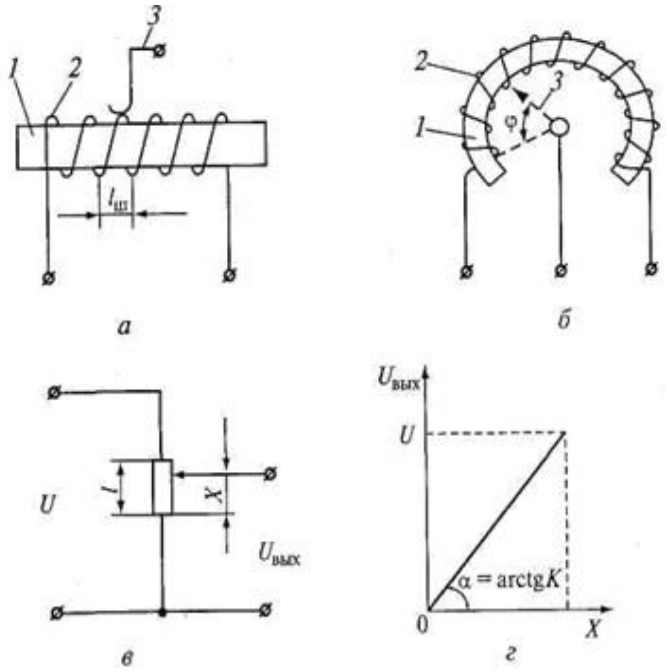


Рисунок 4.2 – Потенциометрические датчики: *а* – линейный; *б* – угловой; *в* – схема включения; *г* – статическая характеристика.

К зажимам обмотки реостата подключается напряжение U постоянного или переменного тока неизменного значения. При перемещении движка выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ меняется пропорционально входной величине X.

Таким образом осуществляется преобразование перемещения в напряжение (рисунок 4.2, *в).* Учитывая, что по конструктивным особенностям $R = l$, $r = X$, где R – полное сопротивление преобразователя; l – длина намотки обмотки; r сопротивление части обмотки, приходящейся на перемещение X движка реостата, функция преобразования будет иметь вид (рисунок 4.2, *г*)

$$U_{вых} = (U/R)r = (U/l)X = KX, \qquad (4.1)$$

где K – коэффициент преобразования.

4.2.2 Тензометрические датчики. В основе работы тензометрических датчиков (тензорезисторов) лежит тензоэффект, заключающийся изменении активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при их механической деформации.

Тензорезисторы используют для измерения давления жидкости и газа, а также при измерении упругих деформаций материалов: давлений, изгибов, скручивания и т.д.

Характеристикой тензоэффекта материала служит коэффициент тензочувствительности K_T, определяемый как отношение изменения сопротивления к изменению длины проводника:

$$K_T = \delta R/(\delta l) = E\,(\delta R/\sigma), \qquad (4.2)$$

где $\delta R = R/R$; $\delta l = l/l$; R – приращение сопротивления при изменении длины l на l; E – модуль упругости материала; σ – механическое напряжение. Коэффициент тензочувствительности связан с деформацией материала и его удельным сопротивлением выражением

$$K_T = 1 + 2\,\mu + \delta\rho/(\delta l), \qquad (4.3)$$

где μ – коэффициент Пуассона; $\delta\rho$ – относительное приращение удельного сопротивления р материала при деформации.

Коэффициент тензочувствительности металлов, наиболее часто применяемых для тензорезисторов, близок к двум: для константана – 2; для нихрома – 2,2; для хромеля – 2,5. Для полупроводниковых материалов $KT = \delta\rho/(\delta l)$, и он намного больше, чем у металлов. Например, для германия $KT \approx 100$. Однако полупроводниковые материалы характеризуются малыми механической прочностью и стабильностью по сравнению с металлами.

В качестве тензорезистивного материала можно использовать сплавы с малым ТКС (манганин, константан, нихром, никелин), платиносеребрянные и платиновольфрамовые полупроводниковые материалы (германий, кремний).

Наиболее распространены тензорезисторы, выполненные из металла. Они разделяются на проволочные и фольговые.

Проволочные тензорезисторы выполняют из проволоки диаметром 0,002...0,05 мм, которую укладывают частыми петлями на тонкую бумагу или лаковую пленку и приклеивают к ней (рисунок 4.3, *а)*. К концам проволоки припаивают или приваривают медные выводы. Сверху преобразователь покрывают лаком. Материал для пленки выбирают в зависимости от условий эксплуатации. Резисторы на пленке из клея БФ-2 работают в диапазоне температур от -40 до 70 °С, а на бакелитовом лаке – до 200 °С. Для более высоких температур используют специальные высокотемпературные клеи или цементы.

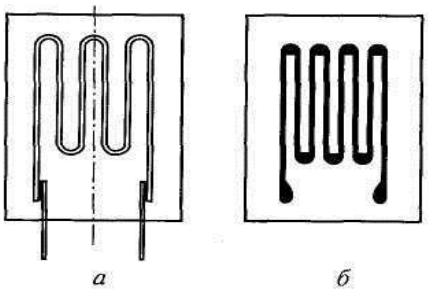


Рисунок 4.3 – Проволочный *(а)* и фольговый *(б)* тензорезисторы

Тензорезистор наклеивают на поверхность испытуемой детали таким образом, чтобы его продольная ось была расположена в направлении измеряемой деформации, т.е. чтобы возможные деформации детали происходили вдоль петель резистора. Это позволяет точнее измерять линейные деформации.

Наиболее часто используют преобразователи с базой (длиной петель) 5...20 мм, обладающие сопротивлением 30...500 Ом. Их номинальный рабочий ток, определяемый условиями отвода выделяемых в них потерь энергии, находится в пределах десятков миллиампер. Максимально допустимые относительные деформации не превышают 0,3 %.

Поскольку изменение сопротивления тензорезисторов, вызванное деформацией, весьма мало и колеблется от единиц миллиом до нескольких десятых долей ома, то для измерений применяют высокочувствительные потенциометрические и мостовые схемы. Чтобы повысить чувствительность тензорезисторов, их можно включать в два и даже четыре плеча мостовой схемы.

Характеристика проволочных тензорезисторов в пределах упругой деформации близка к линейной и определяется выражением

$$\Delta R = R\, K_T\, \delta l = (\rho K_T/S)\Delta l, \qquad (4.4)$$

где S – площадь сечения проволоки.

Отклонение от линейности характеристики не превышает 0,1 %. Чувствительность проволочного тензорезистора

$$K_S = d(\Delta R)/d(\Delta l) = \rho K_T/S. \qquad (4.5)$$

Фольговые преобразователи (рисунок 4.3, *б)* более совершенны, чем проволочные тензорезисторы. Они имеют решетку из тонких полосок фольги прямоугольного сечения толщиной 4...12 мкм, полученную травлением и нанесенную на лаковую подложку. Благодаря большей площади контакта полосок фольгового тензорезистора с объектом измерения его теплоотдача значительно выше, чем у проволочного, что позволяет увеличить ток, протекающий через резистор, до 0,5 А, и тем самым повысить чувствительность тензопреобразователя. Другое достоинство фольговых тензорезисторов заключается в возможности изготовления решеток сложного профиля, которые наиболее полно удовлетворяют условиям измерений

4.2.3 Терморезисторы. Принцип действия терморезистивных преобразователей основан на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Поэтому их обычно применяют для измерения температуры.

Для терморезистивных преобразователей используют материалы, обладающие высокой стабильностью ТКС, высокой воспроизводимостью электрического сопротивления при данной температуре, значительным удельным электрическим сопротивлением, высоким ТКС, стабильностью

химических и физических свойств при нагревании, инертностью к воздействию исследуемой среды. К таким материалам в первую очередь относятся платина, медь, никель, вольфрам и др. Наиболее широко применяют платиновые и медные терморезисторы.

Сопротивление платиновых терморезисторов в диапазоне температур от 0 до 650 °С описывается уравнением

$$R_\theta = R_0(1 + A\theta + B\theta^2),$$

где R_θ, R_0 – сопротивления преобразователя соответственно при рабочей и нулевой температурах (θ и θ_0);

A, B – постоянные коэффициенты.

Для платиновой проволоки, применяемой в промышленных терморезисторах, $A = 3{,}96847 \cdot 10^{-3}К^{-1}$; $B = -5{,}847 \cdot 10^{-7}К^{-2}$. В интервале температур от 0 до -200 °С зависимость сопротивления платины от температуры имеет вид

$$R_\theta = R_0[1 + A\theta + B\theta + C(\theta - 100)],$$

где $C = -4{,}35 \cdot 10^{-12}К^{-3}$.

К недостаткам платиновых преобразователей температуры относятся довольно высокая загрязняемость платины парами металлов (особенно железа) при высоких температурах и сравнительно невысокая химическая стойкость в восстановительной среде, вследствие чего материал становится хрупким, теряет стабильность характеристик.

Медные терморезисторные преобразователи широко используют в диапазоне температур от 50 до 180 °С вследствие их низкой стоимости и довольно высокой стойкости к коррозии. Зависимость сопротивления меди от температуры описывается линейным уравнением

$$R_\theta = R_0(1 + \alpha\theta),$$

где $\alpha = 4{,}26 \cdot 10^{-3}К^{-1}$.

К недостаткам медных преобразователей температуры относится высокая окисляемость меди при нагревании, вследствие чего их применяют в сравнительно узком диапазоне температур в средах с низкой влажностью и при отсутствии агрессивных газов.

Полупроводниковые терморезисторы отличаются большими значениями ТКС от металлических, а, следовательно, меньшими размерами и инерционностью. Температурная зависимость для них описывается выражением

$$R_\theta = Ae^{B/\theta},$$

где *A, B* – постоянные коэффициенты.

Недостатками полупроводниковых терморезисторов, существенно снижающих их эксплуатационные качества, является нелинейность зависимости сопротивления от температуры, значительный разброс номинальных значений сопротивлений различных образцов и их ТКС.

Поскольку терморезисторы обычно применяют для измерения температуры, то нагрузочный ток, проходящий через преобразователь, должен быть мал. Если через терморезистор пропускать большой фиксированный ток, то его перегрев по отношению к окружающей среде может стать значительным. Установившееся значение перегрева и соответственно сопротивления при этом будет определяться условиями теплоотдачи поверхности терморезистора. Если нагретый терморезистор поместить в среду с переменными теплофизическими характеристиками, то появляется возможность измерения ряда физических величин, например, скорости потока жидкостей и газов, плотности газов и т. п. Чувствительность проволочных медных терморезисторов $K_{SM} = dR_\theta/d\theta = \alpha R_0$, платиновых $Ksn = R_0(A + 2B\theta)$. При этом чувствительность проволочных медных терморезисторов постоянна, а чувствительность платиновых изменяется с изменением температуры. При одинаковых значениях R_0 чувствительность медных терморезисторов выше.

4.2.4 Индуктивные датчики. Принцип действия индуктивных датчиков основан на изменении индуктивности L или взаимоиндуктивности обмотки с сердечником вследствие изменения магнитного сопротивления Rm магнитной цепи датчика, в которую входит сердечник.

Индуктивные датчики также относятся к классу параметрических. Измеряемое перемещение на входе датчика вызывает изменение параметров магнитной и электрической цепей, что, в свою очередь, вызывает изменение выходной величины – электрического тока I или напряжения U.

С помощью индуктивных датчиков можно контролировать механические перемещения, силы, температуру, свойства магнитных материалов, определять наличие дефектов, контролировать диаметр стальной проволоки, толщину немагнитных покрытий на стали и др.

Индуктивные датчики отличает ряд достоинств: простота и прочность конструкции, надежность в работе, отсутствие скользящих контактов, большая величина мощности на выходе (до нескольких десятков ватт), высокая чувствительность (до 100 В/мм).

Рассмотрим работу преобразователя (рисунок 4.4 *а)*. Выходной сигнал получают в виде переменного напряжения, снимаемого с сопротивления нагрузки R_H, включенного в цепь обмотки *2*, помещенной на сердечнике *1*. Питание осуществляется переменным напряжением U с частотой от 50 до нескольких тысяч герц. Под действием входного сигнала перемещается якорь *3* и изменяется зазор δ. При этом выходное напряжение датчика равно

$$U_{вых} = IR_{H.}$$

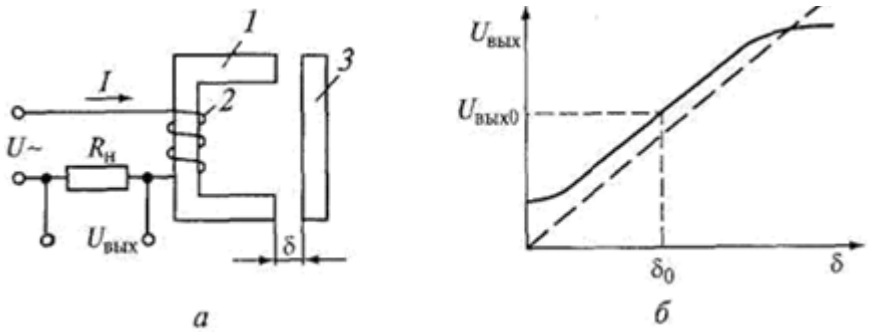


Рисунок 4.4 – Схема (*а*) и характеристики (*б*) индуктивного датчика

Среднее значение тока в рабочей цепи преобразователя

$$I = U/\sqrt{R^2 + X_L^{2^2}} = U/\sqrt{(R_H{}^2 + R_0^2) + (\omega L)^2}, \qquad (4.6)$$

где R – суммарное активное сопротивление цепи, $R = R_H + R_0$;

R_0 – сопротивление обмотки — реактивное сопротивление цепи;

δ – величина зазора между сердечником и якорем;

ω – круговая частота.

Индуктивность обмотки L является функцией размера зазора с магнитным сопротивлением $\underline{r_\delta}$:

$$L = w^2/r_\delta = w^2/(\delta\mu_0 S) = \mu_0 S w^2/\delta, \qquad (4.7)$$

где w – число витков обмотки;

μ_0 – магнитная проницаемость воздуха в зазоре;

S – площадь поперечного сечения зазора.

