

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
УКРАИНЫ

Донбасская государственная машиностроитель-
ная академия

Конспект лекций по дисциплине

«Электромеханические системы автоматизации
в машиностроении и металлообработке»

для студентов дневной и заочной формы обуче-
ния

Утверждено
на заседании кафедры
«Электромеханические
системы автоматизации»
Протокол № 1 от 21.08.12

Краматорск 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Общие сведения о металлорежущих станках.....	7
1.1 Классификация металлорежущих станков.....	7
1.2 Основные и вспомогательные движения в станках.....	8
2 Общие вопросы электропривода станков.....	11
3 Регулирование скорости приводов станков.....	15
4 Режимы работы электродвигателей станков.....	19
5 Электрооборудование токарных станков.....	20
5.1 Назначение и устройство токарных станков.....	20
5.2 Типы электроприводов токарных станков.....	23
5.3 Расчет мощности двигателей токарных станков.....	24
6 Электрооборудование сверлильных и расточных станков.....	29
6.1 Назначение и устройство сверлильных и расточных станков.....	29
6.2 Особенности и типы электроприводов сверлильных и расточных станков.....	31
6.3 Расчет мощности двигателей сверлильных и расточных станков.....	33
7. Электрооборудование продольно-строгальных станков.....	35
7.1 Назначение и устройство продольно-строгальных станков.....	35
7.2 Особенности работы и типы главных электроприводов продольно-строгальных станков.....	36
7.3 Расчет мощности двигателя стола продольно- строгального станка	40
7.4 Электропривод подачи суппортов продольно- строгальных станков.....	43
8 Электрооборудование фрезерных станков.....	44
8.1 Назначение и устройство фрезерных станков.....	44
8.2 Типы электроприводов фрезерных станков.....	47
8.3 Расчет мощности электродвигателей фрезерных станков.....	48
9 Электрооборудование шлифовальных станков.....	51
9.1 Назначение и устройство шлифовальных станков.....	51
9.2 Типы электроприводов шлифовальных станков.....	54

9.3 Расчет мощности двигателя главного привода шлифовальных станков	56
10 Автоматизированный электропривод постоянного тока.....	58
10.1 Элементы автоматизированного электропривода постоянного тока.....	58
10.2 Особенности двухзонных электроприводов.....	59
10.3 Ограничение тока (момента) в электроприводах постоянного тока.....	63
10.4 Трехфазные комплектные электроприводы ЭТУ2 (ЭПУ2).....	68
10.5 Преобразователи постоянного тока SIMOREG DC MASTER.....	70
11 Автоматизированный электропривод переменного тока.....	77
11.1 Статические преобразователи частоты.....	77
11.2 Принципы построения систем управления двигателем переменного тока.....	81
11.3 Скалярные системы частотного управления.....	84
11.4 Система векторного управления.....	90
11.5 Комплектные электроприводы ЭКТ2.....	109
11.6 Частотно-регулируемые преобразователи Micromaster440.....	111
11.7 Цифровые преобразователи частоты Sinus K.....	114
12 Системы числового программного управления металлообрабатывающими станками.....	116
Список рекомендованной литературы.....	127

ВВЕДЕНИЕ

Современные металлорежущие станки – это высокоразвитые машины, включающие большое число механизмов и использующие механические, электронные, гидравлические, пневматические и другие методы осуществления движений и управления циклом. По конструкции и назначению трудно найти более разнообразные машины, чем металлорежущие станки. На них обрабатывают всевозможные детали – от мельчайших элементов часов и приборов до деталей, размеры которых достигают многих метров, – турбин, прокатных станов, теплоходов.

На станках обрабатывают и простые цилиндрические поверхности, и поверхности, описываемые сложными математическими уравнениями или заданные графически, например, для криволинейных кулачков, турбинных лопаток, штампов, лопастей винтов. При этом достигается высокая точность обработки, измеряемая нередко долями микрометра. На станках обрабатываются детали из сталей и чугунов, из цветных, специальных жаропрочных, легких, твердых и других сплавов, из пластмасс, дерева, кварца, ферромагнитных сплавов и других материалов. Обрабатывают детали из радиоактивных материалов, когда станком приходится управлять с удаленного от места обработки пульта, а за процессом наблюдать на экране панели оператора.

Все большее развитие получают станки с программным управлением, в том числе многоцелевые, обеспечивающие высокую мобильность производства, точность и производительность обработки. Автоматика все шире применяется не только для повышения производительности процесса обработки, но и для получения его высоких качественных показателей. Управление от ЭВМ группой станков, возможность оптимизировать процесс обработки и автоматически устанавливать необходимые режимы обработки с учетом изменяющихся условий также характерно для автоматических систем современных станков.

При создании новых станков используются достижения станкостроительной промышленности и науки. Например, на конструкцию станка влияет создание новых типов электродвигателей (высокомоментных, линейных), появление новых датчиков (преобразователей) положения, совершенствование электрогидравлической и оптической аппаратуры, создание новых методов управления от специализированных ЭВМ и т. д. Микропроцессорные устройства управления превращают станок в станочный модуль, сочетающий гибкость и универсальность с высоким уровнем автоматизации.

Применение станочных модулей возможно только при полной автоматизации всех вспомогательных операций за счет широкого использова-

ния манипуляторов и промышленных роботов. Это относится к операциям, связанным со сменой заготовки, режущих инструментов, технологической оснастки, с операциями измерения заготовки, инструмента, с операциями дробления и удаления стружки.

Совершенствование современных станков должно обеспечивать повышение скоростей рабочих и вспомогательных движений при соответствующем повышении мощности привода главного движения.

Исключительное значение приобретает повышение надежности станков за счет насыщения их средствами контроля и измерения, а также введения в станки систем диагностирования.

В современных станках используют широкий набор средств измерения, иногда очень точных, таких, например, как лазерные интерферометры, для сбора текущей информации о состоянии станка, инструмента, вспомогательных устройств и для получения достоверных данных об исправной работе.

Современные металлорежущие станки обеспечивают исключительно высокую точность обработанных деталей. Ответственные поверхности наиболее важных деталей машин и приборов обрабатывают на станках с погрешностью в долях микрометра, а шероховатость поверхности при алмазном точении не превышает сотых долей микрометра. Требования к точности постоянно растут, и это, в свою очередь, ставит новые задачи перед инженерами-конструкторами.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

1.1 Классификация металлорежущих станков

Металлорежущие станки являются распространенными производственными машинами, предназначенными для механической обработки заготовок из металла металлорежущими инструментами. Путем снятия стружки заготовке придается требуемая форма, размеры и чистота поверхности. На электромашиностроительных заводах механическая обработка занимает значительное место в общем процессе изготовления в условиях крупносерийного и массового производства. Кроме металлических заготовок на станках обрабатывают также детали из других материалов. К станкам относится и технологическое оборудование, использующее для обработки электрофизические и электрохимические методы, сфокусированный электронный или лазерный луч и некоторые другие виды обработки.

В зависимости от характера выполняемых работ, вида применяемых инструментов и формы образуемой поверхности металлорежущие станки подразделяются на следующие девять групп: 1) токарные; 2) сверлильные и расточные; 3) шлифовальные; 4) комбинированные; 5) зубо- и резьбообрабатывающие; 6) фрезерные; 7) строгальные и долбежные; 8) отрезные; 9) разные. Внутри групп станки подразделяются на типы (модели).

В зависимости от технологических возможностей обработки деталей разных размеров, форм и характера организации производства различают станки:

1) *универсальные и широкого назначения*, служащие для **выполнения различных операций** (например, точения, сверления, нарезания резьбы и др.) и **способов обработки** (например, фрезерования и растачивания отверстий) при обработке изделий многих наименований и типоразмеров; такие станки применяются при штучном и мелкосерийном производстве в ремонтных цехах, мастерских и т. д;

2) *специализированные*, предназначенные для обработки деталей, сходных по форме, но имеющих различные размеры; такие станки используются в серийном производстве;

3) *специальные*, служащие для обработки деталей одного типоразмера; станки такого вида применяются в крупносерийном и массовом производствах;

4) *гибкие производственные модули* (ГПМ) представляют собой автоматизированную универсальную технологическую ячейку, основой которой является станок с полным набором манипуляторов, контрольных и измерительных устройств.

По массе и размерам различают станки: нормальные, имеющие массу до $10 \cdot 10^3$ кг; крупные – массой от 10 до $30 \cdot 10^3$ кг; тяжелые – от 30 до $100 \cdot 10^3$ кг и уникальные – свыше $100 \cdot 10^3$ кг. По точности обработки различают станки нормальной, повышенной, высокой и особо высокой точности (прецизионные).

1.2 Основные и вспомогательные движения в станках

Процесс получения на станках деталей определенной формы поверхности и размеров состоит в снятии с заготовки лишнего металла инструментом, режущая кромка которого перемещается относительно заготовки. Необходимое относительное перемещение создается в результате сочетания движений инструмента и заготовки. Они называются основными, или рабочими движениями. Их разделяют на главное (режущее) движение (за счет него инструмент производит резание металла) и движение подачи, которое служит для перемещения инструмента или обрабатываемой заготовки (в зависимости от типа станка) для снятия слоя металла с целью придания детали определенной формы.

В зависимости от вида обработки основные движения могут иметь различный характер. Так, при строгании сочетаются поступательное движение детали или инструмента (движение резания) и перпендикулярное к нему поступательное движение инструмента (подачи); при токарной обработке происходит вращение заготовки и поступательное движение инструмента (рис. 5); фрезерование осуществляется путем сочетания вращательного движения инструмента и поступательного движения заготовки; при сверлении оба основных движения совершает инструмент (рис. 7), и т. д.

Главные движения в станках осуществляются обычно при помощи электроприводов (иногда применяются и гидроприводы), движения подачи – либо через механическую передачу от главного привода, либо от отдельных электро- или гидроприводов.

Кроме основных движений, в станках имеются вспомогательные движения. Они непосредственно не участвуют в процессе резания, но необходимы для обработки изделий, например: для установки инструмента, автоматического подвода его к заготовке и обратного отвода, контроля размеров в процессе обработки, подачи смазки и охлаждающей жидкости и т. д.

В связи с большим разнообразием функций, выполняемых на станках, их целесообразно рассматривать как систему, состоящую из нескольких подсистем (рис. 1), где I_0 , I_1 – входная и выходная информация, M_0 , M_1 – заготовки и изделия; E – энергия; 1 – подсистема управления; 2 – подсистема контроля; 3 – подсистема манипулирования; 4 – подсистема обработки.

Подсистема манипулирования обеспечивает доставку заготовок к месту обработки, их зажим в заданной позиции, перемещение к месту контроля и измерения и, наконец, вывод готовых изделий из рабочей зоны станка. Таким образом, подсистема манипулирования обеспечивает поток материала, проходящего через рабочую зону станка в процессе его обработки.

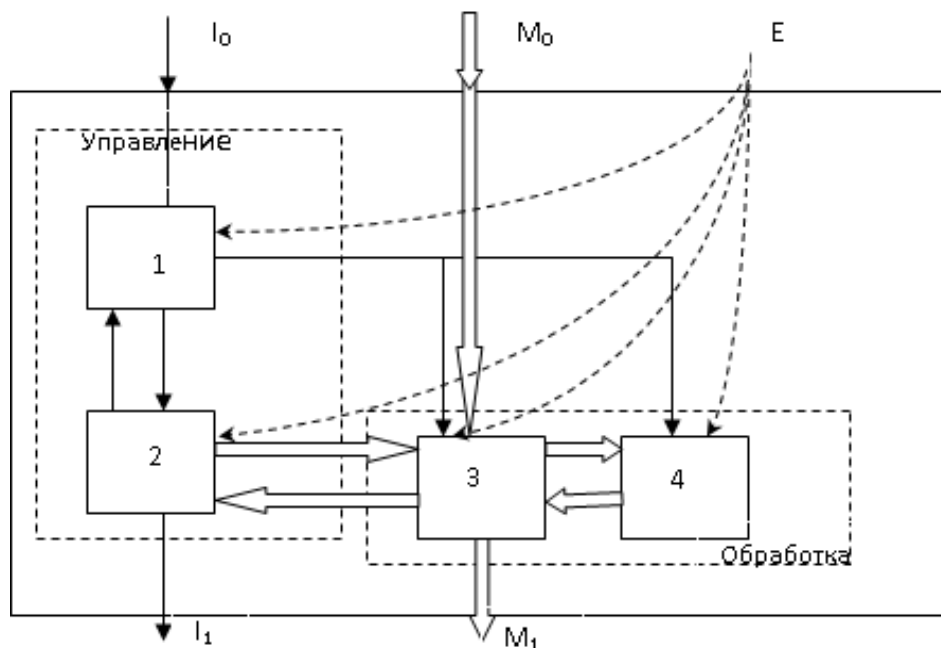


Рисунок 1 – Структурная схема станка

Дополнительные функции подсистемы манипулирования необходимы также для смены режущих инструментов и дополнительных приспособлений. Подсистема управления на основе входной внешней информации и дополнительной внутренней текущей информации от контрольных и измерительных устройств обеспечивает правильное функционирование всех остальных подсистем в соответствии с поставленной задачей. Входная информация поступает в виде чертежа, маршрутной технологии или заранее подготовленной управляющей программы.

Текущая информация о правильности состояния и поведения всей технологической системы (станка, инструмента, манипуляторов, вспомогательных устройств) поступает в подсистему управления при ручном управлении от органов чувств оператора, а при автоматизации контрольных функций – от соответствующих преобразователей (датчиков) подсистемы контроля. Выходная информация дает сведения о фактических размерах обработанной на станке детали по результатам ее измерения.

Собственно станок подразделяется на несколько важнейших частей, обычно называемых узлами. *Главный привод* станка сообщает движение инструменту или заготовке для осуществления процесса резания с соответствующей скоростью. У подавляющего большинства станков главный при-

вод сообщает вращательное движение шпинделю, в котором закреплен режущий инструмент либо заготовка.

Привод подачи необходим для перемещения инструмента относительно заготовки для формирования обрабатываемой поверхности. У подающего большинства станков привод подачи сообщает узлу станка прямолинейное движение. Сочетанием нескольких прямолинейных, а иногда и вращательных движений можно реализовать любую пространственную траекторию.

Привод позиционирования необходим во многих станках для перемещения того или иного узла станка из некоторой исходной позиции в другую заданную позицию, например, при последовательной обработке нескольких отверстий или нескольких параллельных плоскостей на одной и той же заготовке. Во многих современных станках с числовым программным управлением (ЧПУ) функции приводов подачи и позиционирования выполняет один общий привод.

Несущая система станка состоит из последовательного набора соединенных между собой базовых деталей. Соединения могут быть неподвижными (стыки) или подвижными (направляющие). Несущая система обеспечивает правильность взаимного расположения режущего инструмента и заготовки под воздействием силовых и температурных факторов.