Учитывая, что на практике для индуктивных преобразователей выполняется условие $R << X_L$ и подставляя выражение (4.6) в (4.7), получаем

$$U_{вых} = \frac{UR_н}{\sqrt{R^2 + (\omega\mu_0 S w^2/\delta^2)}} = \frac{UR_н\delta}{\omega\mu_0 S w^2} = K\delta \qquad (4.8)$$

Коэффициент преобразования $K = UR_H/(w\mu_0 S w^2)$ – величина постоянная, поэтому статическая характеристика $Uвых = f(\delta)$ должна представлять собой прямую, проходящую через начало координат под углом $\alpha = arctgK$ к оси абсцисс (рисунок 4.4, *б,* штриховая линия).

Реальная характеристика преобразователя, показанная на рисунке сплошной линией, отличается от идеальной. Это объясняется тем, что при малых значениях δ допущение $r_m << r_\delta$ становится неверным, так как магнитное сопротивление ферромагнитного участка магнитной цепи r_m становится соизмеримым с магнитным сопротивлением зазора r_δ; при больших значениях

δ падает индуктивность обмотки L и реактивное сопротивление X_L становится соизмеримым с активным сопротивлением магнитной цепи, т.е. $R \approx X_L$. Это несоблюдение принятых в начале рассмотрения допущений и приводит к искажению статической характеристики.

4.2.5 Емкостные датчики. Принцип действия емкостных измерительных преобразователей основан на изменении емкости конденсатора под воздействием входной преобразуемой величины. Емкость конденсатора

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 S/\delta,$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

S – площадь пластины;

δ – толщина диэлектрика или расстояние между пластинами.

Из приведенного соотношения видно, что на емкость конденсатора можно влиять изменением площади перекрытия пластин S (рисунок 4.5, *а),* расстояния между ними δ (рисунок 4.5, *б),* диэлектрической проницаемости вещества ε, находящегося в зазоре между обкладками конденсатора (рисунок 4.5, *в).* Выбор того или иного изменяемого параметра зависит от характера измеряемой величины.

Емкостные преобразователи используют для измерения угловых и линейных перемещений, линейных размеров, уровня, усилий, влажности, концентрации и др. Конструктивно они могут быть выполнены с плоскопараллельными, цилиндрическими, штыревыми электродами, с диэлектриком между пластинами и без него.

Рассмотрим принцип действия и основные соотношения параметров для некоторых конструкций емкостных датчиков.

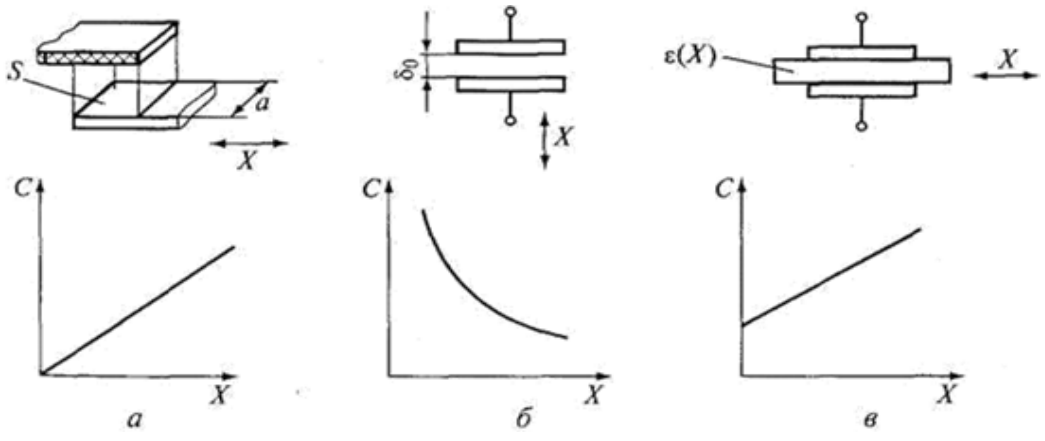


Рисунок 4.5 – Схемы и характеристики емкостных датчиков с различными изменяемыми параметрами

Емкостный плоскопараллельный измерительный преобразователь с изменяемой площадью перекрытия S (рисунок 4.6, а) описывается уравнением

преобразования

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 aX/\delta, \tag{4.9}$$

где a – ширина пластин конденсатора;

X – длина перекрытия электродов.

Емкостные преобразователи перемещения с переменной площадью перекрытия (рисунок 4.6) используют и для измерения угловых величин.

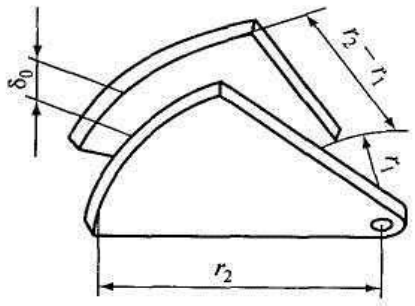


Рисунок 4.6 – Емкостной датчик для измерения угловых величин

В этом случае емкость измерительного преобразователя

$$\mathrm{C} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0(r_2^2 - r_1^2)}{2\delta}(\varphi_0 - \varphi), \tag{4.10}$$

а чувствительность

$$K_s = \varepsilon\varepsilon_0(r_2^2 - r_1^2)/2\delta, \tag{4.11}$$

где r_2, r_1 – соответственно наружный и внутренний радиусы пластин;

φ, φ_0 – соответственно текущий (измеряемый) и начальный углы перекрытия пластин.

Из выражений (4.9) и (4.10) видно, что все входящие в них величины, кроме измеряемых X или φ, постоянны, т.е. статическая характеристика такого емкостного датчика линейна (рисунок 4.5, *а).* Преобразователи такого типа применяют для измерения сравнительно больших (до десятков сантиметров) перемещений.

Емкостный плоскопараллельный преобразователь перемещения с изменяющимся воздушным зазором (рисунок 4.5, *б)* имеет нелинейную характеристику. Изменение его емкости описывается уравнением

$$\mathrm{C}_x = \varepsilon\,\varepsilon_0 S/(\delta_0 - X),$$

где δ_0 – начальный зазор;

X – перемещение пластины.

В связи с нелинейностью статической характеристики такие датчики применяют для измерения относительно малых перемещений, обычно не более $0{,}1\delta_0$.

Преобразователи с изменяемой диэлектрической проницаемостью среды ε между электродами (рисунок 4.5, *в*) широко используют для измерения уровня жидких и сыпучих веществ, анализа состава и концентрации веществ в химической, нефтеперерабатывающей и других областях промышленности, для счета изделий, охранной сигнализации и т.п. Они имеют линейную статическую характеристику.

Емкость измерительных преобразователей в зависимости от конструктивных особенностей колеблется от десятых долей до нескольких тысяч пикофарад, что приводит к необходимости использовать для питания датчиков напряжение повышенной частоты – от $1 \cdot 10^3$ до 10^8 Гц. Это один из существенных недостатков подобных преобразователей.

4.3 Генераторные датчики. Устройство, принцип действия, характеристики и назначение

4.3.1 Оптические или фотоэлектрические датчики – небольшие по размерам электронные устройства, способные под воздействием электромагнитного излучения в видимом инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах подавать единичный или совокупность сигналов на вход регистрирующей или управляющей системы.

Датчики реагируют на непрозрачные и полупрозрачные предметы, водяной пар, дым, аэрозоли и являются разновидностью бесконтактных датчиков, так как механический контакт между чувствительной областью датчика (сенсором) и воздействующим объектом отсутствует. Такое свойство оптических датчиков обуславливает их широкое применение в автоматизированных системах управления которые решают задачи управления производственными технологическими процессами при подсчете, обнаружении или позиционировании в роботизированных комплексных системах. Т.е., фотоэлектрические датчики широко применяются для решения задач промышленной автоматизации в которой также используется и автоматизированный электропривод.

Оптические датчики называют ещё оптическими бесконтактными выключателями, фотодатчиками, фотоэлектрическими датчиками. Дальность действия оптических датчиков намного больше, чем у других типов бесконтактных датчиков.

В фотодатчиках различного типа широко применяются фотодиоды и фототриоды. Они имеют линейную световую характеристику, высокую чувствительность, малую инерционность (частота прерывания светового потока может быть до нескольких килогерц).

Принцип действия фотодиодов и фототриодов основан на принципе внутреннего фотоэффекта, состоящего в том, что активное сопротивление (электропроводность) полупроводника находится в зависимости от его освещенности. Источником излучения в современных оптических датчиках являются светодиоды.

Устройство фотоэлектрического датчика приведено на рисунке 4.7. На выходе оптического датчика стоит транзистор PNP- или NPN-типа с открытым коллектором. Нагрузка подключается между выходом и, в зависимости от типа транзистора, общим минусовым или плюсовым проводом. Если в исходном состоянии нагрузка подключена, то выполняется функция размыкающего контакта и наоборот.

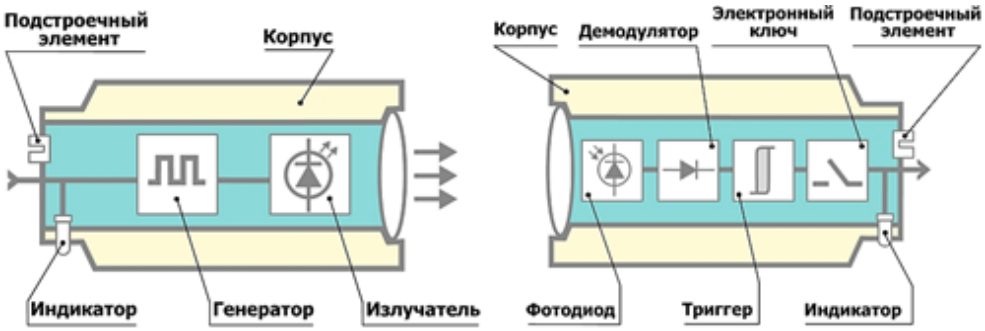


Рисунок 4.7 - Устройство фотоэлектрического датчика

Оптические датчики имеют индикатор рабочего состояния и, как правило, регулятор чувствительности, который даёт возможность настроить срабатывание на объект, находящийся на неблагоприятном фоне.

Отличительными чертами фотоэлектрических датчиков является их бесконтактный принцип измерений с предоставлением выходной информации в цифровой форме.

По типу устройства оптические датчики делятся на моноблочные и двухблочные. В моноблочных излучатель и приёмник находятся в одном корпусе. У двухблочных датчиков источник излучения и приёмник оптического сигнала расположены в отдельных корпусах.

По принципу работы выделяют три группы оптических датчиков:

тип T – датчики барьерного типа (приём луча от отдельно стоящего излучателя);

тип R – датчики рефлекторного типа (приём луча, отражённого катафотом);

тип D – датчики диффузионного типа (приём луча, рассеянно отражённого объектом).

У датчиков барьерного типа излучатель и приёмник находятся в отдельных корпусах, которые устанавливаются друг напротив друга на одной оси. Дальность разнесения корпусов может достигать 100 метров. Предмет, попавший в активную зону оптического датчика, прерывает прохождение луча. Изменение фиксируется приёмником, появившийся сигнал после обработки подаётся на управляемое устройство.

Датчики рефлекторного типа содержат в одном корпусе и передатчик оптического сигнала, и его приёмник. Для отражения луча используется рефлектор (катафот). Датчики такого типа активно используются на конвейере для подсчёта количества продукции. Для обнаружения объектов с зеркальной, отражающей металлической поверхностью в датчиках рефлекторного типа

используют поляризационный фильтр. Дальность действия датчиков рефлекторного типа может достигать 8 метров.

В датчиках диффузионного отражения источник оптического сигнала и его приёмник находятся в одном корпусе. Приёмник учитывает интенсивность луча, отражённого контролируемым.

Применение оптических датчиков распадается на две четких категории:

- Датчики специального назначения, оптимизированные под решение конкретных задач, такие как датчик горячего металла, контроля частоты вращения, кассовых терминалов, датчик метки. Такие выключатели ориентированы на решение одной конкретной задачи, как правило, прямо отраженной в названии. Для них характерен только один вариант применения, и каких-то новых решений в этой группе быть не может.

- Датчики общего назначения: типы T, D, R. Применение каждого типа настолько общее, что описывать все возможные решения не имеет смысла в виду их количества. Можно лишь описать специфику использования для различных типов: характерное применение, преимущества и недостатки.

Таким образом фотоэлектрические датчики как составная часть автоматизированных систем управления и в частности автоматизированного электропривода могут быть применены практически во всех отраслях промышленности. Они используются как своеобразные бесконтактные выключатели для подсчета, обнаружения, позиционирования и других задач на любой технологической линии. Большое распространение фотодатчики получили не только в производственной области, но и в бытовом хозяйстве.

4.3.2 Пьезоэлектрические датчики. Принцип действия данных преобразователей основан на использовании прямого или обратного пьезоэлектрических эффектов. Прямой пьезоэффект заключается в способности некоторых материалов образовывать электрические заряды на поверхности при приложении механической нагрузки, обратный – в изменении механического напряжения или геометрических размеров образца материала под воздействием электрического поля.

В качестве пьезоэлектрических используют обычно естественные материалы – кварц и турмалин, а также искусственно поляризованную керамику на основе титаната бария (BaTiO3), титаната свинца (PbTiO3) и цирконата свинца (PbZrO3). Можно использовать и другие материалы.

Количественно пьезоэффект оценивается пьезомодулем K_d, устанавливающим зависимость между возникающим зарядом Q и приложенной силой F:

$$Q = K_d F. \qquad (4.12)$$

Из пьезоматериалов наиболее распространен кварц, что объясняется его удовлетворительными пьезоэлектрическими свойствами, очень высоким сопротивлением, стойкостью к воздействиям температуры и влажности, высокой механической прочностью. Кварц имеет незначительный коэффициент линейного расширения, его пьезомодуль, равный $2{,}3 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н,

практически не зависит от температуры до 200 °С, в диапазоне 200...500 °С изменяется незначительно, а при 573 °С становится равным нулю; удельное электрическое сопротивление кварца порядка 10^{16} Ом/м; модуль упругости кварца $E = 7{,}7 \cdot 10^{10}$ Па.

Пьезокерамика представляет собой продукт отжига спрессованной смеси, содержащей мелко раздробленные сегнетоэлектрические кристаллы. Характерным отличием сегнетоэлектриков является их доменная структура с хаотически ориентированными полярными направлениями доменов. Пьезоэлектрические свойства сегнетоэлектрическая пьезокерамика приобретает после поляризации в электрическом поле.

Механическая прочность пьезокерамики очень высока, но зависит от технологии и качества обработки соприкасающихся плоскостей. Пьезомодуль, диэлектрическая проницаемость и их стабильность зависят от выбора направления поляризации, направления действия силы *F* и съема заряда *Q*.

Пьезокерамика на основе ниобата свинца (НБС) и цирконататитаната свинца (ЦТС) более стабильна, чем на основе титаната бария, однако уступает в чувствительности. Так, пьезокерамика на основе титаната бария имеет точку Кюри 120 °С при пьезомодуле порядка $100 \cdot 10^{12}$ Кл/Н, а пьезокерамика ЦТС-19 – точку Кюри 290 °С и в два раза более высокое значение пьезомодуля.

Все природные пьезоматериалы имеют кристаллическую структуру, которая определяет свойства пьезопреобразователей. Так, кварц имеет кристаллическую структуру, в которой можно выделить шестигранную призму. По отношению к ней в кристалле выделяют три типа осей: продольную, или оптическую ось *Z*, электрические оси *X*, проходящие через ребра призмы кристалла нормально к оптической оси (три) и механические, или нейтральные, оси *Y*, нормальные к граням кристалла (их также три).

Пьезочувствительный элемент обычно вырезают из кристалла кварца в виде пластины (параллелепипеда), стороны которой параллельны осям кристалла (рисунок 4.9, *а)*.

В ненапряженном состоянии в пластине все заряды скомпенсированы, и она является электрически нейтральной. Если к пластине кварца вдоль оси *X* приложена сила *F*, то на ее гранях, перпендикулярных оси *X*, возникают разнополярные электрические заряды *Q*. Значения этих зарядов в пределах упругих деформаций находятся в линейной зависимости от приложенной силы в соответствии с выражением (4.12). Такой пьезоэффект называется продольным. Значения зарядов не зависят от геометрических размеров пластины, а определяются лишь силой *F*.

Если пластину подвергнуть сжатию по оси *Y*, то на тех же гранях вновь появятся заряды, но теперь уже противоположного знака (поперечный пьезоэффект). Значение заряда при поперечном пьзоэффекте

$$Q = -K_d(b/a)F, \qquad (4.13)$$

где a, b – размеры пьезоэлемента в направлении осей *X* и *Y*.

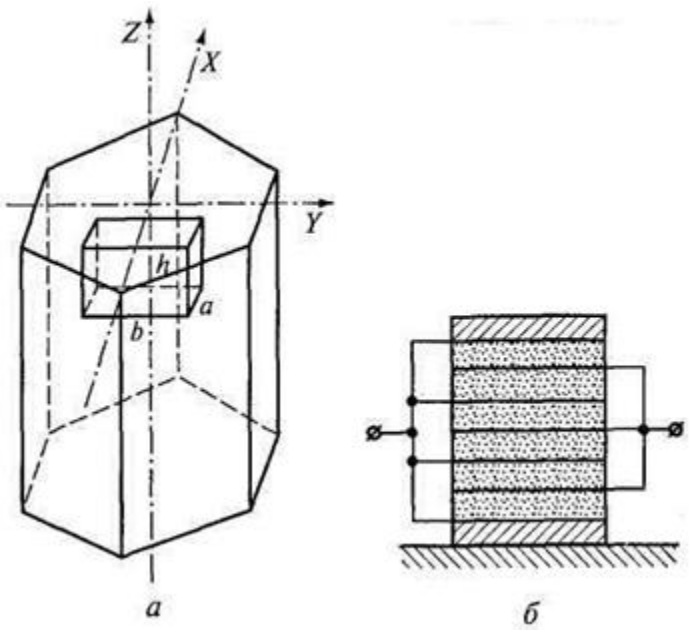


Рисунок 4.9 – Пьезочувствительный элемент *(а)* и пьезопреобразователь *(б)*

В зависимости от направления действия силы *F* (сжатие или растяжение) знаки зарядов на гранях пластины будут меняться.

При приложении силы *F* вдоль оси *Z* пьезоэффект не наблюдается. Пластина кварца остается также электрически нейтральной при равномерном воздействии на нее со всех сторон (например, при гидростатическом сжатии).

Турмалин (в отличие от кварца) имеет не две, а одну пьезочувствительную плоскость, перпендикулярную к оптической оси *Z*. Благодаря этой особенности турмалин можно применять для измерения всестороннего давления, что делает его незаменимым при измерении давления жидкостей.

Пьезоэлектрический преобразователь давления представляет собой пластину из пьезоматериала. На две ее грани нанесены электроды, с которых снимается заряд или напряжение. Напряжение на обкладках при отсутствии нагрузки

$$U_0 = Q/C_{\text{п}},$$

где $C_П$ – емкость пьезоэлектрического элемента преобразователя, $C_П = \varepsilon Sx/a$;

ε – диэлектрическая постоянная материала пластины;

$Sx = hb$ – площадь грани, перпендикулярной к оси *X*;

a – толщина пластины.

Для увеличения сигнала, поступающего с преобразователя, часто пластины-шайбы из пьезокерамики компонуют в столбик (рисунок 4.9, *б)*.

4.3.3 Термоэлектрический преобразователь (термопара) представляет собой чувствительный элемент, состоящий из двух разных проводников или полупроводников, соединенных электрически, и преобразующий контролируемую температуру в ЭДС.

Принцип действия термоэлектрического преобразователя основан на использовании термоэлектродвижущей силы, возникающей в контуре из двух разнородных проводников *A* и *B,* места соединения (спаи) которых нагреты до различных температур (рисунок 4.10, *а).* Знак и значение термо-ЭДС в цепи зависят от типа материалов и разности температур в местах спаев. При небольшом перепаде Δθ температур между спаями термо-ЭДС E_{AB} можно считать пропорциональной разности температур Δθ:

$$E_{AB} = K_{SAB}\Delta\theta,$$

где Ks_{AB} – чувствительность термопары.

Если к термопаре подключить милливольтметр с сопротивлением R_H, то по значению термо-ЭДС можно определить температуру (рис. 4.10, *б).* Чтобы получить достоверные результаты, необходимо один спай термопары, называемый рабочим, поместить в среду с температурой θ_1 подлежащей измерению, а температуру θ_0 других – нерабочих (холодных; свободных) спаев поддерживать постоянной. Уравнение преобразования будет иметь вид

$$E_{AB} = f(\theta_0\theta_1) = f(\theta_1) - C = f(Q_1),$$

где $C = f(\theta_0)$ – постоянная величина.

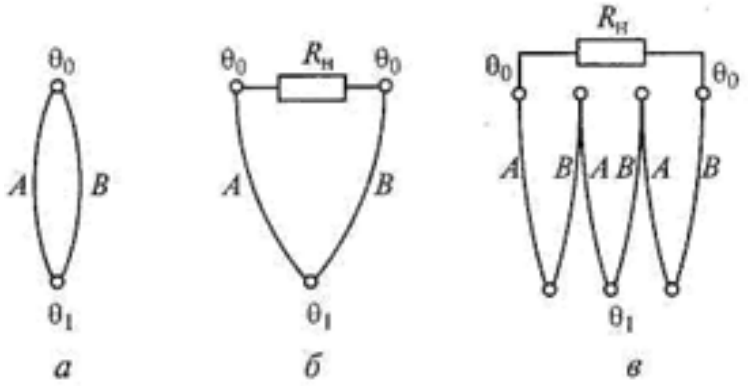


Рисунок 4.10 – Схема включения термопар: *а* контур из двух разнородных проводников; *б* – термопара с милливольтметром; *в* – последовательное соединение термопар

Обычно термо-ЭДС не рассчитывают аналитически, а определяют по градуировочным таблицам или графикам, получаемым экспериментально, для различных материалов при температуре холодных спаев $\theta_0 = 0$.

При включении в цепь термопары измерительного прибора или другого преобразователя в местах подсоединения образуются другие спаи, и в общем случае такую цепь можно рассматривать как состоящую из трех проводников. Можно показать, что если точки подключения прибора имеют одинаковую температуру, то подключение прибора не влияет на термо-ЭДС измерительной термопары.

В качестве материалов для термопар используют различные драгоценные металлы (платину, золото, иридий, родий) и их сплавы, а также неблагородные металлы и сплавы (сталь, никель, хром, сплавы нихром, копель, алюмель и др.). Сравнительно редко применяют термопары из полупроводниковых материалов: кремния, селена и др.

Полупроводниковые термопары имеют малую механическую прочность, обладают большим внутренним сопротивлением, хотя и обеспечивают большую термо-ЭДС по сравнению с металлами.

Термо-ЭДС возникает только в спаях разнородных материалов. При сравнении различных материалов качестве базовой применяют термо-ЭДС платины, по отношению к которой определяются термо-ЭДС других материалов.

Хотя зависимость $E = f(\theta)$ при $\theta_0 = 0$ является нелинейной, в первом приближении значение термо-ЭДС можно определить по выражению

$$E = e_{\Sigma}(\theta_1 - \theta_0),$$

где e_Σ – суммарная термо-ЭДС материалов термопары.

Суммарную термо-ЭДС определяют по выражению

$$e_{\Sigma} = e_1 - e_2,$$

где e_1 e_2 – термо-ЭДС используемых материалов.

Для термопары стремятся использовать материалы, имеющие разный потенциал по отношению к платине.

Так, если использовать хромель, у которого термо-ЭДС e_x = +31,3 мкВ/°С, и алюмель, у которого e_A = -10,2 мкВ/°С, то термо-ЭДС хромель-алюмелевой термопары составит $E_{XA} = e_x - e_A = 31,3 + 10,2 = +41,5$ мкВ/°С. При выборе материала термопары необходимо учитывать условия эксплуатации (влияние температуры, влажности, загрязненности и других факторов на материал электродов).

Чтобы повысить выходную ЭДС, используют последовательное включение термопар – термобатарею (рисунок 4.9, *в*). В этом случае все свободные спаи должны находиться при постоянной температуре, лучше всего при 0°С.

4.4 Операционные усилители, их параметры и характеристики

4.4.1 Выходные сигналы датчиков и других элементов во многих случаях оказываются слабыми и недостаточными для приведения в действие последующих элементов систем автоматического управления, например, реле, не говоря уже о таких исполнительных устройствах, как электродвигатели и тяговые электромагниты. Поэтому возникает необходимость усиления сигналов управления, измерения и контроля с помощью усилителей.

Усилителем называется устройство, предназначенное для увеличения мощности сигнала за счет энергии дополнительного источника питания; при этом выходная (усиленная) величина *y* является функцией входного сигнала *x* и имеет одинаковую с ним физическую природу. Усилители относятся к активным элементам автоматики.

Наиболее широкое применение в автоматике нашли операционные усилители за счет своей универсальности и многофункциональности. При этом они обладают высокой чувствительностью, допускают сравнительно простую регулировку коэффициента усиления, хорошо сочетаются с электрическими исполнительными устройствами (двигателями, электромагнитами и т.п.).

Операционные усилители (ОУ) представляют собой специальные усилители постоянного тока. Электрические схемы ОУ весьма разнообразны. ОУ могут быть с одним или двумя входами.

Различают также ОУ с параметрической компенсацией дрейфа нуля, преобразованием сигнала и автоматической коррекцией дрейфа нуля. В усилителях с непосредственными связями компенсация дрейфа нуля осуществляется за счет построения входных каскадов по симметричной балансной или дифференциальной схемам. В усилителях с преобразованием сигнала для усиления постоянной составляющей используется импульсная стабилизация типа модуляция - усиление - демодуляция.

4.4.2 Наиболее широкое распространение получили ОУ без преобразования сигнала, где входной каскад построен по дифференциальной схеме. ОУ этого типа состоят из каскадов: дифференциального усилителя, схемы смещения уровня напряжений, выходного усилителя мощности.

Простой дифференциальный каскад включает в себя три транзистора (рисунок 4.11, *а*).

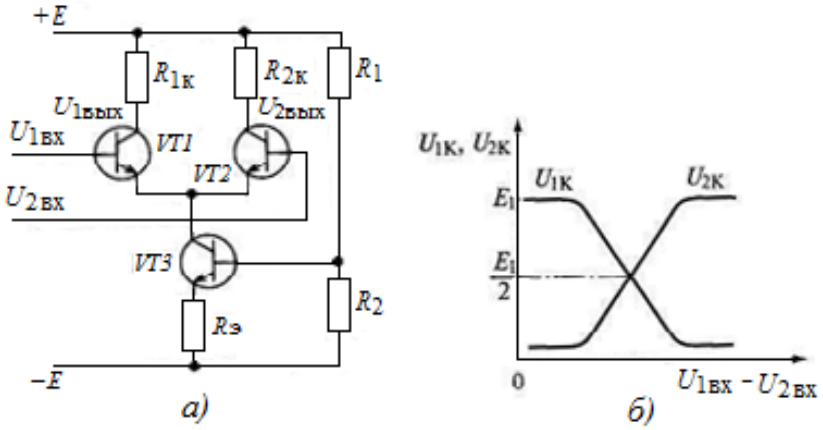


Рисунок 4.11 - Дифференциальный каскад ОУ без преобразования

Транзистор *VT3* работает в режиме генератора тока. Коллекторный ток этого транзистора задается стабильным напряжением на делителе R_1 R_2 и сопротивлением $R_Э$. При равенстве $U_{1вх}$ и $U_{2вх}$ ток I_3 транзистора *VT3*

протекает равными частями через транзисторы *VT1* и *VT2*. В коллекторах этих транзисторов устанавливается напряжение

$$U_{1\text{вых}} = U_{2\text{вых}} = E_1 - R_{1k}I_3/2 = E_1 - R_{2k}I_3/2.$$

Напряжения U_1*вых* и U_2*вых* равны $E_1/2$. В зависимости от разности U_1вх и U_2вх выходные напряжения меняются, как показано на рисунке 4.11, *б*.