Манипулирующие устройства необходимы для автоматизации различных вспомогательных движений в станке: для смены заготовок, их зажима, перемещений или поворота, смены режущих инструментов, удаления стружки и т. п. Современный многооперационный станок имеет набор манипуляторов, транспортеров, поворотных устройств, а в некоторых случаях обслуживается универсальным манипулятором с программным управлением (промышленным роботом).

Контрольные и измерительные устройства необходимы в станке для автоматизации наблюдения за правильностью его работы. С помощью них контролируют состояние наиболее ответственных частей станка, работоспособность режущего инструмента, измеряют заготовки и изделия. При достаточно высоком уровне автоматизации результаты **контроля измерения** поступают в управляющее устройства, а оттуда в виде управляющих сигналов корректируют положение узлов станка.

Устройство управления может быть с ручным обслуживанием оператором, с механической системой управления или с ЧПУ. В настоящее время происходит широкое внедрение микропроцессорных устройств ЧПУ для управления всеми видами станочного оборудования.

Передача движений в станках от двигателей к рабочим органам осуществляется кинематическими цепями механизмов станка. Структуру этих цепей, их взаимные связи и особенности можно проследить по кинематической схеме станка. По такой схеме легко рассчитываются скорости движения рабочих органов станка или, наоборот, по заданным скоростям движения рабочих органов находятся требуемые значения угловой скорости

двигателей. Кинематическая схема нужна также для определения моментов, действующих на валу двигателя, КПД и т. п.

2 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТАНКОВ

Требования к электроприводам основных и вспомогательных движений. Одним из важнейших вопросов электрооборудования металлорезающих станков является выбор типа электропривода для основных движений. На этот выбор оказывает влияние ряд факторов: 1) диапазон и плавность регулирования скорости рабочего механизма; 2) характер нагрузки привода; 3) частота включений привода; 4) соотношение периодов машинного и вспомогательного времени работы станка; 5) энергетические показатели работы привода – КПД и коэффициент мощности; 6) надежность привода, простота его обслуживания и наладки.

Регулирование скорости приводов главного движения станков производится в диапазоне от (3...6) до (100...120):1 и может быть осуществлено одним из следующих способов: 1) механическим – изменением передаточного отношения от двигателя к рабочему органу станка; 2) электрическим – изменением частоты вращения двигателя; 3) электромеханическим – комбинированием двух первых способов. При этом механическое регулирование, как правило, является ступенчатым, а электрическое может быть ступенчатым и бесступенчатым.

Следует отметить, что механические характеристики электродвигателей главных приводов должны быть жесткими. Перепад угловой скорости при изменении нагрузки на валу двигателя от холостого хода до номинальной не должен превышать 5...10 %.

Нагрузка двигателя главного привода при регулировании скорости меняется по-разному для различных станков. Так, для станков с вращательным главным движением (токарных, карусельных, фрезерных и т. д.) мощность P , подводимая к шпинделю станка, на значительной части диапазона регулирования частоты вращения $D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$ должна быть постоянной (рис. 2, а).

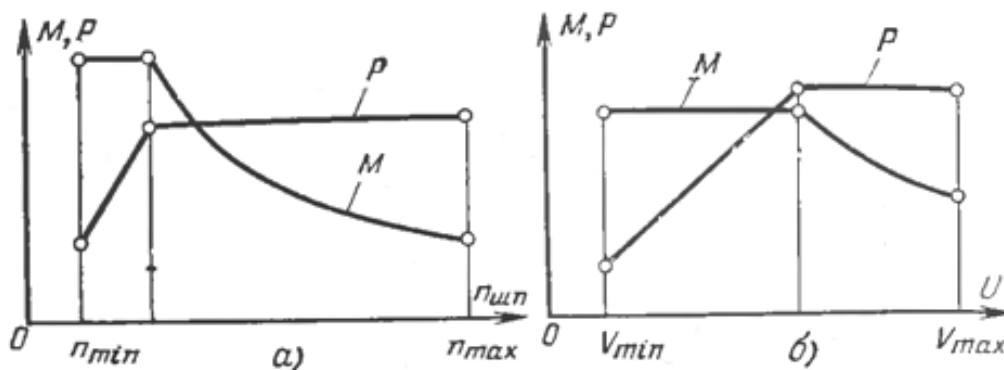


Рисунок 2 – Зависимости мощности и момента от частоты вращения и от скорости для главных приводов станков с вращательным (а) и возвратно-поступательным (б) движениями

У станков с возвратно-поступательным главным движением, например продольно-строгальных, наоборот, на большей части диапазона регулирования при рабочем ходе сохраняется постоянство момента нагрузки M (рис. 2, б).

Приводы подачи современных станков характеризуются значительным диапазоном изменения скорости (до 1000:1 и более) при постоянстве момента нагрузки, определяемого наибольшим усилием подачи. Механическая характеристика привода подачи $\omega = f(M)$ должна быть жесткой.

Применяются следующие типы приводов подачи: 1) от главного привода через механическую передачу; 2) от отдельного электродвигателя; 3) от гидропривода.

Выбор типа электропривода металлорежущих станков для главных приводов токарных, фрезерных, расточных и других станков с редкими включениями, с небольшим диапазоном регулирования скорости при постоянной мощности применяют трехфазные короткозамкнутые асинхронные двигатели, простые в управлении, надежные и удобные в эксплуатации. До недавнего времени, в основном, применялось регулирование скорости рабочих органов переключением шестерен в коробке скоростей станка. На современном этапе развития станкостроения для регулирования скорости все чаще применяются преобразователи частоты, которые используются для решения задач, требующих применения приводов с большим диапазоном регулирования. Применяют также многоскоростные асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов, что обеспечивает ступенчатое регулирование скорости и позволяет уменьшить размеры коробки передач.

На продольно-строгальных, кругло- и плоскошлифовальных и других станках, работающих с высоким диапазоном регулирования скорости при $M = \text{const}$ или в режиме частых реверсов, применяют системы электропривода с регулированием угловой скорости двигателей постоянного тока изменением напряжения на якоре, а именно Г-Д с магнитным усили-

телем в качестве возбудителя, ТП-Д (тиристорный преобразователь – двигатель).

Привод подачи тяжелых токарных, карусельных, фрезерных, расточных и некоторых других станков часто выполняется от отдельного электродвигателя. Это упрощает кинематику станка и облегчает его автоматизацию.

Момент сопротивления M_c на валу двигателя подачи создается, в основном, силами трения, возникающими при перемещении элементов станка. При пуске двигателя значение M_c будет больше, чем во время работы, так как коэффициент трения покоя $\mu_0 > \mu_{\text{движ}}$. Это обстоятельство следует учитывать при выборе типа двигателя.

Для отдельных электроприводов подачи небольших станков следует применять асинхронные короткозамкнутые двигатели с повышенным пусковым моментом. Регулирование скорости подачи в этом случае производится изменением передаточного числа коробки скоростей, переключением числа пар полюсов двигателя, изменением частоты питающей сети. В тех случаях, когда требуется плавное изменение подачи (например, в тяжелых карусельных, фрезерных и шлифовальных станках), применяют двигатели постоянного тока с питанием их по системе Г-Д или ТП-Д.

В последнее время в электроприводах станков получили широкое применение:

1) синхронные двигатели, так как они могут использоваться без обратной связи по скорости и поддерживают постоянный момент в определенном диапазоне частоты. **Скорость, независимая от нагрузки, за пределами диапазона частоты;**

2) линейные, так как ротор движется прямолинейно. Существенным преимуществом линейной техники прямых приводов является практическое отсутствие эффектов эластичности, люфта и трения, а также собственной вибрации в трансмиссии. Следствием этого являются высокая динамика и высокая точность.

Выбор типа двигателей для станков. Для современного станкостроения характерно стремление приблизить двигатель к рабочему органу станка, это позволяет упростить кинематические цепи, снизить потери в передачах и сделать привод более компактным, что, в свою очередь, ведет к органическому слиянию электрической и механической частей станка. Это обстоятельство привело к применению на станках, кроме двигателей нормального исполнения со станиной на лапах, двигателей специального исполнения со станиной без лап, имеющих фланец на подшипниковом щите. Применение фланцевых двигателей, которые могут устанавливаться непосредственно на основание станка, как горизонтально, так и вертикально, позволяет в ряде случаев упростить конструкцию станка, например, за счет изъятия конических шестерен, служащих для сочленения взаимно перпендикулярных валов, и осуществить более компактную встройку двигателя в станок.

Приводные двигатели станков должны быть защищены от вредного влияния окружающей среды (попадания в них машинного масла, эмульсии, металлической и абразивной пыли и др.). Если при работе станка не образуется металлической пыли и исключено попадание в двигатель капель масла (эмульсии), то могут быть использованы незащищенные двигатели. Во всех других случаях следует применять для привода станков закрытые двигатели с наружным обдувом или с естественным охлаждением.

Двигатели переменного тока выбирают с короткозамкнутым ротором одно- и многоскоростные, встраиваемые и повышенной точности, преимущественно на синхронную частоту вращения 3000 и 1500 об/мин. Двигатели постоянного тока используются в электроприводе механизмов, требующих по технологическим условиям регулирования скорости. При этом двигатели со смешанным и последовательным возбуждением, как правило, применяются в разомкнутых системах электропривода. Двигатели с независимым возбуждением в настоящее время являются основой замкнутых систем регулируемого электропривода и наиболее широко используются в массовых тиристорных электроприводах постоянного тока. Для следящих электроприводов используют малоинерционные двигатели с гладким якорем, допускающие кратковременную перегрузку по току до $I_{\text{кратк}} \leq 8I_{\text{ном}}$ при номинальном магнитном потоке.

Для систем программного управления применяют шаговые двигатели и двигатели с печатными обмотками якоря, а также специальные малоинерционные высокомоментные ($M_{\text{кратк}} \geq 7M_{\text{ном}}$) двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов.

3 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ПРИВОДОВ СТАНКОВ

Для наиболее полного использования режущего инструмента и станка обработка изделий должна производиться при так называемой экономически выгодной (оптимальной) скорости резания, которая при работе станка с соответствующей подачей и глубиной резания должна обеспечить обработку детали с необходимой точностью и чистотой поверхности при минимальных приведенных удельных затратах на обработку. Производительность при этом будет несколько ниже наибольшей возможной.

Оптимальная скорость резания зависит от твердости обрабатываемого материала, свойств материала и геометрии режущего инструмента, а также от характера обработки. На одном и том же станке могут обрабатываться детали разных размеров, из различных материалов и различными инструментами, что является причиной изменения режимов резания. Например, на токарных станках при постоянной частоте вращения шпинделя $n_{\text{шп}}$ с изменением диаметра обработки $d_{\text{обр}}$ будет изменяться скорость резания, м/мин:

$$v_z = \frac{\pi d_{\text{обр}} n_{\phi\delta}}{1000} \quad (3.1)$$

Следовательно, частота вращения шпинделя станка определяется двумя факторами – диаметром $d_{\text{обр}}$ и скоростью резания v_z . Рациональное использование станка требует изменения частоты вращения шпинделя при изменении технологических факторов.

Регулировочные свойства механизмов станков характеризуются следующими показателями:

1) диапазоном регулирования D , который при вращательном движении рабочей части станка равен отношению максимальной угловой скорости (или частоты вращения) к минимальной:

$$D = \frac{\omega_{\phi i, \text{max}}}{\omega_{\phi i, \text{min}}} = \frac{n_{\phi i, \text{max}}}{n_{\phi i, \text{min}}} \quad (3.2)$$

и для станков с поступательным движением определяется отношением линейных скоростей: максимальной v_{max} к минимальной v_{min} , т. е.

$$D = \frac{v_{\text{max}}}{v_{\text{min}}} \quad (3.3)$$

Примерные значения диапазона регулирования скорости для приводов главных движений D_{Γ} и приводов подач D_{Π} некоторых типов станков даны в таблице 1;

Таблица 1 – Значение диапазонов регулирования скорости приводов главных движений и подач

Тип станков	Диапазон регулирования для приводов	
	Главного движения D_{Γ}	Движения подач D_{Π}
Токарные (средние и крупные)	40...125	50...300
Карусельные (тяжелые)	40...100	100...7 000
Радиально-сверлильные	20...100	5...40
Горизонтально-расточные (средние)	25...100	30...150
Фрезерные (универсальные)	20...40	100...600
Продольно-строгальные средних и больших размеров	10...30	50...100

2) плавностью регулирования, которая определяется отношением скоростей на двух соседних ступенях регулирования i и $(i + 1)$, т. е.

$$\varphi = \frac{n_{i+1}}{n_i}. \quad (3.4)$$

Это отношение называется *коэффициентом регулирования*.

С уменьшением коэффициента φ возрастает плотность регулируемого процесса, которая в значительной степени влияет на производительность станка. В практике станкостроения чаще всего применяются значения $\varphi = 1,12; 1,26; 1,41; 1,58$;

3) экономичностью регулирования, характеризуемой затратами на создание данной системы привода и стоимостью потерь энергии при регулировании скорости;

4) стабильностью работы привода, которая характеризуется перепадом скорости с изменением нагрузки на рабочем органе станка.

Регулирование скорости главных приводов. На некоторых станках и до настоящего времени применяют трехфазные односкоростные асинхронные двигатели с чисто механической системой регулирования скорости, осуществляемой путем переключения шестерен коробки скоростей. Одним из главных преимуществ механического привода является сохранение постоянной мощности на всем диапазоне регулирования.

Ступенчатое механическое регулирование угловой скорости, осуществляемое переключением шестерен коробки скоростей, не обеспечивает для разных диаметров обработки наиболее выгодную скорость резания. Следовательно, станок при изменении $d_{обр}$ не может обеспечить высокую производительность. Кроме того, коробка скоростей представляет собой довольно сложную и громоздкую конструкцию, стоимость которой возрастает с увеличением числа ступеней.

Для упрощения кинематических схем станков небольших и средних размеров при ступенчатом регулировании угловой скорости применяют многоскоростные асинхронные короткозамкнутые двигатели (двух-, трех- и четырехскоростные), а также асинхронные двигатели с фазным ротором.

Для регулирования скорости в диапазоне $D \leq (8 \dots 12):1$ и до $40:1$ при сохранении $\dot{I}_{\bar{n}} \approx const$ в значительной части диапазона применяется электрическое бесступенчатое регулирование скорости главных приводов. В этом случае коробка скоростей с переключающими блоками заменяется редуктором, который имеет более простую кинематическую схему.

В практике станкостроения для регулируемых приводов до настоящего времени широкое применение имеют приводы постоянного тока по системе Г-Д с ЭМУ в качестве возбудителя, обеспечивающие плавное регулирование скорости и достаточно хорошие динамические характеристики. Для сохранения стабильности скорости при изменении нагрузки применяют различные системы автоматического регулирования, в которых используются магнитные и полупроводниковые усилители.