Схема смещения уровня постоянного напряжения, которое устанавливается на коллекторах транзисторов дифференциального каскада, показана на рисунке 4.12, *а*.

На базе транзистора *VT2* устанавливается напряжение $E_2/2$, через этот транзистор протекает ток Iэ = $E_2/2R_4$. На эмиттер транзистора *VT1* подается напряжение $U_K = E_1/2$ (положительной полярности). Коллекторный ток транзистора *VT2* $I_K = I$э создает падение напряжения на резисторе $R_3I_K = E_1/2$.

В результате напряжение положительной полярности эмиттера *VT1* полностью падает на резисторе R_3 и напряжение U_1*вых* будет равняться нулю.

Выходной каскад строится на сдвоенном эмиттерном повторителе. Когда напряжение U_1*вых* положительное, открывается транзистор *VT1*, обеспечивающий выходной ток. Отрицательная полярность U_1*вых* открывает транзистор *VT2*, также обеспечивая выходной ток (рисунок 4.12, *б)*.

На графическом изображении ОУ (рисунок 4.12, *в)* указаны следующие выводы: 1 – инвертирующий вход, 2 – неинвертирующий вход, 3 – подключение положительного источника питания, 4 – подключение отрицательного источника питания, 5 – выходной сигнал. Частотная характеристика ОУ приведена на рисунке 4.12, *г.*

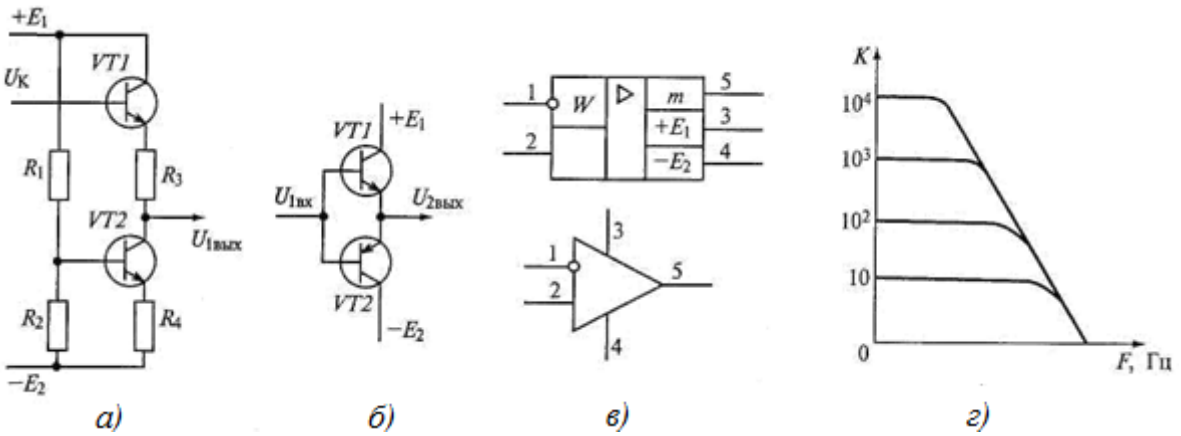


Рисунок 4.12 – Операционный усилитель без преобразования сигнала

Любой операционный усилитель имеет следующие параметры:

- входное сопротивление – дифференциальное сопротивление переменному току;

- средний входной ток, при отсутствии сигнала не превышающий сотен наноампер;

- входной ток сдвига Iвх = Iвх$^+$ - Iвх$^-$ – разность между входными токами (он в несколько раз меньше среднего входного тока);

- напряжение смещения (прикладывается к одному из входов, для получения Uвых = 0), равное 1мВ

- температурный дрейф напряжения смещения $\Delta U_{см}/\Delta T = (1-5)$ мкВ/С^o;

- выходное сопротивление, составляющее 1 ...5 кОм;

- коэффициент усиления в пределах 10^2... 10^5;

- полоса пропускания – полоса частот, в выходное напряжение уменьшается не более чем до 0,7 от максимального значения;

- скорость нарастания выходного напряжения $p = U_{вых}/t$;

- время установления выходного напряжения, определяемое между уровнями (0,1...0,9) $U_{вых}$ и составляющее единицы мкс;

- максимальный выходной ток, составляющий 5 мА и более.

Для ОУ принципиальное значение имеют три параметра*: p*, $R_{ВХ}$, $U_{СМ}/T$.

Любой из параметров ОУ можно улучшить за счет ухудшения других.

4.4.3 На рисунке 4.13, *а* приведена базовая схема двухкаскадного универсального ОУ, содержащая входной дифференциальный усилитель на транзисторах *VT1*... *VT4* и второй каскад усиления с общим эмиттером – транзисторы *VT5* и *VT6*. На выходе схемы включен двухтактный усилитель мощности – эмиттерный повторитель, работающий в режиме АВ. Второй каскад работает как интегратор на высоких частотах, поскольку на инвертирующем входе (базе *VT5)* включен конденсатор коррекции C = 30 пФ.

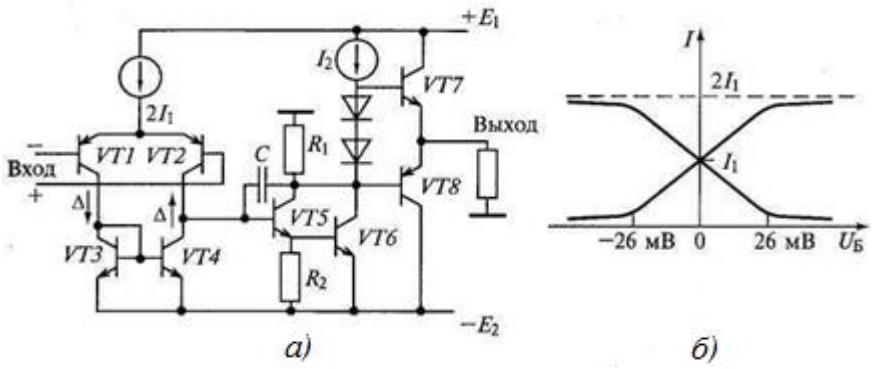


Рисунок 4.13 – Универсальный операционный усилитель

Работу входного дифференциального каскада можно проиллюстрировать диаграммой распределения токов, показанной на рисунке 4.13, *б*. При равенстве входных напряжений токи эмиттеров транзисторов *VT1* и *VT2* равны по значению I_1, поэтому одинаковы и токи эмиттеров *VT3* и *VT4*. При этом полагают, что базовые токи транзисторов пренебрежимо малы. При идентичности технологических параметров токи транзисторов *VT4* и *VT3* всегда будут равны.

Такое включение транзисторов называют «зеркалом токов». Нагрузка «зеркало тока» удваивает I_1вых на выходе первого каскада. Далее сигнал усиливается вторым каскадом на транзисторах *VT5* и *VT6* и поступает на

усилитель мощности ОУ, построенный на транзисторах *VT7* и *VT8.* Токи I_1 и I_2 каскадов ОУ стабилизируются различными по конфигурации схемами внутренней стабилизации. Коэффициент усиления по напряжению ОУ на низкой частоте *K* равен произведению коэффициентов усиления каскадов.

Полная принципиальная схема двухкаскадного ОУ отличается от схемы-модели большим числом вспомогательных элементов, обеспечивающих надежную работу микросхем при изменяющихся внешних условиях (температуре, напряжении питания). Операционный усилитель КР140УД7 имеет более сложный входной усилитель, что позволяет повысить входное сопротивление до 100 кОм.

В состав ОУ входит стабилизатор, схема которого имеет внутренний конденсатор коррекции *C* = 30 пФ, поэтому АЧХ ОУ полностью скорректирована. Наклон логарифмической АЧХ, составляющий -20 дБ на декаду, и постоянный фазовый сдвиг на высоких частотах, равный 90°, допускают использование ОУ в режиме повторителя без дополнительной частотной коррекции, как это видно из схемы включения (рисунок 4.14, *а*). Для увеличения скорости нарастания выходного напряжения до 10 В/мкс к выводу 12 подключают емкость *C*1 = 150 пФ (рисунок 4.14, *б).* Схема балансировки ОУ состоит из одного внешнего переменного резистора, подключенного к выводам 3 и 9.

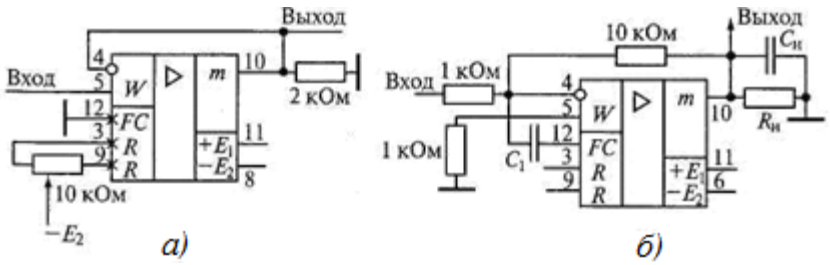


Рисунок 4.14 – Операционный усилитель КР140УД7

4.4.4 Операционный усилитель К157УД1 представляет собой мощный усилитель с выходным током до 0,5 А (рисунок 4.15).

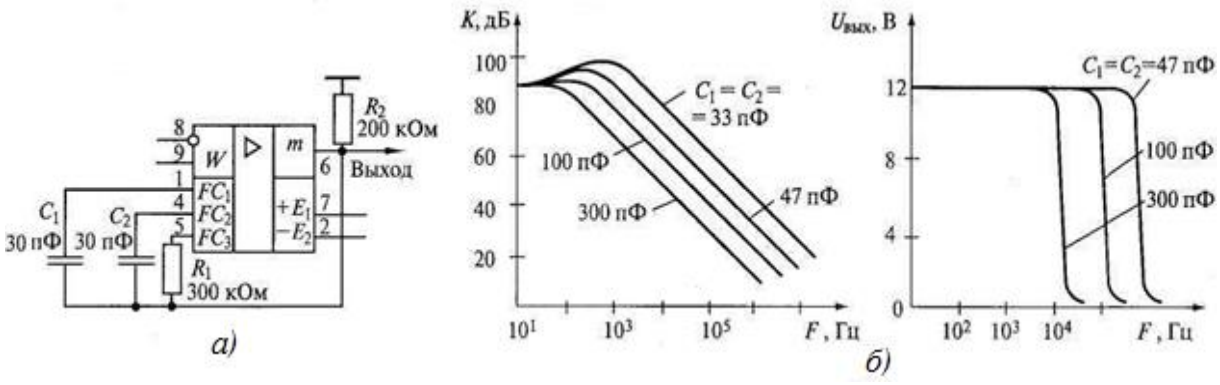


Рисунок 4.15 - Схема включения (а) и частотные характеристики (б) мощного ОУ типа К157УД1

Построенный по классической двухкаскадной схеме на основе полупроводниковой технологии с изоляцией *p-n* – перехода (рисунок 4.15, *а)*, кристалл ОУ помещен в прямоугольный пластмассовый корпус, позволяющий рассеивать значительную мощность. Характеристики ОУ приведены на рисунке 4.15, *б.*

Рассмотрим методику расчета некоторых ОУ. На рисунке 4.16, *а* представлена схема инвертирующего усилителя. Для расчета элементов этого усилителя воспользуемся двумя положениями:

- напряжения на инвертирующем и не инвертирующем входах равны, т.е. $U+ = U-$;

- входной ток усилителя равен нулю по любому из входов, $I_1 = I_2 = 0$.

В этом случае $U+ = 0$ и $U- = 0$. Следовательно, входной ток $I_{вх} = U/R_1$. Ток I_2, протекающий через резистор R_2, равен U/R_2. Так как ток $I_{вх} = I_2$, то $U_{вх}/R_1 = U_{вых}/R_2$, и коэффициент передачи

$$K = U_{вых}/U_{вх} = R_2/R_1.$$

Инвертор-усилитель с линейной зависимостью усиления от положения движка показан на рисунке 4.16, *б*. Его передаточное уравнение имеет вид

$$U_{вых} = – kR_2U_{вх}/R_1,$$

где k – часть переменного сопротивления R.

В схеме повторителя, приведенной на рисунке 4.16, *в,* выполняются равенство

$$U_{вых} = U_{вх}.$$

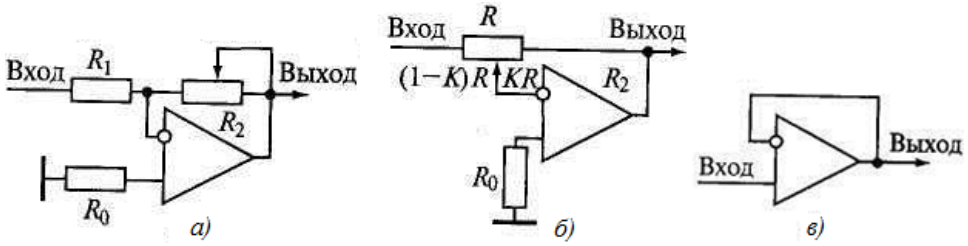


Рисунок 4.16 –Схемы включения ОУ

4.5 Логические элементы и их назначение

Логические элементы – устройства, осуществляющие определенную связь между входными и выходными величинами. Элементарный логический элемент имеет два входа и один выход. Сигналы на них дискретны, т. е. принимают одно из двух возможных значений – 1 или 0. Поэтому устройства, оперирующие дискретными сигналами, называют дискретными. За единицу иногда принимают наличие напряжения, а за нуль – отсутствие его.

Математическим аппаратом анализа и синтеза систем служит алгебра логики, принимающими только два значения, «0» и «1». Ниже рассмотрим основные положения алгебры логики.