В последние годы для таких приводов вместо электромашинных преобразователей, имеющих значительные габариты, невысокий КПД и большие эксплуатационные расходы, все большее применение получают статические преобразователи на управляемых полупроводниковых вентилях – тиристорах, обладающие следующими преимуществами: меньшей стоимостью силовых элементов; более высоким КПД; эксплуатация вентиля преобразователя проще, а надежность выше в сравнении с электромашинным преобразователем.

Регулирование скорости приводов подач. Мощность, необходимая для осуществления подачи, значительно меньше мощности главного привода, так как $v_{\text{п}} \ll v_{\text{д}}$.

Изначально в приводах подач использовалось механическое и электромеханическое ступенчатое регулирование скорости. В станках небольших и средних размеров (токарно-винторезных, сверлильных, зубофрезерных и др.) подача производилась от главного привода через отдельную коробку передач, что позволяло сохранить постоянным установленное соотношение $\frac{v_{\text{п}}}{n_{\text{д}}}$, но в этом случае нельзя изменить скорость $v_{\text{п}}$ в процессе резания, и усложняется кинематическая схема станка.

В настоящее время в приводах подач при диапазоне свыше 10:1 применение электрического бесступенчатого регулирования скорости является более актуальным. Для подачи применяют двигатели постоянного тока, частота вращения которых управляется изменением подводимого к якорю напряжения, получаемого от отдельного управляемого преобразователя в виде ЭМУ, ПМУ или ТП.

Также для регулирования скорости приводов подач (иногда главных приводов) применяются синхронные двигатели. Необходимо отметить, что ветвь синхронных электрических машин наиболее перспективна и в ближайшее время сулит существенный технологический скачок. Уже сегодня имеются разработки бесконтактных синхронных машин, обладающих улучшенными на порядок массогабаритными показателями. Эти машины имеют совершенно новую, нетрадиционную конструкцию и очень широкие возможности. Основной отличительной особенностью этих машин является то, что поле статора в них вращается синхронно с полем ротора. Синхронные двигатели, в которых регулировка происходит частотным преобразователем, поддерживают неизменной частоту вращения при любой нагрузке.

Важной особенностью СД является возможность фиксации положения его ротора путем подключения обмоток фаз статора к источнику постоянного напряжения. Путем переключения обмоток можно с высокой точностью задавать дискретные перемещения ротора, соответствующие определенному числу шагов. Таким образом, в шаговом режиме СД способен обрабатывать перемещения, задаваемые числом электрических импульсов, коммутировать перемещения, задаваемые числом электрических

импульсов, **коммутатора** путем подключения обмоток фаз статора к источнику постоянного напряжения. Путем переключения обмоток можно с высокой точностью задавать дискретные перемещения ротора, соответствующие определенному числу шагов. Таким образом, в шаговом режиме СД способен отрабатывать перемещения, задаваемые числом электрических импульсов, коммутирующих токи статора в требуемой последовательности. Жесткая связь между числом шагов перемещения ротора и числом электрических импульсов является замечательным свойством этого двигателя, широко используемым в практике дискретного ЭП с цифровым управлением.

4 РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СТАНКОВ

Необходимая для работы станка мощность, а, следовательно, и мощность, развиваемая приводным двигателем, в общем случае изменяются в процессе обработки детали. При изготовлении однотипных деталей с окончанием обработки одной из них станок останавливается, производится измерение и смена заготовки, причем на это время (t_0) двигатель обычно отключается. Для обеспечения нормальной работы станка при подобной переменной нагрузке двигатель должен удовлетворять двум условиям: развивать наибольшую мощность, требуемую в процессе обработки, и не перегреваться свыше нормы при работе с переменной нагрузкой.

В продолжительном режиме с постоянной нагрузкой (S1) работают главные приводы крупных токарных, карусельных, шлифовальных, зубофрезерных и других станков. Номинальная мощность двигателя в этом случае должна быть выбрана равной или немного большей номинальной мощности станка, определяемой по наибольшей мощности резания.

Перебегающий режим работы с частыми реверсами (S7) характерен, например, для главного привода продольно-строгальных станков. Мощность двигателя здесь выбирается по нагрузочной диаграмме методом средних потерь или эквивалентных величин.

В повторно-кратковременном режиме (S3 или S4) работают электроприводы многих металлорежущих станков (например, сверлильных, заточных, автоматов и др.). Мощность двигателя в этом случае определяется также методом средних потерь или эквивалентных величин.

В кратковременном режиме (S2) работают вспомогательные приводы станков (например, приводы быстрых перемещений суппортов и поперечин, приводы зажимных устройств и др.). Время работы вспомогательных приводов обычно незначительно и составляет 5...15 с для небольших станков и 1...1,5 мин – для крупных станков. Номинальная мощность двигателя вспомогательных приводов определяется условиями перегрузки.

Машиностроительные предприятия имеют большой парк металлорежущих станков с асинхронными двигателями. Недогрузка этих двигателей приводит к увеличению непроизводительного расхода электроэнергии из-за снижения КПД двигателей и к уменьшению общего $\cos\varphi$ предприятия, так как в его электрической нагрузке возрастает доля реактивной мощности. В результате ухудшается использование мощности питающих предприятие трансформаторов и линий электропередачи, увеличиваются потери энергии в системе электроснабжения. Поэтому приходится устанавливать компенсирующие устройства, повышающие коэффициент мощности до нормы. С этой же целью следует стремиться к более полной загрузке двигателей и к сокращению или исключению холостого хода.

5 ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ

5.1 Назначение и устройство токарных станков

Станки токарной группы относятся к наиболее распространенным металлорежущим станкам и широко применяются на промышленных предприятиях, в ремонтных мастерских и т. п. В эту группу входят: универсальные токарные и токарно-винторезные, револьверные, токарно-лобовые, карусельные, токарно-копировальные станки, токарные автоматы и полуавтоматы.

На токарных станках производится обработка наружных, внутренних и торцевых поверхностей тел вращения цилиндрической, конической и фасонной формы, а также прорезка канавок, нарезка наружной и внутренней резьбы и т. д. Режущими инструментами на токарных станках служат, в основном, резцы, но применяются также и сверла, развертки, метчики, плашки и др.

Характерной особенностью станков токарной группы является осуществление главного движения за счет вращения обрабатываемой детали. Подача режущего инструмента производится путем поступательного перемещения суппортов.

Наибольшее применение получили универсальные *токарно-винторезные станки*, на которых выполняются всевозможные токарные работы. В электромашиностроении на токарных станках производится обточка валов, подшипниковых щитов и других деталей электрических машин.

На рис. 3 показан общий вид универсального токарно-винторезного станка.

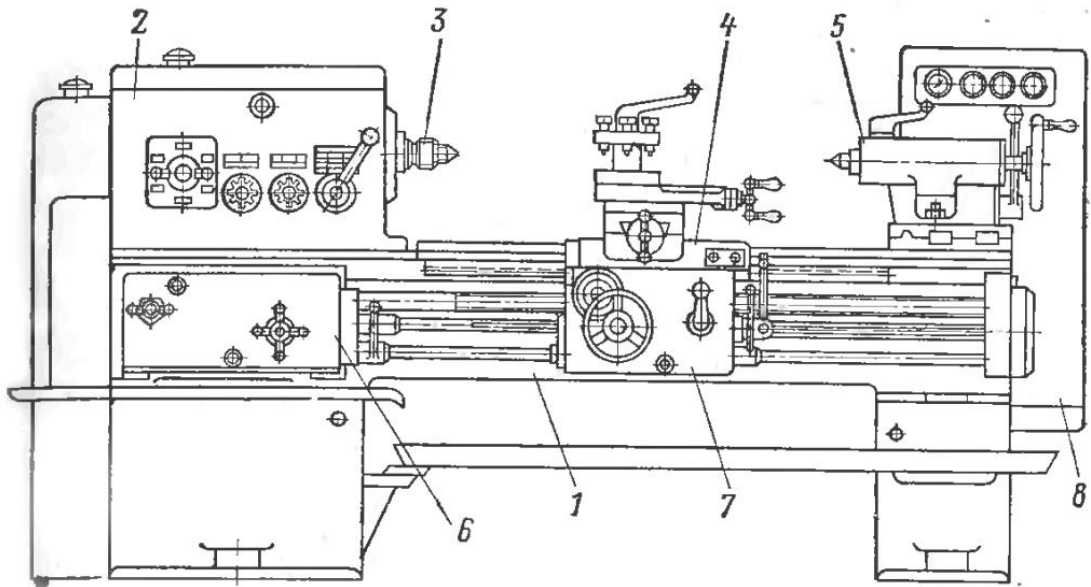


Рисунок 3 – Общий вид токарно-винторезного станка модели 1К62Б

Основные узлы станка: станина 1, передняя (шпиндельная) бабка 2 с коробкой скоростей и шпинделем 3, суппорт 4, задняя бабка 5, коробка подач 6, фартук 7 и шкаф с электрооборудованием 8.

Станина является основной несущей конструкцией станка. По направляющим станины перемещается нижняя каретка суппорта, а также задняя бабка. Шпиндель представляет собой полый вал, через который можно пропускать прутковый материал при обработке его на станке. На шпиндель навертывается патрон либо планшайба для закрепления обрабатываемого изделия, а также может устанавливаться передний центр при обработке изделия в центрах.

Суппорт служит для закрепления режущего инструмента (резца) и сообщения ему движений подачи – продольной и поперечной. Фартук соединен с нижней кареткой суппорта и перемещается вместе с ней вдоль станины. Движение суппорту передается через механизм фартука от ходового вала либо от ходового винта, которые получают вращение от коробки подач. Ходовой винт используется при нарезании резьбы, ходовой вал – при всех других видах обработки. Задняя бабка используется как вторая опора при обработке в центрах сравнительно длинных изделий. Она имеет выдвижную пиноль, в которой закрепляется задний центр или режущий инструмент для обработки отверстий – сверла, метчики, развертки и др.

Токарно-револьверные станки предназначены для обработки в серийном производстве деталей сложной формы, в том числе болтов, гаек и др. Процесс обработки на этих станках состоит из нескольких последовательных операций, во время которых используются различные инструменты: резцы, сверла, метчики и др., закрепленные в так называемой револьверной головке, которая устанавливается на суппорте. В электромашиностроении токарно-револьверные станки применяются для обработки подшипниковых щитов, втулок и нажимных конусов коллекторов электриче-

ских машин. Применение этих станков повышает производительность труда в 2...3 раза по сравнению с обработкой на токарно-винторезных станках.

На рис. 4 показан общий вид токарно-револьверного станка, основными узлами которого являются: станина 1, фартуки 2 поперечного суппорта 5 и суппорта 6 револьверной головки, коробка подач 3, шпиндельная бабка 4, револьверная головка 7. При обработке заготовки инструменты поочередно вводятся в работу путем поворота револьверной головки вокруг своей оси. Суппорт с головкой может совершать быстрые продольные перемещения по направляющим станины. Револьверные головки обычно имеют шестигранную форму, режущие инструменты закрепляются в радиальных отверстиях (гнездах) головки.

Карусельные станки являются разновидностью токарных станков. Их применяют для наружной обточки и внутренней расточки цилиндрических поверхностей, обточки торцов на крупных деталях большого диаметра (до 13 м и более), но сравнительно небольшой длины, например: заготовок зубчатых колес, дисков паровых турбин и др.

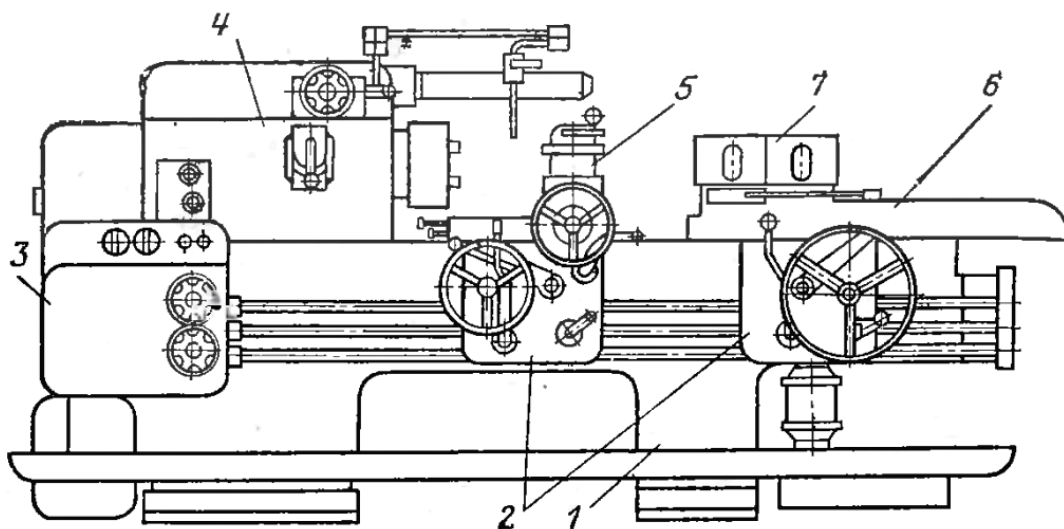


Рисунок 4 – Общий вид токарно-револьверного станка модели 1П365

На рисунке 5 показан общий вид тяжелого двухстоечного карусельного станка.

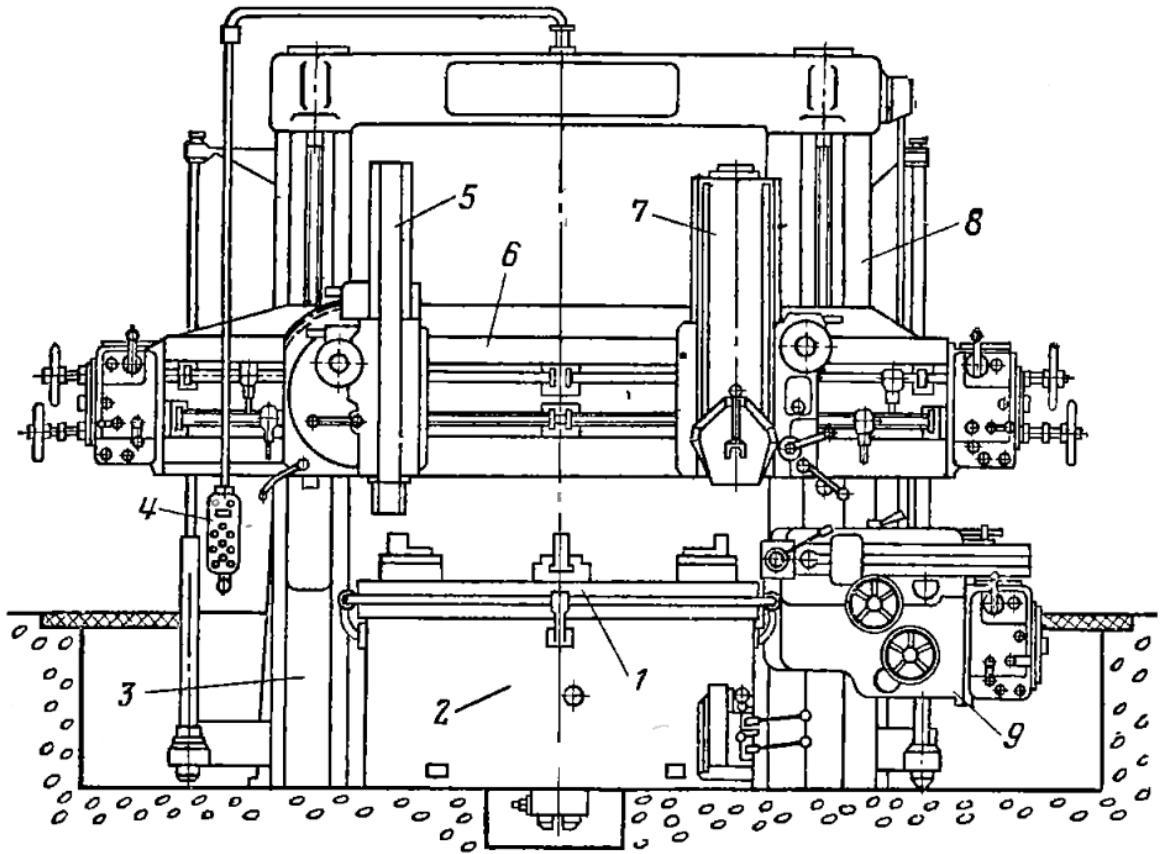


Рисунок 5 – Общий вид тяжелого карусельного станка модели 1553

Обрабатываемая деталь закрепляется на горизонтальной планшайбе 1, размещенной на станине 2, и обтачивается резцами, установленными на левом 5 и правом 7 верхних суппортах, а также на боковом суппорте 9. Верхние суппорты расположены на поперечине (траверсе) 6, которая перемещается по двум стойкам 3 и 8. Боковой суппорт может перемещаться вдоль стойки 8. Управление электроприводами станка может осуществляться при помощи подвесной кнопочной станции 4.