Логической переменной называют входную величину, которая может принимать только два противоположных значения: x = 1 или x = 0. Логической функцией называют зависимость выходной величины от входных, и сам выходной сигнал, который тоже может принимать только два значения: y = 1 или y = 0. Логическая операция – это действие, которое совершает логический элемент с логическими переменными в соответствии с логической функцией. Значения 1 и 0 взаимно противоположны (инверсны): 1 = 0, 0 = 1.

При преобразовании формул алгебры логики сначала выполняют операции инверсии, затем умножения, сложения и затем все остальные.

Каждая элементарная логическая функция может быть технически реализована простыми элементами, к которым относятся элементы И, ИЛИ, НЕ и их комбинации И-НЕ, ИЛИ-НЕ.

Элементы НЕ реализуют логические отрицание – инверсию. Элементы И (конъюнкторы) выполняют логическое умножение. Элементы ИЛИ (дизъюнкторы) осуществляет логическое сложение.

Триггером называется устройство, состоящее из цепей управления и элемента памяти, обладающего двумя состояниями устойчивого равновесия, скачкообразно переходящего из одного в другое. Триггеры классифицируется по функциональному признаку и по способу записи информации в элементе памяти. По функциональному признаку разделяют на триггеры с раздельным запуском RS – триггеры, со счетным пуском Т – триггер, с элементами задержки D – триггер, универсальные JK – триггеры.

В качестве примера рассмотрим триггер с раздельным запуском RS и триггер, со счетным пуском Т – триггер, как наиболее широко используемые в цифровых устройствах управления (рисунок 4.17).

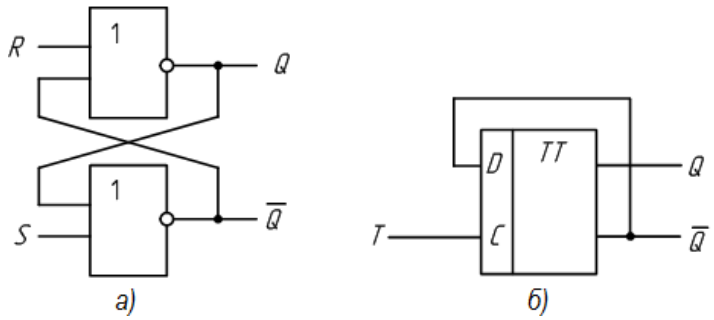


Рисунок 4.17 - RS- триггер (а) и Т – триггер со счетным пуском (б)

Состояние триггера определяется состоянием прямого выхода. Простейший RS-триггер состоит из двух логических элементов, охваченных перекрёстной положительной обратной связью (рисунок 4.17, *а*).

В исходном положении пусть R=0, S=1. Нижний логический элемент выполняет логическую функцию ИЛИ-НЕ, т.е. 1 на любом его входе приводит

к тому, что на его выходе будет логический ноль $\overline{Q}$=0. На выходе Q будет 1 (Q=1), т.к. на оба входа верхнего элемента поданы нули (один ноль - со входа R, другой - с выхода $\overline{Q}$). Триггер находится в единичном состоянии. Если теперь убрать сигнал установки (R=0, S=0), на выходе ситуация не изменится, т.к. несмотря на то, что на нижний вход S нижнего логического элемента будет поступать 0, на его верхний вход поступает 1 с выхода верхнего логического элемента. Триггер будет находиться в единичном состоянии, пока на вход R не поступит сигнал сброса. Пусть теперь R=1, S=0. Тогда Q=0, а $\overline{Q}$=1. Триггер переключился в "0". Если после этого убрать сигнал сброса (R=0, S=0), то все равно триггер не изменит своего состояния.

Счётный триггер (рисунок 4.17, *б*) имеет один счётный информационный вход. Триггер переключается каждый раз в противоположное состояние, когда на вход T поступает управляющий сигнал.

Для лучшего понимания функций выполняемых логическими элементами (рисунок 4.18, *а*) рассмотрим их в сравнении с принципом действия релейно-контактной схемы (рисунок 4.18, *б*).

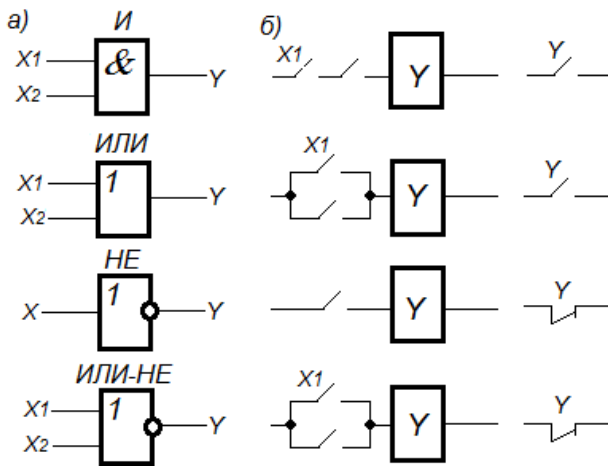


Рисунок 4.18 - Основные логические элементы (а) и релейно-контактный эквивалент (б)

Если считать, что замкнутые контакты соответствуют единичному сигналу, а разомкнутые – нулевому, то элемент И можно представить в виде обмотки реле y подключенной к последовательно соединенным контактам x_1 и x_2 (рисунок 4.18, *б*). В случае если оба контакта замкнуты, то по катушке пойдет ток, реле сработает и его контакты замкнутся.

Элемент ИЛИ можно представить, как два замыкающих контакта, соединенных параллельно (рисунок 4.18, *б*). При замыкании или первого, или второго из них реле срабатывает и замыкает свои контакты, через которые пойдет сигнал.

Элемент НЕ можно представить, как один замыкающий контакт x и один размыкающий y (рисунок 4.18, *б*). Если сигнал на вход не подавать (x = 0), то реле не срабатывает и контакты у остаются замкнутыми, ток через них

проходит. Если же замкнуть контакты x, реле сработает и разомкнет свои контакты, тогда сигнал на выходе будет равен нулю.

Элемент ИЛИ-НЕ можно представить, как два замыкающих контакта, соединенных параллельно (рисунок 4.18, *б*). При замыкании или первого x_1, или второго x_2 из них реле срабатывает и размыкает свои контакты y, через которые сигнал не пойдет и будет равен нулю.

На рисунке 4.19 изображена схема, выполняющая операцию ИЛИ-НЕ выполненной на полупроводниках. Если ни на один из входов не подавать сигнал, то транзистор останется закрытым, ток через него не потечет, а напряжение на выходе будет равно ЭДС источника $E_П = U_y$, т. е. $y = 1$.

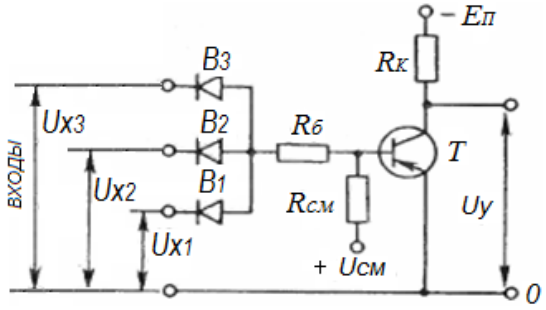


Рисунок 4.19 - Схема логического элемента ИЛИ-НЕ, выполняющего логические операции

Если хотя бы на один из входов подать напряжение, то сопротивление транзистора упадет от ∞ до 0 и по цепи эмиттер - коллектор потечет ток. Падение напряжения на транзисторе станет равным нулю (Uy = 0). Это означает, что сигнала на выходе нет, т. е. $y = 0$. Для нормальной работы элемента необходимо создавать смещение потенциала базы относительно общей точки, это достигается специальным источником Uсм и резистором Rсм. Резистор Rб ограничивает ток база - эмиттер.

Рассмотрим несколько узлов электрических схем, наиболее часто встречающихся в электроприводе (рисунок 20).

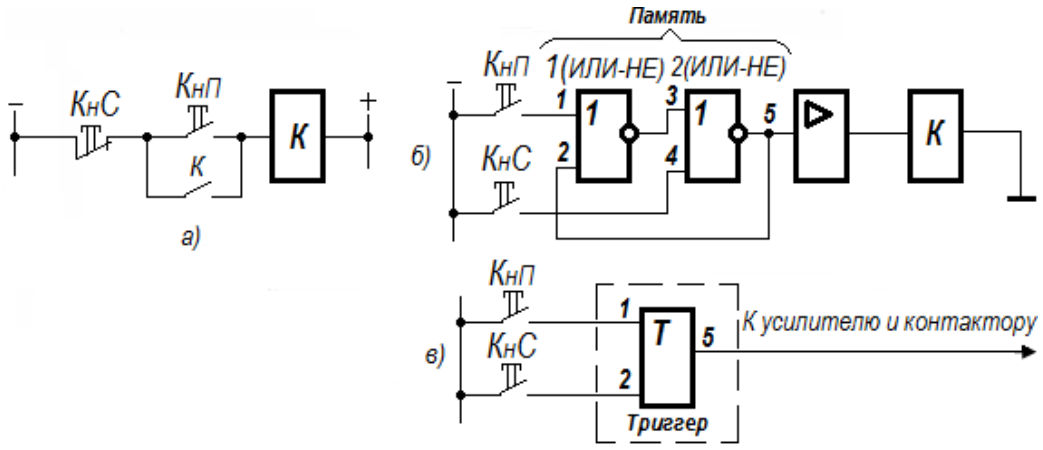


Рисунок 4.20 - Узлы схем с логическими элементами

На рисунке 4.20, *а* показан узел питания катушки контактора К. При нажатии кнопки КнП ток проходит по линии и срабатывает контактор. Его главные контакты (на схеме не показаны) подключают двигатель к сети, а контакты К, замыкаясь, шунтируют кнопку КнП. Теперь ток будет протекать по этим контактам, а кнопку КнП можно отпустить. Под действием пружины она размыкает свои контакты, но катушка будет продолжать питаться через контакты К. При нажатии кнопки КнС линия разрывается и контактор отпускается.

Этот узел можно выполнить на логических элементах (рисунок 4.20, *б*). В схему входят катушка контактора К, кнопки КнП и КнС, два логических элемента ИЛИ — НЕ с номерами входа и входа (1 – 5) и усилитель. Исходное состояние $x_1 = 0$ и $x_2 = 0$, тогда на выходе элемента 1 получим $y_1 = x_1 + x_2 = 0 + 0 = 1$. На выходе элемента 2 (выход 5) сигнал $y_2 = x_3 + x_4 = 1 + 0 = 0$, т. е. катушка обесточена, реле не срабатывает.

Если нажать КнП, то $y_1 = x_1 + x_2 = 1 + 0 = 0$. На выходе элемента 2 сигнал $y_2 = x_3 + x_4 = 0 + 0 = 1$. По катушке проходит ток и контактор срабатывает. Сигнал y_2 подается на вход x_2, но y_1 от этого не меняется, так как $y_1 = x_1 + x_2 = 1 + 1 = 0$. Таким образом, катушка контактора находится под током.

Если нажать кнопку КнС, то на вход второго элемента будет подаваться сигнал $x_4 = 1$, тогда $y_2 = x_3 + x_4 = 0 + 1 = 0$ и контактор отпускается.

Рассмотренная схема способна "запоминать" команды: сигнал y_2 остается неизменным, даже если отпустить кнопку.

Такую же функцию памяти можно осуществить с помощью триггера (рисунок 4.20, *в*). Если на вход подать сигнал $x_1 = 1$, то на выходе появится сигнал у = 1 и будет оставаться неизменным до тех пор, пока не нажмем кнопку КнС. Тогда триггер переключается и на выходе появляется сигнал $y = 0$. Он будет оставаться без изменения до тех пор, пока снова не нажмем кнопку КнП.

В логических элементах используется различные компоненты – интегральные микросхемы, транзисторы, диоды и т.д.

На рисунке 4.21 представлены логические элементы в виде интегральных микросхем.

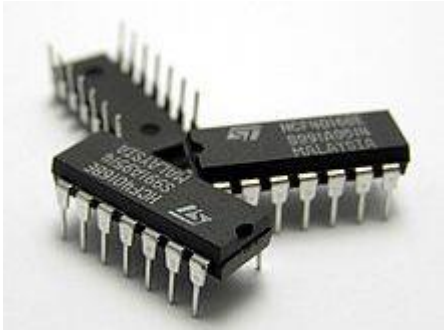


Рисунок 4.21 – Логические элементы в виде интегральных микросхем

Типовые узлы с логическими элементами широко применяют в более сложных схемах, причем такие схемы гораздо проще, чем схемы на релейно-контакторной аппаратуре.

Триггеры предназначены для запоминания двоичной информации. Использование триггеров позволяет реализовывать устройства оперативной памяти (то есть памяти, информация в которой хранится только на время вычислений). Однако триггеры могут использоваться и для построения некоторых цифровых устройств с памятью, таких как счётчики, преобразователи последовательного кода в параллельный или цифровые линии задержки.

4.6 Аналоговые и цифровые компараторы. Принцип построения арифметико-логического устройства

4.6.1 Компаратор - это сравнивающее устройство. Аналоговый компаратор предназначен для сравнения непрерывно изменяющихся сигналов. Аналоговые компараторы строятся на базе операционных усилителей ОУ (рисунок 4.22).