Как уже отмечалось выше, станки токарной группы весьма разнообразны по назначению, которое и определяет их конструктивные особенности.

5.2 Типы электроприводов токарных станков

Диапазон регулирования частоты вращения шпинделя токарных станков достигает $(80...100):1$. При этом желательно иметь по возможности плавное ее изменение, с тем, чтобы во всех случаях обеспечить наиболее выгодную скорость резания.

Для станков токарной группы, в которых главное движение является вращательным, требуется обычно постоянство мощности в большей части диапазона изменения скоростей и только в области малых скоростей – постоянство момента, равного наибольшему допустимому по условию проч-

ности механизма главного движения. Малые частоты вращения предназначаются для специфических видов обработки: нарезания резьбы метчиками, обточки сварных швов и др.

В главных приводах токарных и карусельных станков широкого назначения малых и средних размеров иногда применяется привод от асинхронного короткозамкнутого двигателя. Асинхронный двигатель конструктивно хорошо сочетается с коробкой скоростей станка, надежен в эксплуатации и не требует специального ухода. Регулирование частоты вращения шпинделя станка в таком приводе осуществляется путем переключений шестерен коробки скоростей.

В токарных станках малых размеров пуск, остановка и изменение направления вращения шпинделя часто производятся с помощью фрикционных муфт. Двигатель при этом остается подключенным к сети и вращается в одном направлении.

Для главного привода некоторых станков применяются многоскоростные асинхронные двигатели. Использование такого привода целесообразно, если оно приводит к упрощению коробки скоростей или когда требуется переключение скорости шпинделя на ходу.

Тяжелые токарные и карусельные станки, как правило, имеют электромеханическое ступенчато-плавное регулирование скорости главного привода с использованием двигателя постоянного тока. Сравнительно простая коробка скоростей таких станков дает две-три ступени угловой скорости, а в интервале между двумя ступенями осуществляется в диапазоне (3...5):1 плавное регулирование угловой скорости двигателя изменением его магнитного потока. Это, в частности, обеспечивает возможность поддерживать постоянство скорости резания при точении торцевых и конусных поверхностей. При наличии в заданном диапазоне частоты вращения шпинделя участка с постоянством момента нагрузки целесообразно применить двухзонное электрическое регулирование угловой скорости двигателя. Это позволяет упростить коробку скоростей (уменьшить число ступеней скорости), **повысить** использование двигателя в зоне постоянства момента нагрузки. Особенностью главного привода карусельных станков является большой момент сил трения в начале пуска (до $0,8 M_{НОМ}$) и значительный момент инерции планшайбы с деталью, превышающий на высоких механических скоростях в 8...9 раз момент инерции ротора электродвигателя. Применение в этом случае электропривода постоянного тока обеспечивает плавный пуск с постоянным ускорением.

В цехах машиностроительных заводов обычно нет сети постоянного тока, поэтому для питания двигателей тяжелых станков устанавливают отдельные преобразовательные устройства – электромашинные (система Г-Д) или статические (система ТП-Д).

Бесступенчатое электрическое регулирование скорости (двухзонное) применяют при автоматизации станков со сложным циклом работы, что позволяет легко переналаживать их на любые скорости резания (например,

некоторые токарно-револьверные автоматы). Бесступенчатое электрическое регулирование скорости главного привода используется также для некоторых прецизионных токарных станков. Но во всех этих случаях диапазон регулирования скорости при постоянстве мощности нагрузки не превышает (4...5):1, в остальной части диапазона регулирование ведется при постоянстве момента нагрузки. Привод подачи небольших и средних токарных станков чаще всего осуществляется от главного двигателя, что обеспечивает возможность нарезания резьбы. Для регулирования скорости подачи применяются многоступенчатые коробки подач. Переключение ступеней производится вручную или с помощью электромагнитных фрикционных муфт (дистанционно).

В современных тяжелых токарных и карусельных станках для привода подачи используется отдельный широко регулируемый электропривод постоянного тока. Угловая скорость двигателя изменяется в диапазоне до (100...200):1 и более; привод выполняется по системе ЭМУ-Д, ПМУ-Д или ТП-Д.

Для вспомогательных приводов токарных станков (ускоренное перемещение каретки суппорта, зажима изделия, насоса охлаждающей жидкости и др.) применяются отдельные короткозамкнутые асинхронные двигатели.

5.3 Расчет мощности двигателей токарных станков

Основные характеристики режима токарной обработки. Процесс обработки деталей на токарных станках происходит при определенных значениях величин, характеризующих режим резания. К ним относятся (рис. 6): глубина резания t , подача S (перемещение резца на один оборот шпинделя), скорость резания v , т. е. линейная скорость, с которой перемещается снимаемый слой металла (стружка) относительно резца.

Назначаемая скорость резания зависит от свойств обрабатываемого материала, материала резца, вида обработки, условий охлаждения резца и детали. Необходимое значение скорости резания, м/мин, может быть определено по следующей формуле:

$$v_z = \frac{c_v}{T^{m_t} v_s^x v_y^y}, \quad (5.1)$$

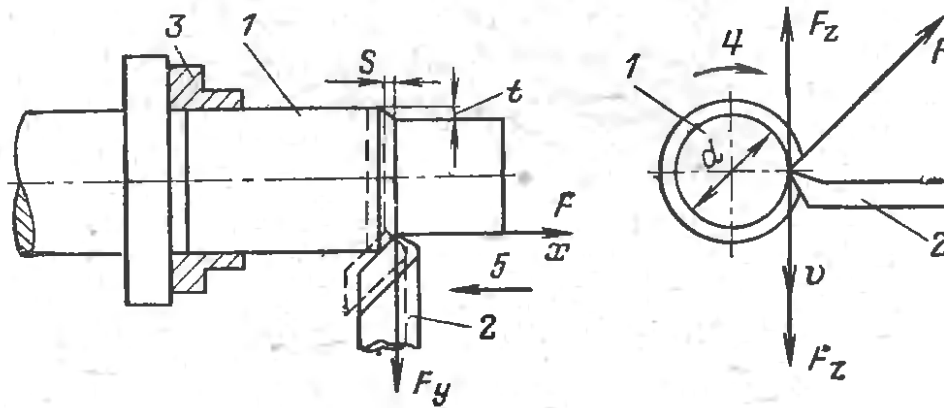
где T – стойкость резца (продолжительность работы резца до затупления), мин;

c_v – коэффициент, характеризующий свойства обрабатываемого материала, резца, а также вид токарной обработки (наружное точение, обрезка, нарезание резьбы и др.);

t – глубина резания, мм;

S – подача, мм/об;

m, x_v, y_v – показатели степени, зависящие от свойств обрабатываемого материала, резца и вида обработки.



1 – деталь; 2 – резец; 3 – шпиндель станка; 4 – главное движение; 5 – движение подачи

Рисунок 6 – Схема токарной обработки

Глубину резания устанавливают, исходя из припуска на обработку. Для черновых (обдирочных) работ $t = 3...30$ мм, для чистовых работ $t = 0,1... 2$ мм. Подача выбирается по условиям обеспечения максимальной производительности и требуемой чистоты обработанной поверхности. Для черновых работ $S = 0,4...3$ мм/об и более, для чистовых работ $S = 0,1...0,4$ мм/об. Скорость резания при обработке деталей из углеродистой стали резцами из быстрорежущей стали $v_z = 30...60$ м/мин.

В процессе токарной обработки на резец под некоторым углом к его режущей кромке воздействует усилие F , обусловленное сопротивлением металла резанию. Это усилие обычно принято разлагать на три составляющие (см. рис. 6): F_y – радиальное усилие, передаваемое через резцедержатель на суппорт станка; F_x – осевое усилие, преодолеваемое механизмом подачи; F_z – усилие резания, преодолеваемое шпинделем станка.

Усилие резания, H , может быть подсчитано по формуле

$$F_z = 9,81 C_{Fz} t_{Fz}^{X_{Fz}} S_{Fz}^{Y_{Fz}} v_z^n, \quad (5.2)$$

где C_{Fz} – коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал, материал резца и вид токарной обработки;

X_{Fz}, Y_{Fz}, n – показатели степени, зависящие от свойств обрабатываемого материала, резца и вида обработки.

Значения коэффициентов и показателей степени в формулах (5) и (6) находятся из справочника по режимам резания. Между усилиями F_y, F_x, F_z существуют следующие соотношения (установленные опытным путем):

$$F_y = (0,3...0,5)F_z \quad \text{и} \quad F_x = (0,2...0,3)F_z. \quad (5.3)$$

При известных значениях скорости и усилия резания можно определить мощность резания, кВт:

$$P_z = \frac{F_z v_z}{60} 10^{-3}. \quad (5.4)$$

Мощность, затрачиваемая на осуществление подачи суппорта, кВт, подсчитывается по формуле

$$P_i = \frac{F_i v_i}{60} 10^{-3}, \quad (5.5)$$

где $F_i = F_x + (F_z + F_y)\mu$ – суммарное усилие подачи, необходимое для перемещения суппорта с резцом в направлении подачи, Н;

$\mu = 0,05...0,08$ – коэффициент трения в направляющих суппорта;

v_i – скорость подачи, м/мин.

Следует отметить, что мощность подачи значительно меньше мощности резания: $P_i \approx (0,001...0,01)P_z$, так как скорость v_i во много раз меньше скорости v_z .

Важным фактором, определяющим производительность станка, является *машинное*, или *технологическое* время обработки, мин:

$$t_M = \frac{l}{n_{\phi i} S}, \quad (5.6)$$

где l – длина обработки (прохода резца), мм;

$n_{\phi i}$ – частота вращения шпинделя, об/мин;

S – подача, мм/об.

Как следует из уравнения (5.6), машинное время можно сократить, увеличив либо подачу, либо частоту вращения шпинделя, т. е. скорость резания, ибо $v_z = \pi d n_{\text{ш}} / 1000$. Обработка металла с большими скоростями резания (до 300...400 м/мин) и соответствующими подачами получила наименование *скоростного точения*, которое возможно при использовании резцов, оснащенных пластинками из твердых сплавов или металлокерамики.

Определение мощности двигателей приводов токарных станков. Мощность на валу двигателя главного привода в установившемся режиме складывается из мощности резания, зависящей от усилия и скорости резания, и мощности потерь в механизмах передач, которая зависит от нагрузки, числа звеньев кинематической цепи и частоты вращения привода. При расчетах обычно пользуются коэффициентом полезного действия станка, который определяется как произведение КПД отдельных звеньев кинематической цепи при работе на данной скорости:

$$\eta_{\tilde{n}\delta} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \eta_i. \quad (5.7)$$

При увеличении частоты вращения рабочих органов станка потери в передачах увеличиваются, поэтому КПД станка уменьшается. Для станков токарной группы КПД кинематической цепи главного привода при полной нагрузке, в среднем, составляет 0,7...0,8. Для цепи подачи обычно $\eta = 0,1...0,2$, так как здесь применяются замедляющие передачи, имеющие низкий КПД.

Мощность, кВт, на валу главного двигателя в установившемся режиме с учетом потерь в передачах определяется по формуле

$$D_{\tilde{a}\tilde{a}} = \frac{P_z}{\eta_{\tilde{n}\delta}}, \quad (5.8)$$

где $\eta_{\tilde{n}\delta}$ – КПД станка при данной мощности резания.

Токарные станки общего назначения (универсальные) могут работать в продолжительном режиме с номинальной нагрузкой. В этом случае мощность на валу двигателя, кВт,

$$D_{\tilde{m}} = \frac{P_{z.\tilde{m}}}{\eta_{\tilde{n}\delta.\tilde{m}}}, \quad (5.9)$$

где $D_{z.\tilde{m}}$, $\eta_{\tilde{n}\delta.\tilde{m}}$ – соответственно, номинальные мощность резания и КПД станка.

Из выражения (5.9) можно определить потери в станке при номинальной нагрузке

$$D_{\dot{n}\dot{z}.m} = \frac{P_{z.m}}{\eta_{\dot{n}\dot{z}.m}} - D_{z.m} . \quad (5.10)$$

Если двигатель во время вспомогательных операций не отключается, то его нагрузка D_0 будет равна мощности потерь холостого хода станка $D_{\dot{n}\dot{z}0}$. Для практических расчетов потери холостого хода станка приблизительно принимаются равными

$$\Delta D_{\dot{n}\dot{z}0} \approx 0,6 D_{\dot{n}\dot{z}.m} . \quad (5.11)$$

При работе станков, в том числе и токарных, в продолжительном режиме с переменной нагрузкой и в повторно-кратковременном режиме расчет мощности двигателя производится, как правило, методом средних потерь или эквивалентных величин с использованием нагрузочных диаграмм привода. Построение нагрузочной диаграммы производится с учетом конкретных технологических условий работы того или иного станка при изготовлении наиболее часто обрабатываемых на нем деталей наибольших размеров.

Главный электропривод и приводы подачи большинства малых и средних токарных станков осуществляют от односкоростного асинхронного двигателя в сочетании с коробками скоростей. В тех случаях, где необходимо электромеханическое регулирование скорости, применяют двигатель постоянного тока, асинхронный двигатель с фазным ротором или синхронный.