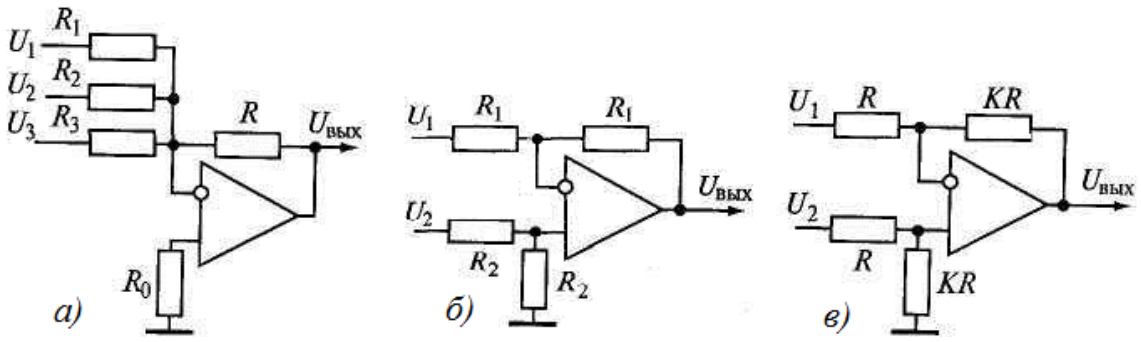


Рисунок 4.22 – Схемы включения аналоговых компараторов на ОУ

На рисунке 4.22, *а* показана схема инвертирующего сумматора, выходной сигнал которого описывается выражением

$$U_{вых} = -(U_1R/R_1 + U_2R/R_2 + U_3R/R_3 + \ldots + U_nR/R_n).$$

В каскаде вычитания двух входных сигналов, показанном на рисунке 4.22, *б,* выполняется следующее равенство:

$$I_{вх} = I_{вых},$$

тогда $(U_1 - U+)/R_1 = (U_{вых} - U+)/R_1$ и $U_1 - U+ = U_{вых} + U+$. Учитывая, что $U- = U_2/2 = U+$, получим

$$U - U_2/2 = U_{вых} + U_2/2,$$

или

$$U_1 - U_2/2 - U_2/2 = U_{вых}.$$

Тогда выражение для выходного напряжения запишем в виде

$$U_{вых} = U_{+} - U_2.$$

Усилительное вычитающее устройство показано на рисунке 4.22, *в*, а его передаточная функция описывается выражением

$$U_{вых} = K(U_1 - U_2).$$

4.6.2 Цифровые компараторы являются универсальными элементами сравнения, которые выполняют сравнение двух чисел, заданных в двоичном коде. Цифровые компараторы также относятся к арифметическим устройствам. В зависимости от схемного исполнения компараторы могут определять равенство АВ (А и В-независимые числа с равным количеством разрядов) либо вид неравенства: A > B или A < B. Результат сравнения отображается соответствующим логическим уровнем на выходе.

Компараторы имеют три выхода. Схема одноразрядного компаратора представляет собой структуру логического элемента «исключающее ИЛИ-НЕ» (рисунок 4.23).

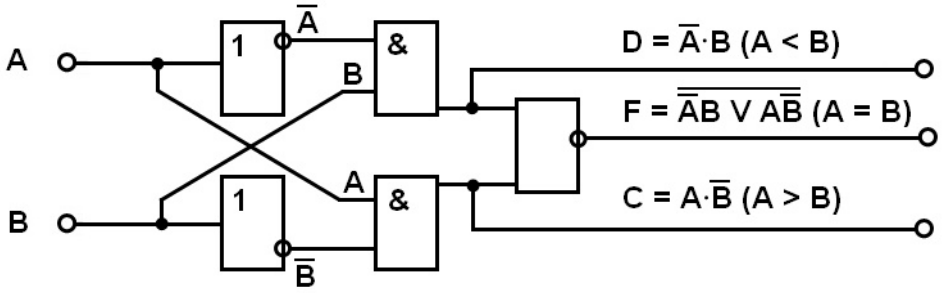


Рисунок 4.23 - Схема одноразрядного компаратора

Из анализа схемы следует, что если A = B, то F = 1, в противном случае, т. е. при A ≠ B, F = 0. Если A > B, т. е. A = 1, B = 0, то C = 1, а если A < B, т. е. A = 0, B = 1, то D = 1.

Если попарно равны между собой все разряды двух n-разрядных двоичных чисел, то равны и эти два числа А и В. Применяя цифровой компаратор для каждого разряда, например, четырехзначных чисел, и определяя значения F1, F2, F3, F4 логических переменных на выходах компараторов, факт равенства A = B установим в случае, когда F = F1 · F2 · F3 · F4 = 1. Если же F = 0, то A ≠ B.

Неравенство A > B обеспечивается (для четырехразрядного числа) в четырех случаях: или $A_4 > B_4$, или $A_4 = B_4$ и $A_3 > B_3$, или $A_4 = B_4$, $A_3 = B_3$ и $A_2 > B_2$, или $A_4 = B_4$, $A_3 = B_3$, $A_2 = B_2$ и $A_1 > B_1$ (где A_4 и B_4 – старшие разряды чисел А и В). Очевидно, что если поменять местами A_1 и B_1, то будет выполняться неравенство A < B.

Цифровые компараторы выпускают, как правило, в виде самостоятельных микросхем. Так, микросхема К564ИП2 (рисунок 4.24)

является четырехразрядным компаратором, в котором каждый из одноразрядных компараторов аналогичен рассмотренной ранее схеме. Данная микросхема имеет расширяющие входы A < B, A = B, A > B, что позволяет наращивать разрядность обоих чисел. Для этого компараторы соединяют каскадно или параллельно (пирамидально).

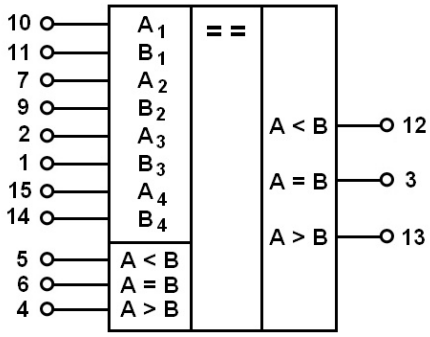


Рисунок 4.24 - Микросхема К564ИП2 четырехразрядного компаратора

Для сравнения двух восьмиразрядных чисел необходимо каскадное соединение компараторов К564ИП2. При этом соединении выходы A = B и A < B предыдущей микросхемы (младшие разряды) подключают к соответствующим входам последующей. На входы A < B, A = B, A > B микросхемы младших разрядов подают соответственно потенциалы U_0 и U_1 (U_0 соответствует логическому 0, а U_1 – «1»). В последующих микросхемах на входах A > B поддерживают потенциал логической единицы U_1.

4.6.3 Главным узлом микропроцессора служит арифметико-логическое устройство - АЛУ. АЛУ обеспечивают выполнение ряда стандартных арифметических и логических операций над прямыми кодами чисел без их преобразования.

Методика построения одноразрядного арифметического устройства для выполнения операций суммирования и вычитания показана на рисунке 4.25.

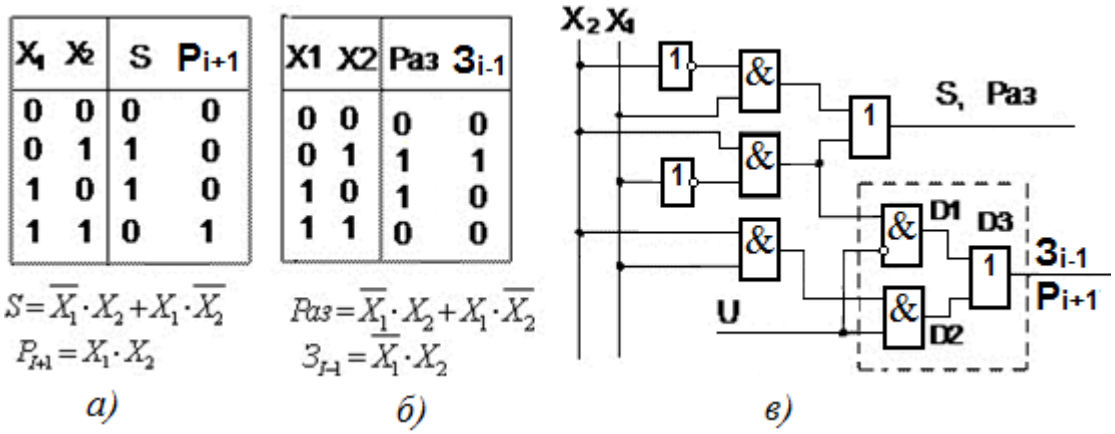


Рисунок 4.25 - Таблицы истинности и структурные формулы операции суммирования - *а*, вычитания - *б* и схема одноразрядного АЛУ - *в*.

Из сравнения логических выражений операций суммирования (Рисунок 4.25, *а*) и вычитания (рисунок 4. 25, *б*) следует, что выражения для суммы и разности совпадают, а выражение для заёма является частью операции суммирования или вычитания.

Таким образом, для выполнения операции вычитания не требуется получение дополнительных сигналов, поэтому и не требуются дополнительные аппаратные затраты. Необходимо лишь обеспечить коммутацию сигналов переноса и заёма в соответствии с кодом операции.

На рисунке 4.25, *в* приведена схема простейшего АЛУ, в которой роль устройства управления выполняют два клапана, управляемые разно полярными сигналами от управляющего напряжения U. Эта часть схемы на рисунке 25, *в* выделена пунктирной линией. При U=0 выполняется операция вычитания, а при U=1 – операция суммирования.

Многоразрядные АЛУ выпускаются в виде интегральных микросхем или входят в состав процессоров, являясь их основой. Так, например, микросхема МС 564ИП3 это 4-разрядное параллельное АЛУ, выполняющая 16 арифметических и 16 логических операций.

4.7 Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, интерполяторы

Системы управления можно классифицировать по характеру сигнала т.е. по виду используемой информации [1,2,6].

Разделение устройств на цифровые и аналоговые связано с формой представления информации, обрабатываемой этими устройствами, и соответствующей аппаратурой для реализации этих устройств. Аналоговая форма представления переменных характеризуется пропорциональностью их различным физическим величинам – напряжению, току, скорости, частоте, углу поворота вала и т. п. Цифровая (числовая) форма представления – обозначение величины цифровым кодом числа с использованием только двух чисел 1 и 0 (двоичный код).

Непрерывные (аналоговые) системы воздействуют на объект в течение всего времени работы, используют монотонно изменяющиеся или непрерывные периодические сигналы.

Работа дискретных систем основана на кусочном изменении (квантовании, дискретизации) сигнала. В импульсных системах осуществляется квантование по времени (управляющее воздействие формируется в течение коротких интервалов времени, разделенных паузами), в релейных – квантование по уровню (позиции), в цифровых используются оба способа.

При цифровом представлении сигнала фиксируется уровень аналогового сигнала на определенном дискретном промежутке времени или уровне сигнала. Тогда непрерывная функция аналогового сигнала аппроксимируется ступенчатой функцией, представляющей собой последовательность значений непрерывной функции в дискретном ряде точек. Эта операция называется

квантованием сигнала [1,2]. Если дискретность осуществляется по времени через равные промежутки времени T_0, то такое квантование называется квантованием по времени (рисунок 4.26, *а*), а если по уровню выходного сигнала, через равные значения q (рисунок 4.26, *а*), то – квантованием по уровню. Интервалы T_0 и q называют шагом квантования.

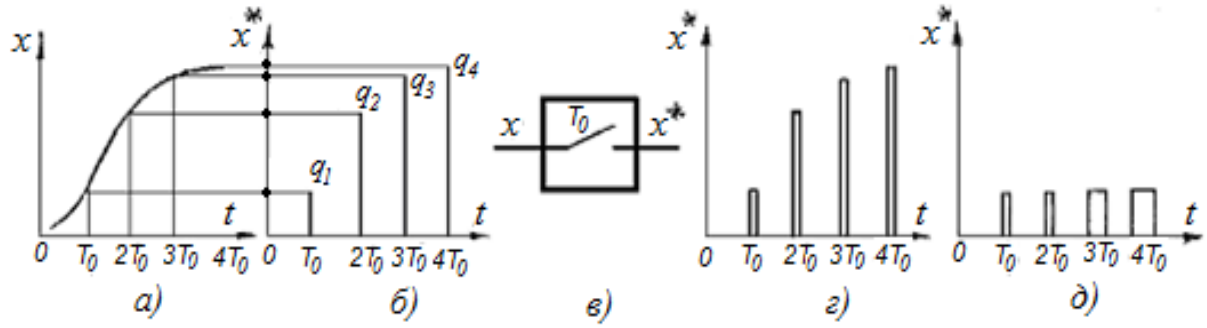


Рисунок 4.26 - Дискретизация величин по времени: *а* – непрерывная функция; *б* – решетчатая функция; *в* – условное обозначение импульсного элемента; *г* – амплитудно-импульсная модуляция; *д* – широтно-импульсная модуляция

При квантовании по времени непрерывный сигнал (рисунок 4.26, *а*) заменяется решетчатой функцией (рисунок 4.26, *б*)

$$x^*(t)=\begin{cases} x(nT_0) \ \ при\ t=nT_0; \\ 0 \ \ при\ t\neq nT_0 \end{cases} \qquad (4.14)$$

где T_0 – период дискретности.

Эта операция осуществляется импульсным элементом – дискретизатором, условное обозначение которого показано на рисунке 4.26, *в*. Обычно дискретизатором является модулятор, который модулирует последовательность импульсов с периодом дискретности T_0 непрерывным входным сигналом по амплитуде импульсов (рисунок 4.26, *г*), амплитудно-импульсная модуляция – АИМ), по длительности, т. е. по ширине импульсов (рисунок 4.26, *д*, широтно-импульсная модуляция – ШИМ). Применяются также модуляции по частоте следования импульсов – частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) и по фазе импульсов фазоимпульсная модуляция (ФИМ).

В результате дискретизации с частотой квантования $\Omega_o=2\pi/To=2\pi f_o$ дискретная функция

$$x^*(\Omega)=\frac{1}{T_0}\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(\Omega-n\Omega_0), \qquad (4.15)$$

записанная при $x(0)=0$, содержит полезный сигнал при частоте Ω_o, полученный из (4.15) при $n=0$, и боковые высоко-частотные гармоники, сдвинутые влево и вправо от nT_0 на частоту, кратную основной частоте, появление которых вызвано потерей информации в интервале между моментами дискретизации.