На современных токарных станках широко применяется автоматизация вспомогательных движений, а также дистанционное управление механизмами станка.

При выборе мощности и способа регулирования угловой скорости главного двигателя тяжелых токарных станков учитывается, что мощность, потребляемая механизмом планшайбы, не остается постоянной во всем диапазоне.

В настоящее время для регулирования скорости главного привода и приводов подачи применяются двигатели постоянного тока, управляемые по системе Г-Д, ТП-Д – для главных приводов, ТП-Д – для приводов подачи.

6 ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СВЕРЛИЛЬНЫХ И РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ

6.1 Назначение и устройство сверлильных и расточных станков

Сверлильные станки служат для получения сквозных и глухих отверстий в деталях с помощью сверл, для развертывания и чистовой обработки отверстий, предварительно полученных литьем или штамповкой, и для выполнения других операций. В сверлильных станках главное движение и движение подачи сообщаются инструменту. К станкам общего назначения относятся вертикально-сверлильные и радиально-сверлильные станки.

На рис. 7 показан общий вид *радиально-сверлильного станка*.

Станок состоит из фундаментной плиты 1 с установленной на ней неподвижной колонной, на которую надета пустотелая гильза 2. Гильза может поворачиваться вокруг колонны на 360° . На гильзу надет горизонтальный рукав (траверса) 4, который можно поднимать и опускать вдоль колонны с помощью вертикального винта механизма перемещения 3. Закрепление гильзы с рукавом на колонне (зажим колонны) производится разрезным кольцом, которое стягивается посредством дифференциального винта, вращаемого вручную или отдельным электродвигателем. По горизонтальным направляющим рукава может перемещаться в радиальном направлении шпиндельная бабка (сверлильная головка) 5. Обрабатываемая деталь устанавливается на столе 8. От главного электродвигателя 6 сообщается вращение шпинделю 7 и производится подача инструмента (сверла).

В электромашиностроении на сверлильных станках производят сверление отверстий в торцах станин электрических машин, в подшипниковых щитах, лапах и др.

Расточные станки применяются главным образом для обработки крупных деталей различными инструментами.

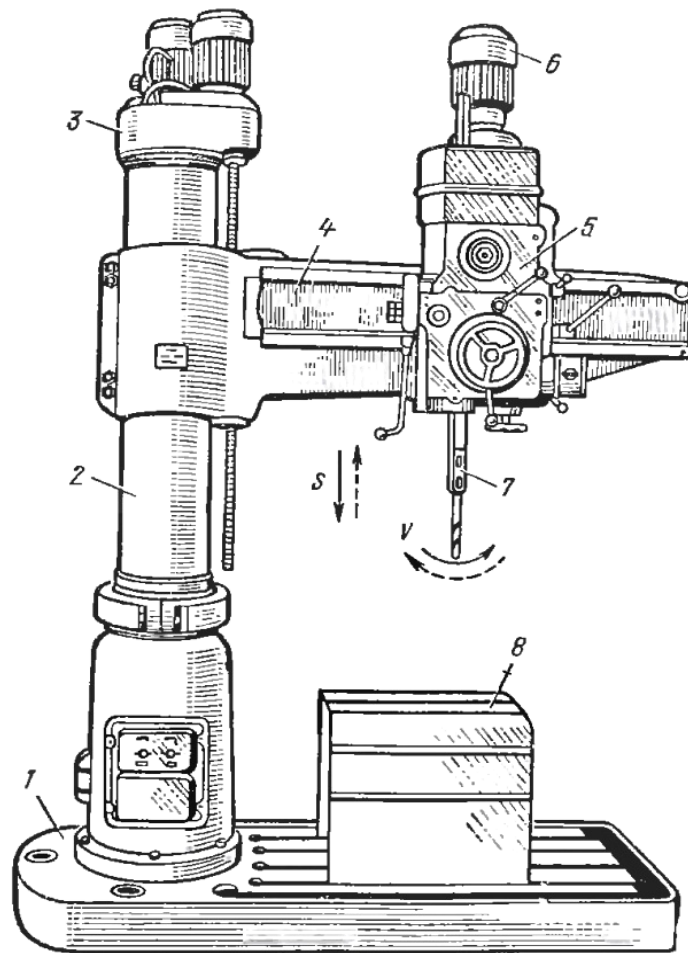


Рисунок 7 – Общий вид радиально-сверлильного станка

При этом можно выполнять разнообразные работы: растачивание цилиндрических и конических поверхностей резцами на борштанге, сверление отверстий сверлами, цилиндрическое и торцевое фрезерование; нарезание наружной и внутренней резьбы; обтачивание цилиндрических поверхностей и торцов. Особенностью расточных станков является возможность с одной установки детали обрабатывать в ней различные отверстия со взаимно параллельными и перпендикулярными осями.

На рис. 8 показан общий вид *горизонтально-расточного станка* общего назначения.

Станок состоит из нескольких основных узлов. На его станине 3 справа закреплена передняя неподвижная стойка 5. По вертикальным направляющим стойки перемещается шпиндельная бабка 6 с коробкой скоростей и коробкой подач. С левой стороны станины установлена задняя стойка 1, которую можно перемещать по направляющим станины. На задней стойке имеется люнет 2 с опорным подшипником для поддержки борштанги и обеспечения ей необходимой жесткости в процессе резания. Между стойками на направляющих станины расположен поворотный стол

4, который может совершать движения подачи в продольном и поперечном направлениях.

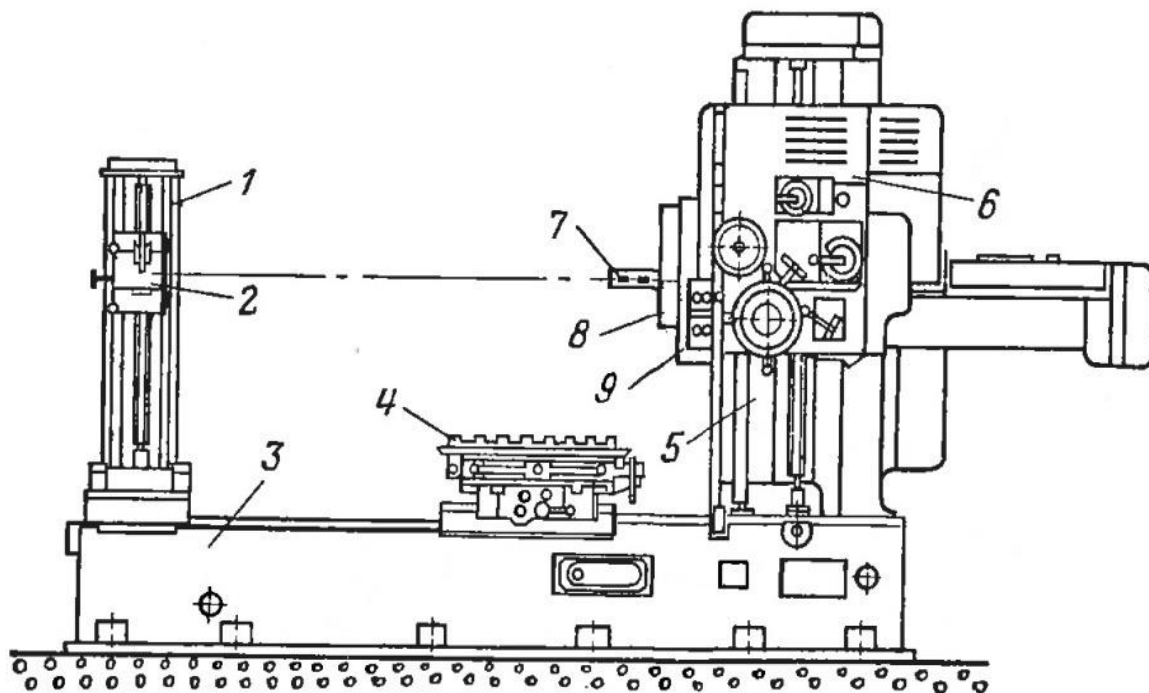


Рисунок 8 – Общий вид горизонтально-расточного станка

Главным движением станка является вращение расточного шпинделя 7 или планшайбы 9, которое осуществляется от электродвигателя, установленного в верхней части шпиндельной бабки. Движение подачи сообщается инструменту (осевое перемещение шпинделя или вертикальное перемещение шпиндельной бабки по направляющим стойки), либо обрабатываемой заготовке, располагаемой на столе.

Обрабатываемая заготовка закрепляется на столе станка. Режущие инструменты устанавливаются в шпинделе или в радиальном суппорте 8 планшайбы. При расточке коротких отверстий подача сообщается шпинделю. При обработке длинных и соосных отверстий с использованием борштанги подача сообщается столу в продольном направлении.

В электромашиностроении на расточных станках производят обработку внутренней цилиндрической поверхности корпусов электрических машин.

Координатно-расточные станки применяются для обработки отверстий с высокой точностью (в пределах 0,005... 0,01 мм) без предварительной разметки поверхности детали и без применения кондуктора. Установка координат центров отверстий по двум осям прямоугольной системы координат производится путем перемещения стола с изделием в одностоечных станках или шпиндельной бабки с инструментом в двухстоечных станках.

Для измерения установочных перемещений подвижных узлов станка применяют зеркальные линейки или валики. На координатно-расточных

станках можно производить сверление, разметку, а также всевозможные расточные работы и фрезерование торцевыми фрезами.

6.2 Особенности и типы электроприводов сверлильных и расточных станков

К электроприводам сверлильных станков предъявляются следующие требования: 1) если на станке производится нарезание резьбы, то привод шпинделя должен быть реверсивным; 2) схема управления должна ограничивать перемещение траверсы; 3) должна быть предусмотрена блокировка, не допускающая включения двигателя перемещения траверсы, когда она зажата; 4) не допускается работа станка с не зажатой колонной.

Диапазон регулирования скорости главного движения составляет (2...10):1 для вертикально-сверлильных, (20...70):1 – для радиально-сверлильных и (100...120):1 – для расточных станков при приблизительно постоянной мощности во всем диапазоне.

Главный привод сверлильных станков осуществляется от асинхронных короткозамкнутых двигателей. Регулирование частоты вращения шпинделя производится переключением шестерен коробки скоростей. Для уменьшения числа промежуточных передач в отдельных случаях можно применять многоскоростные асинхронные двигатели. Для привода перемещения рукава (траверсы) и зажима колонны применяют отдельные асинхронные электродвигатели.

Требования к главному приводу расточных и координатно-расточных станков совпадают, в основном, с рассмотренными ранее для станков токарной группы, но следует учитывать особенности расточных станков: 1) при обработке деталей происходит выдвигание расточного шпинделя, изменяется жесткость системы *станок – инструмент – деталь*, что делает целесообразным изменение на ходу станка скорости резания и подачи; 2) для получения высокого качества обрабатываемой поверхности желательно иметь бесступенчатое изменение частоты вращения шпинделя; 3) необходим большой диапазон регулирования частоты вращения шпинделя, достигающий в современных станках 250:1 и более.

В расточных станках общего назначения с диаметром расточного шпинделя до 150...175 мм применяется главный привод от одно- или многоскоростных асинхронных двигателей с многоступенчатой коробкой скоростей.

В тяжелых горизонтально-расточных станках применяется привод от двигателей постоянного тока с двух- или трехступенчатой коробкой скоростей. Для получения постоянного тока обычно используют полупроводниковые преобразователи. Угловая скорость двигателя регулируется при малых частотах вращения шпинделя (от 5 до 60 об/мин) изменением напря-

жения на якоре, дальнейшее повышение угловой скорости производится ослаблением потока возбуждения в диапазоне (3...6):1.

В координатно-расточных станках даже при небольшой мощности главного привода находят все большее применение приводы от двигателя постоянного тока с бесступенчатым регулированием скорости. В этом случае для питания двигателя используется система ТП-Д.

Привод подачи сверлильных станков обычно выполняется от главного двигателя, для чего коробка подач располагается на шпиндельной бабке. Общий диапазон регулирования скорости подачи для вертикально-сверлильных станков (2...24):1, для радиально-сверлильных – (3...40):1.

К приводам подач расточных станков предъявляются более жесткие требования: 1) обеспечить диапазон регулирования скорости до (1 500...2 000):1, так как необходимо обеспечить рабочие подачи и быстрые установочные перемещения; 2) отклонение скорости подачи не должно превышать 10 % начального значения при изменении момента от нуля до $M_{с.ном}$; привод должен обладать высоким быстродействием и обеспечивать точную остановку.

Для выполнения указанных требований и с целью упрощения кинематической цепи в универсальных и тяжелых расточных станках применяется привод подачи от двигателя постоянного тока по системе Г-Д или ТП-Д (для новых станков) или синхронные двигатели, управляемые преобразователем частоты.

6.3 Расчет мощности двигателей сверлильных и расточных станков

При сверлении нормативная скорость резания может быть определена по формуле, м/мин,

$$v = \frac{C_v d^{Z_v}}{T^{m_s} Y_v}, \quad (6.1)$$

где \tilde{N}_v – коэффициент, зависящий от материала изделия и сверла;

d – диаметр сверла, мм;

T – стойкость сверла, мин;

m, Z_v, Y_v – показатели степени, зависящие от материала изделия и диаметра сверла.

По найденному значению скорости резания рассчитывается частота вращения шпинделя, об/мин:

$$n_{\phi i} = \frac{10^3 v}{\pi d}. \quad (6.2)$$

Вращающий момент на шпинделе при сверлении определяется по формуле, Н·м,

$$M = 9,81 C_M d^{1,9} s^{1,9} v^2 \cdot 10^{-3}. \quad (6.3)$$

Коэффициенты и показатели степени в выражениях (6.2) и (6.3) находят в справочнике по режимам резания, там же даются пояснения к формуле (6.3).

Зная момент и частоту вращения шпинделя, можно найти мощность резания при сверлении, кВт:

$$D_z = \frac{M n_{\phi i}}{9550} \quad (6.4)$$

При расточке резцами скорость резания определяется по формуле (5.1), мощность резания – по формуле (5.2).

Рассчитав мощность резания для каждой операции, машинное и вспомогательное время, можно построить нагрузочную диаграмму станка и, используя ее, определить мощность двигателя.

Мощность двигателя подачи, угловая скорость которого регулируется изменением только напряжения на якоре, в случае естественного охлаждения или принудительной вентиляции двигателя определяется по формуле, кВт,

$$D_{\dot{a}i} = \frac{F_{n.\max} v_{\dot{a}i}}{60 \eta_i} \cdot 10^{-3} \quad (6.5)$$

где $F_{n.\max}$ – наибольшее усилие подачи, действующее на рабочей части диапазона, Н;

$v_{\dot{a}i}$ – наибольшая скорость быстрого перемещения, м/мин;

η_i – КПД передачи.