В цифровых устройствах большее использование находит квантование по уровню, при котором непрерывная функция заменяется дискретной, определяемой по времени на интервалах кванта (рисунок 4.27, *а*). В этом случае непрерывный сигнал представляется в виде его цифрового значения

$$x_q = k\ ent\left|\frac{x}{q}\right|_q = knq \qquad (4.16)$$

где k – крутизна характеристики квантователя (рисунок 5.2) которая равна $k = 1$; *ent* - целая часть; $n = 0, \pm1, \pm2, \ldots$ - номер интервала шкалы квантователя.

Квантование по уровню осуществляется с погрешностью, равной разности между выходным x_q и входным x сигналами

$$\varepsilon_q = x_q - x, \qquad (4.17)$$

показанной на рисунке 4.27, *а*.

Модуль погрешности зависит от вида характеристики квантователя и равен $|\varepsilon| \le q$ *и* $|\varepsilon| \le q/2$ соответственно для характеристик, приведенных на рисунках 4.27, *б* и 4.27, *в*. Условное изображение квантователя, как аналого-цифрового преобразователя (АЦП) показано на рисунке 4.27, *г*.

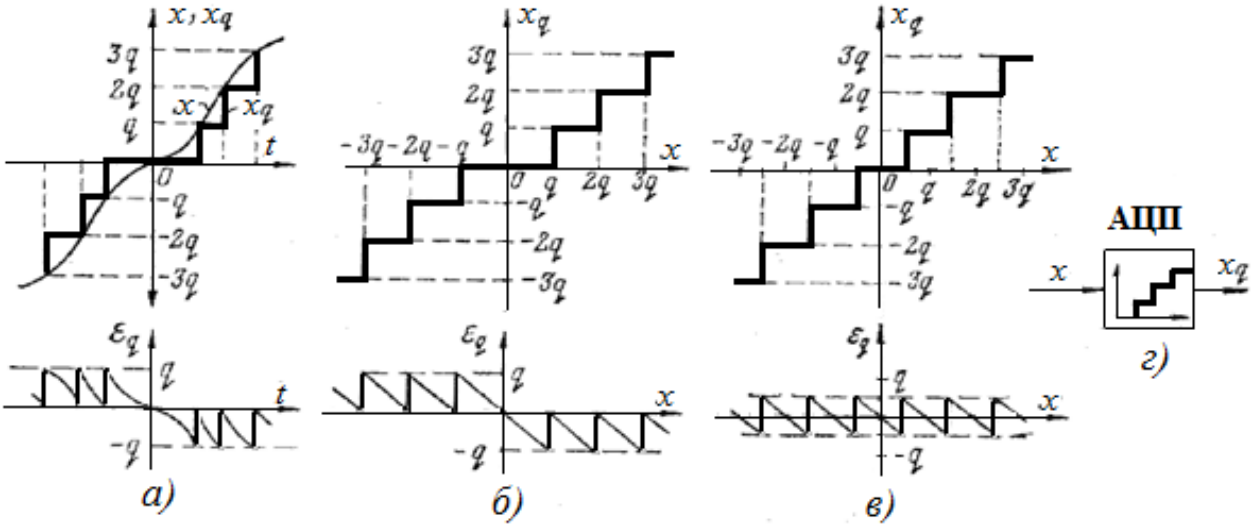


Рисунок 4.27 - Квантование величин по уровню: *а* – замена непрерывной функции дискретной при квантовании по уровню; *б, в* – статические характеристики квантователей и соответствующие им погрешности квантования; *г* – условное обозначение квантователя.

Преобразование дискретизированных сигналов в аналоговые при квантовании по времени называется демодуляцией, а восстановление

огибающей решетчатой функции – интерполяцией. Такие преобразования осуществляют устройства, называемые демодуляторами или интерполяторами. Они являются фильтрами нижних частот. Их условное изображение приведено на рисунке 4.28, *а*.

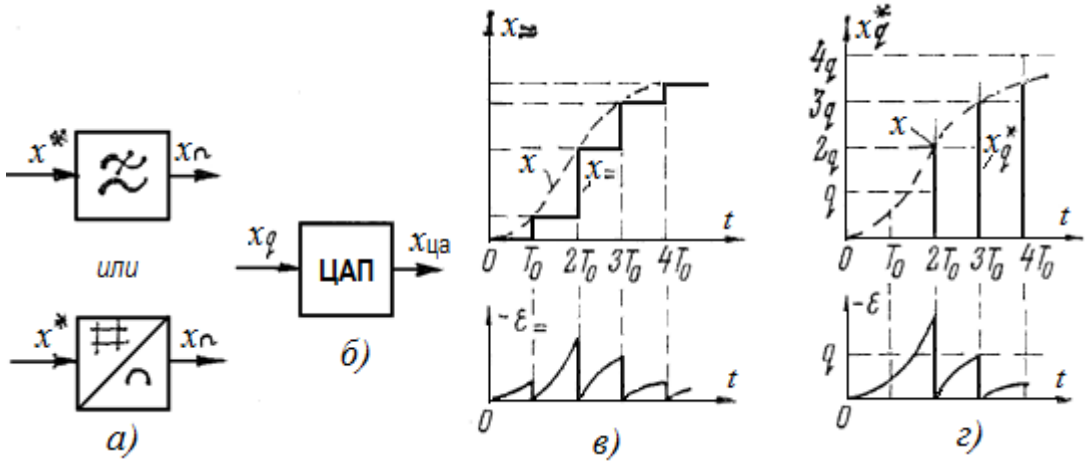


Рисунок 4.28 - Интерполяция величин: *а* – условное обозначение фильтра нижних частот – интерполятора; *б* – условное обозначение цифроаналогового преобразователя; *в* – восстановление огибающей решетчатой функции и ее погрешность; *г* – квантованная по уровню решетчатая функция и погрешность восстановления ее интерполятором.

Дискретизация осуществляется с частотой дискретизации Ω_0 согласно теореме Котельникова [1,2], непрерывная функция *x(t)* полностью определяется своими ординатами, заданными во временной области для последовательных моментов времени, следующих через T_c, если функция *x(t)* не содержит частот выше 0,5 T_c. Отсюда следует, что частота дискретизации должна быть

$$\Omega_0 \geq 2\Omega_{\tilde{N}} \qquad (4.18)$$

где – $\Omega_C = 2\pi / T_c = 2\pi f_0$ наибольшая частота спектра функции *x(t)*.

В системах управления электроприводами наибольшее распространение получили простейшие интерполяторы нулевого порядка, которые фиксируют значение дискретного сигнала в момент дискретизации на весь период дискретности и преобразуют решетчатую функцию в кусочно-постоянную (рисунок 4.28, *в*). Это преобразование происходит с погрешностью интерполяции $\varepsilon_= = x_= - x$, которая может быть уменьшена при использовании сложных интерполяторов более высоких порядков.

Преобразование цифровой информации в аналоговую при квантовании сигналов по уровню выполняется цифроаналоговым преобразователем (ЦАП), условное обозначение которого показано на рисунке 4.28, *б*. ЦАП осуществляет линейное цифроаналоговое преобразование цифрового сигнала x_q в

цифроаналоговую величину $x_{ц,а}$. Фактически величина $x_{ц,а}$ не является аналоговой, а в статическом режиме имеет вид исходной кусочно-постоянной квантованной функции x_q, показанной ранее на рисунке 4.27, *а*.

В цифроаналоговых устройствах и системах управления электроприводами дискретные величины могут представляться как в аналоговой форме $x^*(t)$ (рисунок 4.26, *б*), так и в цифровой $x^*_q(t)$, в виде решетчатой функции, квантованной по уровню с погрешностью $\varepsilon = x_q - x$, (рисунок 4.28, *г*). В первом случае устройства называют импульсными, а во втором – импульсно-кодовыми.

Рассмотрим пример применения интерполятора *(И)* в электроприводе системы числового программного управления (СЧПУ) с шаговыми двигателями *ШД* [1]. Функциональная схема управления одной координатой СЧПУ приведена на рисунке 4.29.

Информация из рабочей памяти *(РП)* поступает в интерполятор, который преобразует информацию, записанную в *РП* в двоичном коде в число импульсов, следующих в единичном унитарном коде по двум информационным каналам, определяющим направление движения исполнительного органа рабочей машины *(ИОРМ)* «вперед» (+) и «назад» (–), что обеспечивает линейную или круговую интерполяцию траектории движения *ИОРМ* между двумя или более заданными точками в случае двух координатной СЧПУ.

В усилителе - формирователе (*УФ)*, импульсы усиливаются и формируются необходимой формы и длительности с крутыми фронтами. Далее импульсы управления поступают в распределитель импульсов *РИ*, усиливаются усилителями мощности *УМ* и распределяются по обмоткам *ШД*. В СЧПУ на металлорежущих станках применяется двигатель типа ШД5Д-1М с шагом 6º и моментом на валу 0,06 Н·м использующийся с гидроусилителем [1,5]. В принципе можно взять любой силовой *ШД*, например, четырехфазный индукторный *ШД* типа ШДА-Ф с шагом 22,5° и моментом до 1 Н·м.

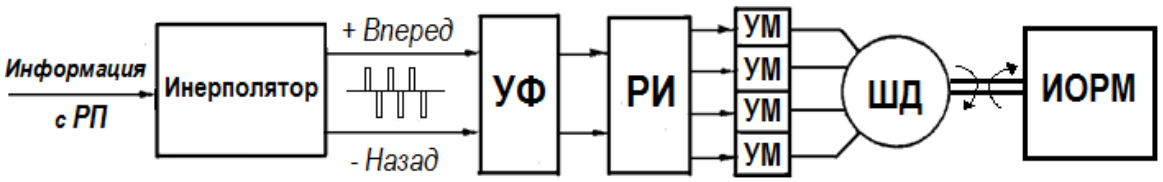


Рисунок 4.29 - Функциональная схема одной координаты импульсно-шаговой СЧПУ

Распределитель импульсов служит для преобразования импульсов управления в многоканальную систему напряжений питания *ШД*. Схем *РИ* существует много. Они построены на основе реверсивных счетных кольцевых схем. В последнее время в связи с развитием микроэлектроники *РИ* выполняются на интегральных микросхемах, построенных на основе сдвиговых регистров и счетчиков с дешифраторами. Одна из таких схем

показана на рисунке 4.30, *а*, где используются две микросхемы, счетчик *D1* и дешифратор *D2* [1,2].

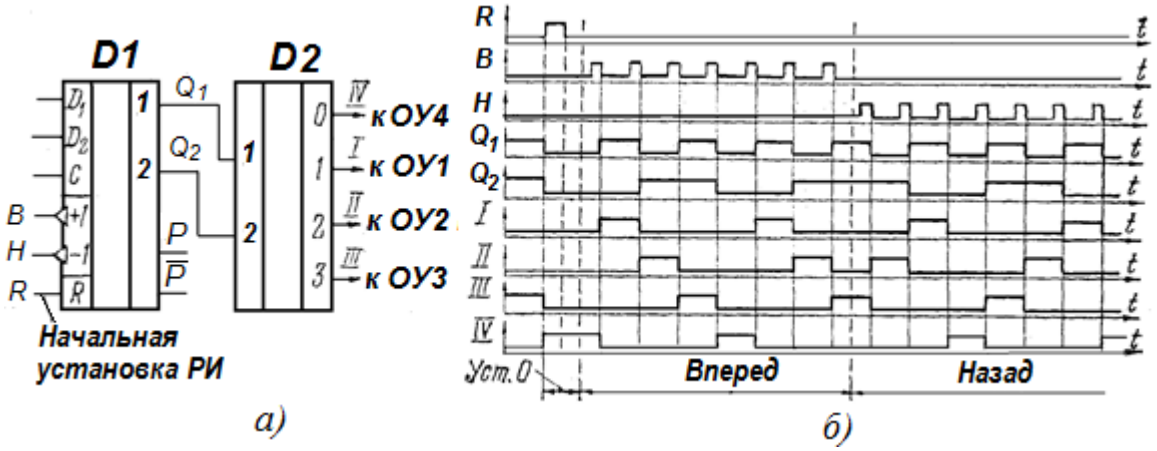


Рисунок 4.30 - Распределитель импульсов: *а* – схема; *б* – диаграмма работы

Управляющие импульсы по каналам «вперед» и «назад» соответственно поступают на суммирующий +1 и вычитающий –1 входы счетчика. При поступлении импульсов команды «вперед» состояние счетчика меняется в направлении десятичного счета 0, 1, 2, 3, 0, 1 и т.д., осуществляя коммутацию фаз ШД в направлении его вращения «вперед», а при приходе команды «назад» – состояние счетчика меняется в направлении уменьшения десятичного числа, записанного в счетчик, 3, 2, 1, 0, 3, 2 и *ШД* вращается в направлении «назад».

Работу такого *РИ* иллюстрируют диаграммы на рисунке 4.30, *б*. Требуемое двоичное число в счетчик записывается на входы *D1* и *D2* (при наличии стробирующего сигнала на входе *C*). По входу *R* счетчик устанавливается в нуль.

Импульсы с *РИ* могут усиливаются операционным усилителем К157УД1 приведенным выше в подразделе 4.4, либо усилителями мощности (*УМ*) на транзисторах (рисунок 4.31). В новых разработках применяется схема (рисунок 4.31, *б*) с обратной связью по току обмотки управления (*ОУ*) *ШД* и релейным управлением включением транзистора *VT*, осуществляемым триггером Шмидта [1,6]. Диод *VD* служит для защиты *ОУ* от перенапряжений.