Если учесть, что при быстрых перемещениях требуется усилие подачи в 6...8 раз меньшее по сравнению с наибольшим рабочим усилием, то регулирование скорости электропривода в этом случае можно производить ослаблением потока двигателя. Это дает возможность уменьшить номинальную мощность двигателя подачи в $\frac{n_{\max}}{n_{\min}}$ раз и легче осуществить автоматическое регулирование частоты вращения.

7 ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНО-СТРОГАЛЬНЫХ СТАНКОВ

7.1 Назначение и устройство продольно-строгальных станков

Данные станки предназначены, в основном, для обработки резцами плоских горизонтальных и вертикальных поверхностей у крупных деталей большой длины. На этих станках можно также производить прорезание прямолинейных канавок различного профиля, Т-образных пазов и т. д. Детали средних размеров устанавливаются рядами на столе станка и обрабатываются одновременно.

Продольно-строгальные станки разделяются на одностоечные (с консольной поперечиной) и двухстоечные (портального типа). На рис. 9 показан общий вид двухстоечного продольно-строгального станка.

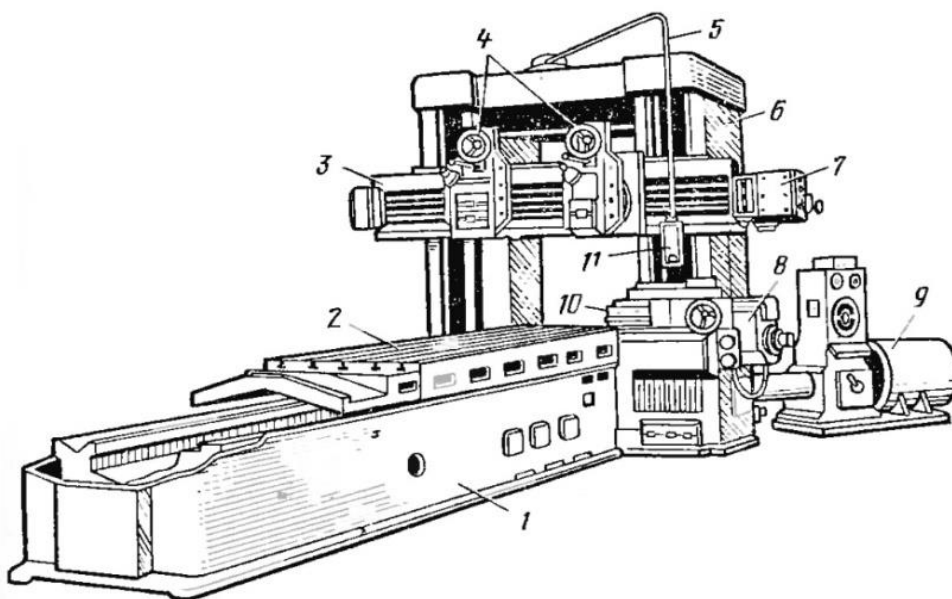


Рисунок 9 – Общий вид тяжелого продольно-строгального станка

Его станина 1 имеет продольные направляющие (плоские и V-образные). По ним возвратно-поступательно движется стол 2, на котором закрепляют обрабатываемую деталь. Перемещение стола – главное движение – осуществляется от электродвигателя 9 через редуктор и реечную передачу, которая состоит из рейки (прямозубой, косозубой или червячной), привернутой снизу к столу по всей его длине, и реечного колеса или расположенного под углом червяка. Снятие стружки с обрабатываемой детали (строгание) происходит при ходе стола вперед (прямой, или рабочий ход). Ход стола назад (обратный ход) совершается обычно с повышенной скоростью, и снятие стружки не производится (холостой ход), а резцы в это время автоматически отводятся от обработанной поверхности (поднимаются).

Изменение направления движения стола производится или при помощи электромагнитной реверсивной муфты (на малых станках), или посредством реверсирования главного двигателя. Портал станка 6 образован двумя вертикальными стойками и верхней балкой. К этой балке прикреплена подвеска 5 пульта управления 11. По вертикальным направляющим стоек при помощи ходовых винтов перемещаются поперечина (траверса) 3 и боковой суппорт 10 (некоторые станки имеют два боковых суппорта). Поперечина имеет горизонтальные направляющие, по которым могут перемещаться вертикальные суппорты 4. Суппорты станка с закрепленными в них резцами осуществляют прерывистую периодическую подачу за время реверса стола с обратного хода на прямой и быстрые установочные перемещения. Движение суппортам передается через коробки подач 7 и 8 от отдельных электродвигателей.

Основными величинами, характеризующими размеры и технологические возможности различных продольно-строгальных станков, являются наибольшая длина строгания (ход стола) L (от 1,5 до 12 м), наибольшая ширина обработки (от 0,7 до 4 м) и наибольшее тяговое усилие на рейке стола F_m (до 30...70 кН и более).

7.2 Особенности работы и типы главных электроприводов продольно-строгальных станков

Процесс обработки изделий на таких станках состоит из последовательно повторяющихся циклов, каждый из них включает рабочий или прямой ход стола, во время которого происходит обработка, и обратный ход, когда стол возвращается в исходное положение и осуществляется подача резцов (во время реверса стола с обратного хода на прямой).

Нормативная скорость прямого хода (скорость резания) определяется твердостью обрабатываемого материала, свойствами режущего инструмента и видом обработки (чистовая, черновая). Для увеличения производительности станка скорость обратного хода обычно устанавливают больше скорости резания. На рис. 10 показаны график пути l и v стола в зависимости от времени для одного цикла. Время цикла складывается из

$$\dot{O}_o = t_{n.i\delta} + t_{i\delta} + t_{m.i\delta} + t_{n.i\acute{\alpha}\delta} + t_{i\acute{\alpha}\delta} + t_{m.i\acute{\alpha}\delta}, \quad (7.1)$$

где $t_{n.i\delta}, t_{n.i\acute{\alpha}\delta}$ – время пуска при прямом и обратном ходах;

$t_{i\delta}, t_{i\acute{\alpha}\delta}$ – время прямого и обратного установившихся движений;

$t_{m.i\delta}, t_{m.i\acute{\alpha}\delta}$ – время торможения при прямом и обратном ходах.

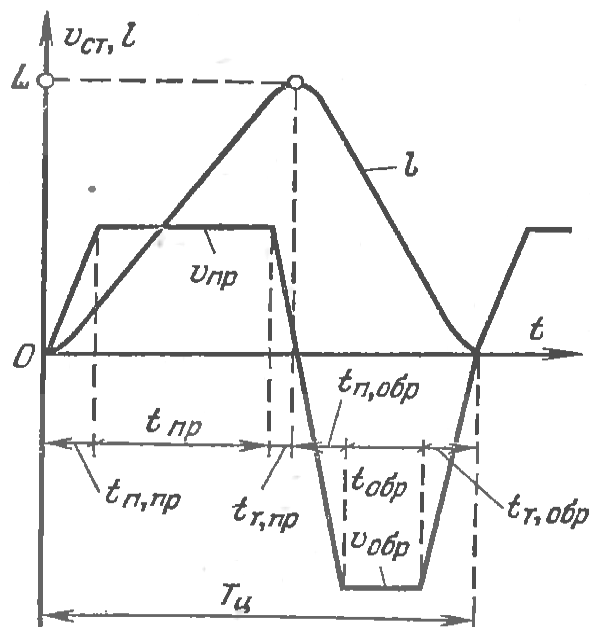


Рисунок 10 – Графики скорости и пути стола продольно-строгального станка

Производительность продольно-строгального станка характеризуется числом двойных ходов в минуту $N_{\ddot{a}\ddot{a}\ddot{o}}$, которое зависит от длины хода стола, соотношения скоростей прямого и обратного ходов, времени реверсирования и может быть подсчитано по формуле

$$N_{\ddot{a}\ddot{a}\ddot{o}} = \frac{60kv_{i\ddot{o}}}{60L(1+k) + t_{\ddot{o}\ddot{a}\ddot{a}}v_{i\ddot{o}}}, \quad (7.2)$$

где $k = \frac{v_{i\ddot{a}\ddot{o}}}{v_{i\ddot{o}}}$; $v_{i\ddot{a}\ddot{o}}$ и $v_{i\ddot{o}}$ – скорости прямого и обратного ходов стола, м/мин;

L – длина хода стола, м;

$t_{\ddot{o}\ddot{a}\ddot{a}}$ – время реверсирования стола с прямого хода на обратный или наоборот, с.

Из уравнения (7.2) видно, что число двойных ходов и, следовательно, производительность станка возрастают с увеличением $v_{i\ddot{a}\ddot{o}}$ (до определенного предела) при заданной скорости резания $v_{i\ddot{o}}$ и с уменьшением времени $t_{\ddot{o}\ddot{a}\ddot{a}}$. При малых длинах строгания наиболее эффективным средством повышения производительности является уменьшение времени реверса за счет повышения быстродействия привода и установления некоторой оптимальной (по производительности) скорости обратного хода. При больших длинах строгания наибольший эффект дает увеличение скорости обратного

хода. Чрезмерное увеличение $v_{i\dot{a}\delta}$ (при малых и средних длинах строгания) может привести к такому росту $t_{\delta\dot{a}\dot{a}}$, при котором повышения производительности не произойдет.

Сокращение времени реверса имеет свой предел, так как за время реверса у продольно-строгальных станков осуществляется подъем и опускание резцов, а также производится поперечная подача суппортов. Кроме того, с уменьшением $t_{\delta\dot{a}\dot{a}}$ возрастают динамические нагрузки в передачах станка.

Время переходного процесса пуска или торможения зависит, как известно, от суммарного момента инерции электропривода. Например, время пуска (торможения)

$$t_{n,m} = \frac{J_{\Sigma} \omega_c}{M_{n,\bar{n}\delta} \pm \dot{I}_{\bar{n}}}, \quad (7.3)$$

где $M_{n,\bar{n}\delta}$ – среднее значение момента двигателя при пуске, Н·м;

$M_{\bar{n}}$ – момент статического сопротивления, Н·м;

$\omega_{\bar{n}}$ – угловая скорость двигателя, соответствующая моменту $M_{\bar{n}}$, рад/с;

J_{Σ} – суммарный момент инерции электропривода, кг·м².

Практика показывает, что в продольно-строгальных станках момент инерции двигателя $J_{\dot{a}\dot{a}}$ составляет до 80...85 % общего приведенного момента инерции J_{Σ} движущихся поступательно и вращающихся элементов привода. Поэтому стараются вообще исключить реверсирование двигателя и производить изменение направления хода стола при помощи реверсивной электромагнитной муфты, либо устанавливают двигатели с удлиненным якорем (ротором), имеющие меньший момент инерции, либо устанавливают вместо одного два двигателя половинной мощности.

В современных продольно-строгальных станках регулирование скорости движения стола, а также его реверсирование осуществляется, как правило, электрическим путем, поэтому **производительность станка и качество обрабатываемых изделий в значительной степени определяется рабочий привода стола.**

Наименьшая скорость резания при черновой обработке принимается равной 4...6 м/мин. При чистовой обработке скорость резания на строгальных станках достигает 75...100 м/мин, следовательно, диапазон регулирования скорости стола равен (15...25):1. При изменении скорости резания приблизительно от 5 до 25 м/мин тяговое усилие на рейке стола остается постоянным и наибольшим (рис. 11, зона I).

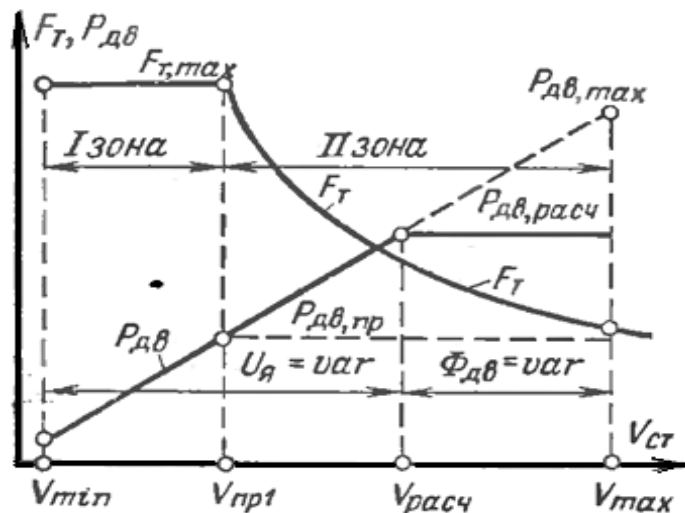


Рисунок 11 – Зависимость тягового усилия F_m и мощности двигателя $P_{дв}$ от скорости перемещения стола $V_{ст}$

При дальнейшем увеличении скорости резания тяговое усилие F_m уменьшается (см. рис.11, зона II). Следовательно, в зоне небольших скоростей момент, развиваемый двигателем, должен оставаться примерно постоянным, а при скоростях выше 25 м/мин остается неизменной мощностью. Заданная угловая скорость двигателя должна поддерживаться во всем диапазоне с точностью до $\pm(5...10\%)$ при изменении нагрузки от 0,1 до 1,2 номинального момента. Динамический перепад скорости, вызванный резким приложением нагрузки (при входе резца в металл), должен быть не более 10...20 %, а возникающий при этом переходный процесс должен заканчиваться в течение 0,1...0,2 с. Для главного привода продольно-строгальных станков целесообразно применять двигатели, обладающие повышенной перегрузочной способностью и пониженным моментом инерции, так как такие двигатели обеспечивают меньшее время пуска и торможения.

Для небольших станков при $L \leq 3...4$ м, $F_m \leq 30...50$ кН и диапазоне регулирования скорости стола $D = (3...4) : 1$ применяется привод от асинхронного короткозамкнутого двигателя в сочетании с преобразователем частоты.

В качестве главного привода средних [$L \leq 5$ м, $F_m \leq 50...70$ кН и $D = (6...8) : 1$] и тяжелых [$L > 5$ м; $F_m > 70$ кН и $D = (15...25) : 1$] продольно-строгальных станков в настоящее время используется двигатель постоянного тока, управляемый по системе Г-Д или ТП-Д. Эта система позволяет получить нужную форму характеристик двигателя, требуемый диапазон и плавность регулирования скорости движения стола, небольшое $t_{дв}$.

Недостатком системы Г-Д является необходимость выбора мощности источника постоянного тока генератора и приводного асинхронного

двигателя по установленной мощности двигателя стола, которая определяется наибольшим тяговым усилием или моментом, соответствующим минимальной скорости, и номинальным напряжением при номинальной угловой скорости двигателя. Особенно значительное завышение $P_{уст.дв}$ и, соответственно, $P_{г.ном}$ по сравнению с отдаваемой ими мощностью имеет место при регулировании угловой скорости двигателя только изменением ЭДС генератора.

С целью уменьшения установленной мощности электрических машин, повышения загрузки двигателя и КПД главного привода тяжелых продольно-строгальных станков по системе Г-Д целесообразно применять двухзонное регулирование угловой скорости двигателя. На выпускаемых в настоящее время станках внедряются приводы с тиристорными преобразователями для питания цепи якоря и вводятся системы автоматического управления с применением унифицированной блочной системы регуляторов, которые позволяют сравнительно просто реализовать высокое быстродействие привода по системе ТП-Д при хорошем качестве переходных процессов.

7.3 Расчет мощности двигателя стола продольно-строгального станка

Снятие стружки при строгании производится только при рабочем ходе стола. При обратном же ходе резец приподнимается, и мощность, развиваемая приводом, расходуется лишь на преодоление потерь в станке. Скорость, с которой деталь перемещается относительно резца при рабочем ходе, называется *скоростью резания*. Перемещение резца на один двойной ход стола перпендикулярно детали составляет *подачу* s . Величина, на которую углубляется резец в изделие при одном проходе, определяет *глубину резания* t . При строгании подача и глубина резания принимаются: для черновой обработки $s = 1 \dots 7$ мм/дв.ход, $t = 6 \dots 30$ мм; для чистовой обработки широкими резцами $s = 10 \dots 30$ мм/дв.ход и выше, $t = 0,05 \dots 0,3$ мм.

Скорость, **усиление** и мощность резания определяются по формулам (5.1), (5.2) и (5.4) для токарной обработки. Значения коэффициентов и показателей в формулах находятся из справочников по режимам резания. Машинное время при строгании, затрачиваемое для обработки одного изделия, можно найти по формуле, мин,

$$t_M = \frac{B}{N_{\text{дв.ход}} \cdot s} \quad (7.4)$$

где B – ширина изделия, мм;

$N_{\text{дв.ход}}$ – число двойных ходов в минуту, дв.ход/мин;

s – подача на один двойной ход, мм/ дв.ход.

Нагрузка двигателя главного привода продольно-строгального станка складывается из мощности резания, потерь в передачах и мощности, развиваемой двигателем в процессах пуска и торможения стола, которые происходят с моментами и токами, превышающими номинальные (дважды за один двойной ход стола и многократно в течение времени работы станка). Следовательно, привод таких станков работает в перемежающемся режиме с частыми реверсами (S7), поэтому выбор мощности двигателя производится по нагрузочной диаграмме с учетом загрузки в переходных режимах.

Для предварительного определения мощности двигателя главного привода и построения нагрузочной диаграммы принимают в качестве исходных следующие технические данные:

- 1) наибольшее усилие резания $F_{Z.\max}$, Н, и соответствующая этому усилию наибольшая скорость прямого хода стола $v_{i\dot{\sigma}1}$, м/мин;
- 2) наибольшая скорость стола v_{\max} , м/мин;
- 3) наибольший вес обрабатываемой детали $G_{\ddot{a}\dot{\sigma}}$ и стола $G_{\ddot{n}\dot{\sigma}}$, Н ;
- 4) КПД передачи (до рейки стола) при полной нагрузке η_i ;
- 5) длина хода стола L, м, и коэффициент трения стола о направляющие μ (принимается равным 0,05...0,08);
- 6) суммарный момент инерции вращающихся частей механизма привода и движущихся поступательно детали и стола.

Задаваясь наиболее тяжелым режимом, определяют мощность резания, кВт:

$$P_Z = F_{Z.\max} v_{i\dot{\sigma}1} / (60 \cdot 1000). \quad (7.5)$$

Мощность потерь на трение стола о направляющие при прямом ходе, кВт,

$$\Delta P_{i\dot{\sigma}} = \frac{(G_{\ddot{a}\dot{\sigma}} + G_{\ddot{n}\dot{\sigma}})}{60 \cdot 10^3}. \quad (7.6)$$

Мощность на валу двигателя, кВт,

$$P_{\ddot{a}\dot{\sigma}} = \frac{P_Z + \Delta P_{i\dot{\sigma}}}{\eta_n} = \frac{F_{m.\max} v_{i\dot{\sigma}1}}{60 \eta_n} 10^{-3}, \quad (7.7)$$

где $F_{m.\max} = F_{Z.\max} + (G_{\ddot{a}\dot{\sigma}} + G_{\ddot{n}\dot{\sigma}} + F_x + F_y) \mu$ – тяговое усилие на рейке стола, Н;

$F_x, F_y, F_{Z.\max}$ – составляющие усилия резания.

Зависимость $F_m = f(v_{\bar{n}\delta})$ для определенного типа продольно-строгальных станков обычно задается графически (см. рис. 3) и состоит из двух участков: на первом из них тяговое усилие остается примерно постоянным от v_{\min} до $v_{i\delta 1}$, а на втором участке с ростом скорости усилие F_m уменьшается; следовательно, регулирование скорости привода стола на первом участке должно производиться при постоянном моменте (мощность при этом будет изменяться), а на втором с приблизительно постоянной мощностью (при уменьшающемся моменте).

Предварительный выбор мощности производится с учетом способа регулирования скорости привода (или скорости стола):

1) если предполагается применить асинхронный привод ($n = \text{const}$), то выбирается короткозамкнутый двигатель с номинальной мощностью

$P_{\bar{m}} \geq D_{\bar{a}\bar{a}.i\delta}$ и $n_{\bar{m}} = v_{i\delta 1} / \rho$, $\rho = v_{\bar{n}\delta} / n_{\bar{a}\bar{a}}$ – радиус приведения стола к валу двигателя, м/об;

2) если главный привод должен быть выполнен по системе Г-Д или ТП-Д, а регулирование угловой скорости двигателя во всем диапазоне будет производиться изменением ЭДС преобразователя, то предварительно по каталогу выбирается двигатель постоянного тока на номинальные мощность и частоту вращения

$P_{\bar{m}} \geq D_{\bar{a}\bar{a}.i\delta} \frac{v_{\max}}{v_{i\delta 1}}$ и $n_{\bar{m}} \approx v_{\max} / \rho$;

3) если будет использовано двухзонное регулирование скорости привода, то предварительно задаются возможным диапазоном изменения потока двигателя

$D_{\delta.\delta\bar{a}\bar{n}\bar{z}} = n_{\max} / n_{\min} \leq D_{\delta.\bar{a}\bar{i}}$, определяют $v_{\delta\bar{a}\bar{n}\bar{z}} = v_{\max} / D_{\delta.\delta\bar{a}\bar{n}\bar{z}}$ и подсчитывают

$$D_{\bar{a}\bar{a}.\delta\bar{a}\bar{n}\bar{z}} = \frac{D_{\bar{a}\bar{a}.i\delta} v_{\delta\bar{a}\bar{n}\bar{z}}}{v_{i\delta 1}} \quad (7.8)$$

и далее по каталогу на двигатели, допускающие регулирование частоты вращения ослаблением поля в нужном диапазоне, подбирают двигатель ближайшей большей мощности при $n_{\bar{m}} \approx v_{\delta\bar{a}\bar{n}\bar{z}} / \rho$, так как скорость стола и v_{\max} обеспечиваются изменением $\Phi_{\text{дв}}$ в диапазоне $D_{\delta} = v_{\max} / v_{\delta\bar{a}\bar{n}\bar{z}}$, где $D_{\bar{a}\bar{a}} = \text{const}$.

По номинальным данным выбранного двигателя постоянного тока $D_{\bar{m}}$, $U_{\bar{m}}$ и $I_{\bar{m}}$ выбирают преобразовательную установку.

Далее предварительно выбранный двигатель следует проверить по нагреву с учетом совместной работы двигателя и станка в установившихся и переходных режимах. Для этого строится нагрузочная диаграмма элект-

тропривода $M = f(t)$ для одного цикла работы станка. По исходным данным, приведенным ранее, определяют нагрузки привода в различных режимах.

7.4 Электропривод подачи суппортов продольно-строгальных станков

Подача суппортов продольно-строгальных станков производится периодически, обычно при реверсировании с обратного хода на прямой, и должна закончиться до начала резания. Подача осуществляется механическими, электромеханическими, электрическими или гидравлическими устройствами. Привод подачи должен обеспечивать регулирование подачи в диапазоне $(40... 80):1$, при этом время наибольшей подачи не должно превышать времени реверса стола станка (десятые доли секунды).

В современных станках для периодической подачи суппортов находят широкое применение электромеханические устройства с приводом от отдельного асинхронного двигателя, который автоматически включается в соответствующий момент цикла, производит перемещение суппорта и затем также автоматически выключается.

Пример такого устройства показан на рис. 12.

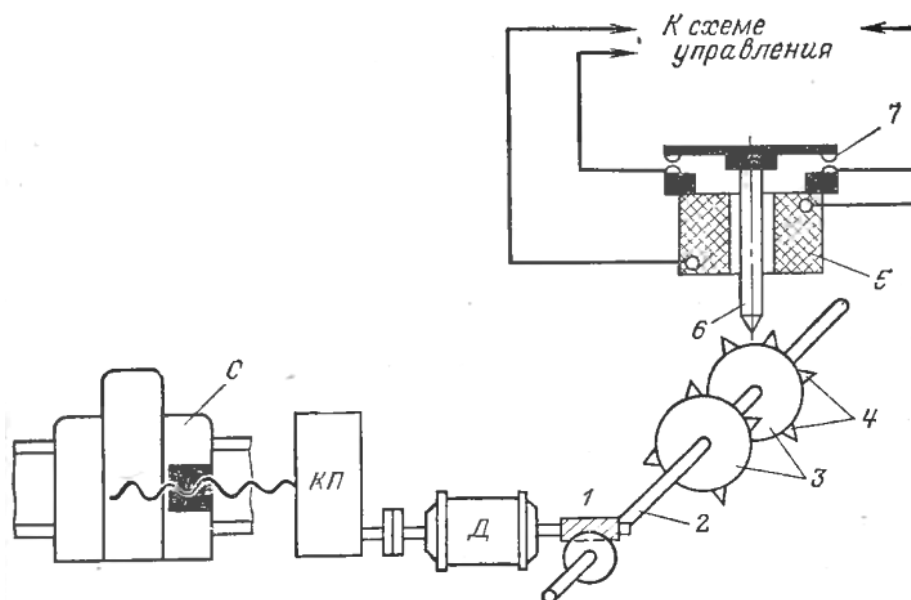


Рисунок 12 – Электромеханическая система подачи суппорта продольно-строгального станка

Двигатель Д через коробку передач КП приводит в движение суппорт станка С, а через червячную передачу 1 вращает валик 2, который несет несколько дисков 3 одного диаметра, но имеющих различное число выступов (шипов) 4. Расстояние между соседними выступами каждого

диска соответствует определенной подаче суппорта. Над дисками установлено электромагнитное реле 5, которое может перемещаться вдоль оси валика 2 с помощью каретки и реечной передачи (на схеме не показаны). Нижняя часть якоря реле имеет наконечник 6, а верхняя – замыкающие контакты 7.

В конце обратного хода стола станка одновременно получают питание двигатель подачи суппортов Д и реле 5, якорь которого опускается. Начинается подача суппорта, одновременно вращается валик 2 с дисками 3. Когда выступ диска, находящегося под якорем, приподнимает последний, контакты реле размыкаются, двигатель подачи отключается от сети и быстро останавливается. Механизм подачи готов к следующему циклу.

8 ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ

8.1 Назначение и устройство фрезерных станков

Фрезерные станки предназначены для обработки наружных и внутренних плоских и фасонных поверхностей, прорезки прямых и винтовых канавок, нарезки резьбы наружных и внутренних, зубчатых колес и т. п. Характерная особенность фрезерных станков – работа вращающимися многолезвийными режущими инструментами – фрезами. На рис. 13 показана схема фрезерования. Главным движением v_z является вращение фрезы 2, движением подачи v_f – перемещение изделия 1. Каждое из лезвий фрезы снимает стружку в течение лишь доли оборота фрезы, причем сечение стружки s непрерывно меняется от нуля до наибольшей величины.

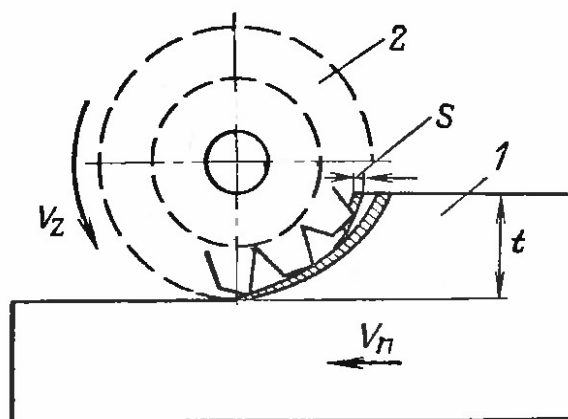


Рисунок 13 – Схема фрезерования

Фрезерные станки делятся на две основные группы: 1) станки общего назначения, к которым относятся горизонтальные, вертикальные и про-

дольно-фрезерные станки; 2) специализированные станки – зубофрезерные, копировально-фрезерные и др.

Вертикально-фрезерный станок показан на рис. 14.

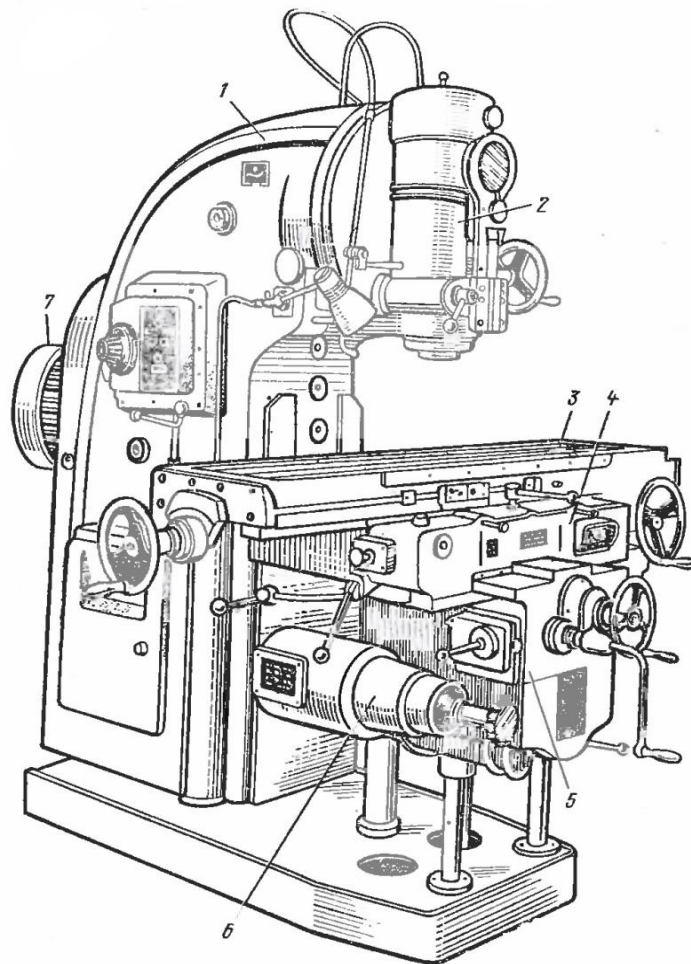


Рисунок 14 – Вертикально-фрезерный станок модели 6Н13

Основные узлы станка: станина 1, в верхней части которой расположена поворотная фрезерная головка 2, консоль 5, несущая салазки 4, рабочий стол 3. Консоль может передвигаться вверх и вниз по вертикальным направляющим станины. По горизонтальным направляющим консоли перемещаются салазки 4, а по направляющим салазок – рабочий стол. Таким образом, станок имеет три взаимно перпендикулярных движения подачи, осуществляемых через коробку подач 6 от встроенного внутри нее асинхронного двигателя. Вращение фрезе сообщается от двигателя 7 через коробку скоростей, расположенную внутри станины. Вертикально-фрезерные станки применяются главным образом для обработки плоскостей торцевыми фрезами, а также для фрезерования пазов, шпоночных канавок и т. п.