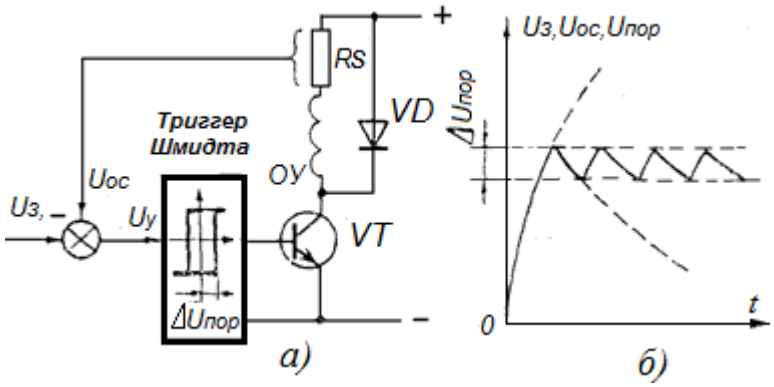


Рисунок 4.31 - Схема усилителя мощности

4.8 Программируемые контроллеры

Для осуществления больших систем программируемого управления (СПУ) используются программируемые контроллеры (программируемые командоаппараты) – *ПК*, представляющие собой специализированную управляющую мини-ЭВМ с устройствами входа и выхода, которые осуществляют логические функции любой схемы управления, записанные в виде введенной в память ЭВМ программы [1,2].

ПК подключается к объекту управления каналами связи и работает с ним в непосредственном взаимодействии в реальном масштабе времени. Такая СПУ (рисунок 4.32) включает в себя программируемый контроллер *ПК*, входные и выходные устройства *ВУ*, устройства силовой автоматики *УСА* и источник питания *ИП*. *ПК* содержит центральное процессорное устройство (*ЦПУ)*, обеспечивающее хранение и реализацию управляющей программы, и устройства сопряжения с входами $УС_{вх}$ и выходами $УС_{вых}$ осуществляющие согласование параметров электрических внешних и внутренних цепей СПУ, и автономный источник питания *АИП*. Входными устройствами являются командные органы *КО* и датчики индикации состояния объекта управления *Д*, выходными – исполнительные элементы управления *ИЭУ* и сигнализации *ИЭС* и электрические двигатели *ЭД*.

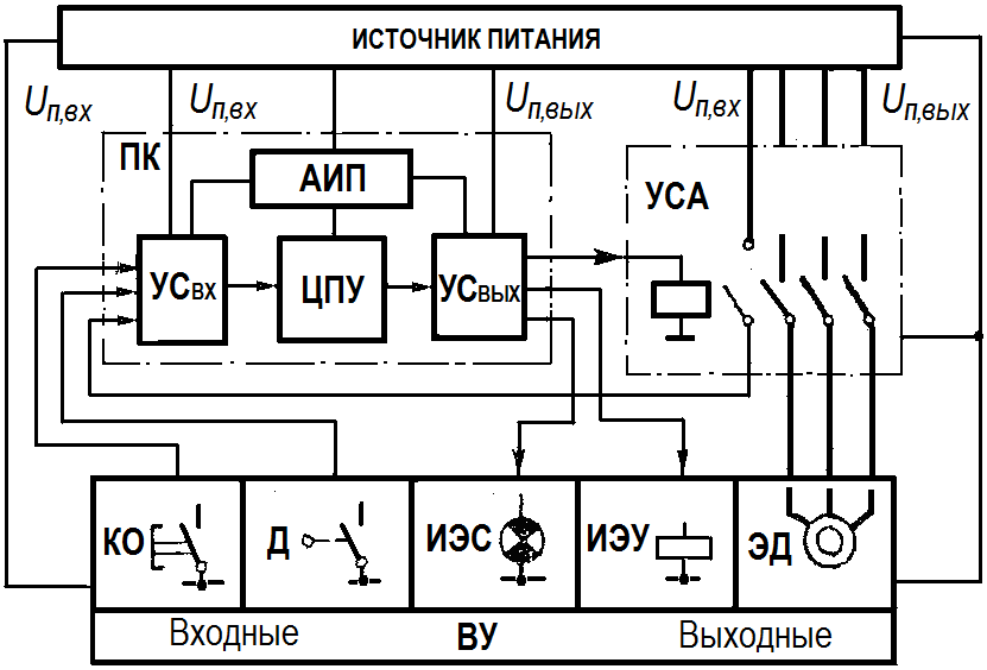


Рисунок 4.32 – Структурная схема системы управления с ПК

Такие *ПК* надежны, имеют малую трудоемкость введения и отладки программы и позволяют осуществлять индикацию работы схемы с помощью световой сигнализации и дисплея и проводить диагностику их работы. Два источника питания в *ПК* (*ИП* и *АИП*) обеспечивают энергозависимую и

энергонезависимую памяти. При этом первая не сохраняет (обнуляет) свои данные при отключении внешних источников энергии, являясь как бы нулевой защитой *ПК*, а вторая сохраняет свои данные при отключении энергии, сохраняя тем самым алгоритм работы процессора, содержание команд, необходимых для реализации рабочей программы.

Структура *ПК* организуется по блочно-модульному принципу, что позволяет подобрать конкретный комплект модулей в соответствии с характеристиками автоматизированного объекта. При этом можно реализовать как простые схемы управления циклами, так и сложные системы комплексного управления оборудованием с решением задач технической диагностики, неисправностей и т. д.

Принцип действия *ПК* объясняется его функциональной схемой (рисунок 4.33).

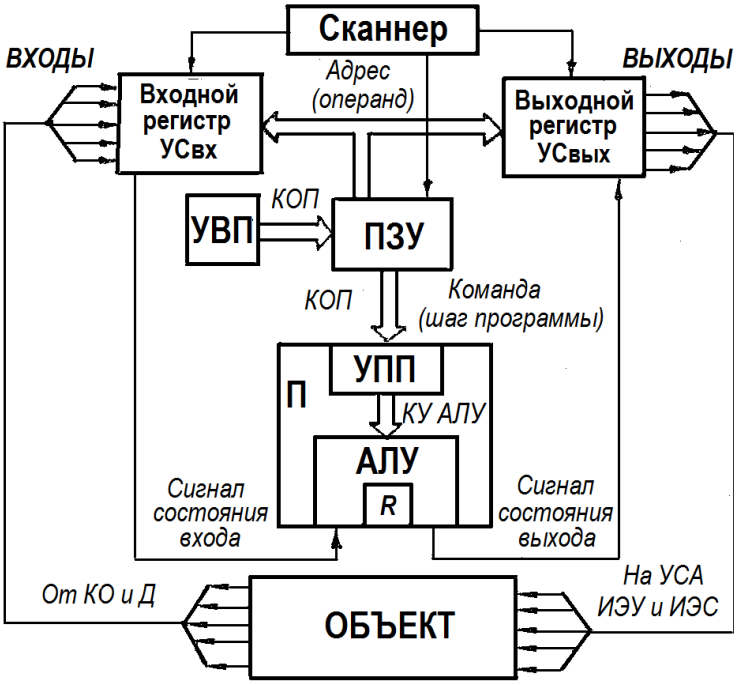


Рисунок 4.33 - Функциональная схема программируемого контроллера

Вначале *ПК* работает в режиме записи программы, которая набирается на программной панели (загрузчике программы) и записывается (загружается) в постоянное запоминающее устройство (*ПЗУ*). Далее *ПК* переключается в режим работы, в котором сканнер (генератор тактовых импульсов) последовательно опрашивает *ПЗУ* и входные и выходные регистры устройств сопряжения с входами и выходами, и согласно адресу программы (операнда) выбираются соответствующие ячейки регистров ввода и вывода и подключаются к процессору. Процессор в соответствии с командами (шагами) программы, поступающих из *ПЗУ*, совершает логические операции над сигналами входов и выходов и преобразует состояние входов в состояние выходов. Если состояние входов не изменилось по сравнению с предыдущим

циклом опроса, то процессор подтверждает текущее состояние выходов; если изменилось, то процессор изменяет состояние выходов, согласно программе, записанной в *ПЗУ*. Опрос участков программы производится циклично, один за другим, в порядке размещения их в программе с возвращением к началу программы после окончания полного цикла опроса.

Центральной частью *ПК* является процессор *П*, структура которого определяет параметры *ПК*: быстродействие, систему команд, число входов и выходов, количество таймеров и счетчиков, объем памяти для хранения программы. Процессором выполняются операции считывания и обработки команд, запроса операндов из памяти, передачи управляющих команд на выходные устройства. Процессор состоит из арифметическо-логического устройства *АЛУ* которое осуществляет логические операции программы; устройства управления процессора *УУП*, обеспечивающего преобразование кода программы в код управления *АЛУ* (*КУАЛУ)*; регистра памяти результата вычисления *R;* счетчиков адресов шагов программы *(САШП)* и адресов запоминающего устройства *СА3У*, считывающих соответственно шаги программы и операнды (адреса входа); шин адреса для передачи адреса шагов программы и шин данных для передачи операндов.

Связь процессора с модулями входа – выхода реализуется через модули процессора, называемые адаптерами, с их помощью осуществляются передача текущего значения входного сигнала в *ПЗУ* и выдача управляющих воздействий на выходные модули, адрес которых задан операндом. Если управление в модулях выхода выполняется не дискретными исполнительными сигналами, а аналоговыми, то используются цифро-аналоговые преобразователи *(ЦАП)*, а том случае если на вход *ПК* с объекта поступают аналоговые сигналы, то используются аналого-цифровые преобразователи (*АЦП)*.

Рабочий цикл *ПК* разделяется на три этапа. На первом этапе, называемом сканированием входных сигналов, происходит загрузка в *ПЗУ* опрашиваемых входных модулей. На втором этапе обеспечивается обработка программы, а на третьем, заключительном — передача управляющих сигналов выходные модули. Возможно, совмещение во времени этих этапов. Время цикла определяется длиной программы. Окончание программы и переход к другому циклу в *ПК* осуществляются двумя способами: командой конца программы и обработкой всего объема *ПЗУ*.

Компания ОВЕН (Россия) непрерывно развивается по сей день, расширяя ассортимент средств промышленной автоматизации собственной разработки на современной элементной базе. Их средства автоматизации успешно конкурируют с другими производителями, а именно - программируемые логические контроллеры.

Контроллеры выпускаются четырех серий:

- Контроллеры с HMI для локальных систем автоматизации ОВЕН ПЛК63/ПЛК73.

- Контроллеры для малых систем автоматизации ОВЕН ПЛК100 / ПЛК150 / ПЛК154.

- Моноблочные контроллеры с дискретными и аналоговыми входами/выходами для средних систем автоматизации ПЛК110[M02] / ПЛК110 / ПЛК160.

- Коммуникационные контроллеры ПЛК304 / ПЛК323

В качестве примера на рисунке 4.34 приведен программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК100.

Рисунок 4.34 - Программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК100

ОВЕН ПЛК100 – это моноблочный контроллер с дискретными входами/выходами, для организации автоматизации в электроэнергетике, машиностроении, в сельском хозяйстве и в других отраслях и на других производствах, перечислять которые можно было бы очень долго.

Устройство имеет компактный корпус для крепления на DIN-рейку, дискретные входы/выходы с удобными креплениями, а также последовательные порты (RS-232, RS-485) и Ethernet. Любой из встроенных интерфейсов позволяет расширить количества точек ввода/вывода посредством подключения внешних модулей. Питание осуществляется либо переменным током с напряжением 220В, либо постоянным 24В.

Скорость работы дискретных входов достигает 10кГц при использовании подмодулей счетчика. Интерфейсы (3 последовательных порта и USB Device для программирования) работают независимо друг от друга. Температурный диапазон довольно широк - от -20 до +70.

Внутри устройства ОВЕН ПЛК100 есть встроенный аккумулятор, который в случае пропадания питания позволит перевести выходные элементы в безопасное состояние. Конечно, присутствуют и встроенные часы.

Кроме того, по любому из портов возможна работа с нестандартными протоколами, поэтому можно подключить любые счетчики: газовые, электросчетчики, или водосчетчики, либо считыватели штрих-кодов и тому подобные приспособления.

Кроме ОВЕН ПЛК100, в серии представлены также ПЛК150 и ПЛК154, отличающиеся количеством дискретных входов: 8, 6 и 4 соответственно; и типом дискретных выходов, реле и сдвоенные транзисторные ключи (всего 12 сигнальных выходов), с возможностью коммутации токов до 2А. ПЛК150 и ПЛК154 имеют также аналоговые входы (50 Ом) и выходы (до 20мА), в ПЛК150 4 аналоговых входа и 2 аналоговых выхода, а в ПЛК154 — 4 аналоговых входа и 4 аналоговых выхода.

Таким образом использование микропроцессорных средств в информационном канале электропривода кардинально влияет на качество функционирования силового канала.

В этом случае электропривод как изделие поставляется со встроенным устройством управления, которое придает ему определенные свойства. При этом управление электроприводом может сводиться лишь к формированию в той или иной форме задающего воздействия от системы управления верхнего уровня, например, уставки скорости или положения. Все остальные операции управления по воспроизведению заданного значения регулируемой координаты будут выполняться автоматически программируемым контроллером.

Список литературы

1. Цыба Ю.А. Автоматическое управление электромеханическими системами: Учебное пособие. – Алматы: АИЭС, 2008. – 77с.

2. Цыба Ю.А., Шадхин Ю.И., Алмуратова Н.К. Нелинейные и цифровые системы автоматического управления: Учебное пособие. – Алматы: АУЭС, 2013. – 96 с.

3. Сагитов П.И. Энергосбережение в электроприводе. Учебное пособие. АУЭС. Алматы, 2011. – 89 с.

4. Цыба Ю.А., Алмуратова Н.К. Специальные электрические машины: Учебное пособие. – Алматы: АУЭС, 2012. - 87 с.

5. Цыба Ю.А.,Тойгожинова Ж. Ж. Электрические микромашины: Учебное пособие. – Алматы: АУЭС, 2015. –106 с.

6. Шишмарев В.Ю. Типовые элементы систем автоматического управления: Учебник. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 304 с.

Юрий Александрович Цыба
Юрий Владимирович Кузьмин
Эльмира Байджумаевна Даркенбаева

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебное пособие

Редактор _____
Спец. доп. план 2017 г., поз. ___

Сдано в набор ___. ___._____
Формат 60х84 1/16
Бумага типографская № 2
Уч.-изд. лист. - 7,5. Тираж 100 экз.
Заказ____. Цена_____.

Подписано в печать __. __. __

Копировально – множительное бюро
Некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
050013, Алматы, ул. Байтурсынова, 126