Горизонтально-фрезерные станки отличаются от вертикально-фрезерных расположением шпинделя, ось которого устанавливается горизонтально. Эти станки применяются для обработки плоскостей цилиндри-

ческими фрезами, для прорезания канавок дисковыми фрезами, для обработки линейных поверхностей фасонными фрезами и т. п.

Обработка фрезерованием горизонтальных, вертикальных и наклонных поверхностей крупногабаритных тяжелых деталей производится на продольно-фрезерных станках (рис. 15), по внешнему виду напоминающих продольно-строгальные. На траверсе и стойках располагаются шпиндельные бабки с цилиндрическими или торцевыми фрезами, осуществляющие главное (вращательное) движение в этих станках. Продольная подача сообщается столу с деталью, вертикальная и поперечная – инструменту. На продольно-фрезерных станках в электромашиностроении обрабатывают опорные поверхности лап и коробок выводов станин электрических машин.

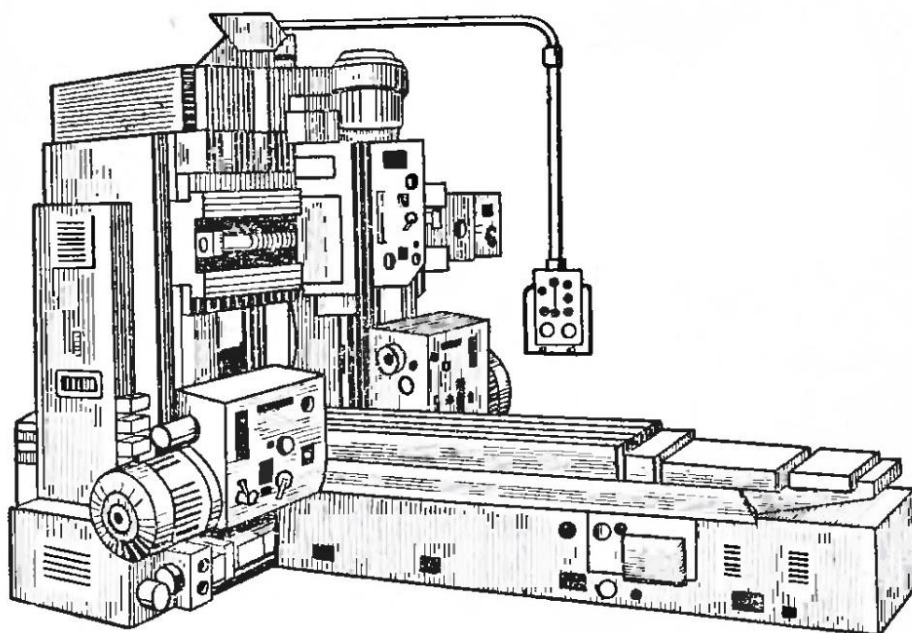


Рисунок 15 – Двухстоечный продольно-фрезерный станок

Копировально-фрезерные станки предназначены для обработки пространственно сложных поверхностей методом копирования по моделям. На этих станках изготавливаются рабочие колеса гидротурбин, ковочные и вырубные штампы, линейные и прессовые формы и др. Обработка подобных изделий на универсальных станках практически невозможна.

Наибольшее распространение получили копировально-фрезерные станки с электрическим следящим управлением – электрокопировальные фрезерные станки. Примером может служить станок модели 644Б (рис. 16). По направляющим станины 1 передвигается стол 2, на котором установлена стойка 3. На ее передней плоскости 4 закрепляются модель и заготовка. По неподвижной стойке 7 в вертикальном направлении может двигаться траверса 8, несущая шпиндельную бабку 9, в корпусе которой находятся двигатель шпинделя, коробка скоростей и шпиндель 11 с фрезой. Шпиндельная бабка перемещается вдоль оси шпинделя по направляющим тра-

версы. На кронштейне 6 шпиндельной бабки установлена копировальная головка 5 – копировально-измерительный прибор.

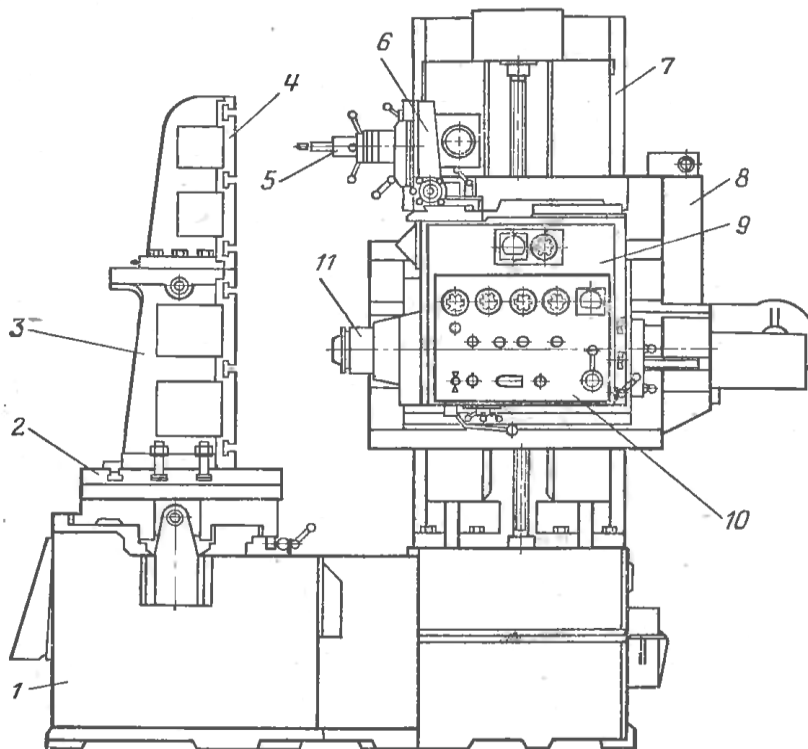


Рисунок 16 – Копировально-фрезерный станок модели 644Б

В переднюю стенку шпиндельной бабки встроен пульт управления 10. Станок имеет три движения подачи: горизонтальное перемещение стола, вертикальное перемещение шпиндельной бабки, поперечное перемещение шпиндельной бабки вдоль оси шпинделя. Обработка деталей производится пальцевыми цилиндрическими или конусными фрезами, торцевыми фрезами и др. Обработка объемных деталей на копировально-фрезерном станке происходит строчками – горизонтальными или вертикальными (рис. 17).

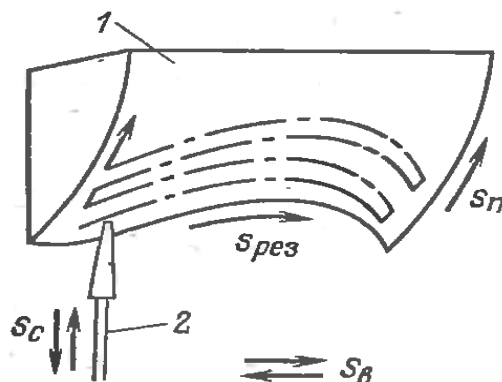


Рисунок 17 – Схема объемного копирования

Модель 1 как бы разбивается на ряд плоских профилей. Движение копирующего пальца 2 вдоль такого профиля получается как сумма движений ведущей подачи s_a и следящей поперечной подачи s_n , т. е. осуществляется двумерное копирование. После прохода строчки совершается периодическая подача s_f . Далее следует изменение направления ведущей подачи, образование новой строчки и т. д.

8.2 Типы электроприводов станков

Фрезерные станки относятся к группе станков с главным вращательным движением. Диапазон регулирования угловых скоростей шпинделя составляет от 20:1 до 60:1 при сохранении постоянства отдаваемой электродвигателем мощности. Изменения угловой скорости шпинделя в процессе обработки, как правило, не требуется, поэтому для фрезерных станков обычно применяется ступенчатое регулирование скорости главного привода. Особых требований в отношении пускового момента, а также продолжительности пуска и торможения привода не предъявляется.

Для приводов главного движения фрезерных станков малых и средних размеров используются одно- или многоскоростные асинхронные короткозамкнутые двигатели в сочетании с коробкой скоростей. Исполнение двигателей обычно фланцевое. Привод подачи таких станков в большинстве случаев осуществляется от главного двигателя через многоступенчатую коробку подач. Общий диапазон регулирования подачи до (20...30):1. В станках, на которых не производятся зуборезные работы, для привода подачи целесообразно применять отдельные электродвигатели, что значительно упрощает конструкцию станка.

Главный привод тяжелых продольно-фрезерных станков также выполняется от асинхронных двигателей с механическим ступенчатым изменением угловой скорости шпинделя. Для приводов подачи стола и фрезерных головок таких станков, диапазон регулирования скорости которых достигает значений (40...60):1, применяются синхронные двигатели, управляемые частотным преобразователем, и двигатели постоянного тока, включаемые по системе ТП-Д.

Вспомогательные приводы фрезерных станков: приводы насосов охлаждения, смазки и гидросистем, быстрого перемещения фрезерных головок и поперечин у продольно-фрезерных станков и других – осуществляются от отдельных асинхронных электродвигателей.

8.3 Расчет мощности двигателей фрезерных станков

Фрезерные станки общего назначения и зубофрезерные станки большей частью работают в продолжительном режиме с постоянной

нагрузкой. В этом случае мощность двигателя определяется по рассчитанной, исходя из технических показателей, наибольшей нагрузке, возможной для данного станка.

Нормативная скорость резания, м/мин, при фрезеровании определяется по формуле

$$v_z = \frac{C_v d^q}{T^m s^{Y_v} t^{X_v} B^k z^n}, \quad (8.1)$$

где C_v – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала, типа фрезы (цилиндрическая, торцевая и т. д.) и вида обработки (черновая или чистовая);

d – диаметр фрезы, мм;

z – число зубьев фрезы;

s – подача на зуб фрезы, мм;

t – глубина фрезерования (толщина слоя металла, снимаемого за один проход), мм;

B – ширина фрезерования, мм;

T – стойкость фрезы, принимаемая обычно для цилиндрических, торцевых, дисковых и фасонных фрез при обработке стали и ковкого чугуна – 180 мин, при обработке серого чугуна – 240 мин.

Усилие резания или окружное усилие при фрезеровании рассчитывается по формуле, Н,

$$F_z = 9,81 C_F t^{X_F} s^{Y_F} z d^i. \quad (8.2)$$

Значения показателей степени и коэффициентов в уравнениях (8.1) и (8.2) берутся из справочника по режимам резания. Подача для цилиндрических фрез при черновом (грубом) фрезеровании на мощных станках составляет $s = 0,02 \dots 0,6$ мм на зуб. При чистовом фрезеровании подача снижается до $s = 0,02 \dots 0,08$ мм на зуб. Глубина фрезерования t может достигать до 15 мм.

При известных значениях усилия и скорости резания мощность резания можно определить по формуле, кВт,

$$P_z = \frac{F_z v_z}{60 \cdot 10^{-3}}. \quad (8.3)$$

Мощность на валу главного электродвигателя, соответствующая мощности резания, определяется с учетом потерь в механических передачах станка по формуле

$$P_{\dot{a}\dot{a}} = \frac{D_{z.\dot{m}\dot{i}}}{\eta_{\dot{n}\dot{o}.\dot{m}\dot{i}}}, \quad (8.4)$$

где $P_{z.\dot{m}\dot{i}}$ – наибольшая возможная (номинальная) мощность резания;
 $\eta_{\dot{n}\dot{o}.\dot{m}\dot{i}}$ – КПД станка при номинальной нагрузке (обычно составляет 0,75...0,8).

По найденному значению $P_{\dot{a}\dot{a}}$ выбирается двигатель равной или несколько большей мощности на соответствующую номинальную частоту вращения.

При механическом приводе подачи от главного двигателя через коробку подач мощность этого двигателя должна быть примерно на 5 % больше мощности, необходимой для цепи главного движения.

Машинное время за один проход фрезы при циклическом фрезеровании определяется по формуле, мин,

$$t_M = \frac{(l + l_0 + y)}{s_M}, \quad (8.5)$$

где l – длина фрезерования, мм;

l_0 – длина врезания, мм;

y – перебег фрезы, мм;

s_M – минутная подача (скорость подачи), мм/мин.

Длина врезания определяется по формуле

$$l_0 = \sqrt{t - (d - t)}, \quad (8.6)$$

где t – глубина резания, мм;

d – диаметр фрезы, мм.

Представляет интерес расчет мощности двигателя подачи стола тяжелых продольно-фрезерных станков, диапазон регулирования скорости рабочих подач которых равен $D_{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{\alpha}} = (30..200) : 1$, а быстрые перемещения в 1,5...4,2 раза больше $V_{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{\alpha}.\dot{i}}$. Кинематическая схема привода стола оказывается наиболее простой при условии, что весь диапазон подач (от минимальной рабочей до ускоренного перемещения) обеспечивается за счет регулирования угловой скорости двигателя. При этом мощность двигателя, кВт, в случае регулирования угловой скорости только изменением U_y определяется: наибольшим тяговым усилием на столе $F_{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{\alpha}\max}$, наибольшей скоростью быстрого перемещения $V_{\dot{\alpha}.\dot{i}\dot{\alpha}\dot{\delta}}$ и потерями в передаче (η_i). Расчетная формула имеет вид:

$$P_{\dot{a}\dot{a}\dot{\delta}\dot{a}\dot{n}\dot{z}} = \frac{F_{T.\max} v_{\dot{a}\dot{i}\dot{a}\dot{\delta}}}{60\eta_i} 10^{-3}. \quad (8.7)$$

Технические данные основных моделей продольно-фрезерных станков показывают, что в диапазоне рабочих подач требуется регулирование скорости при $F_{T.\max}$, а при быстрых перемещениях стола требуется тяговое усилие уменьшается в 1,5...2 раза. Двигатель, выбранный по выражению (8.7), не используется по мощности во всем диапазоне регулирования.

Для наиболее полного использования электропривода угловую скорость двигателя постоянного тока независимого возбуждения в зоне рабочих подач следует регулировать изменением U_y , а при быстрых перемещениях – изменением $\hat{O}_{\dot{a}\dot{i}\dot{c}\dot{a}}$, т. е. следует применять двухзонное регулирование скорости привода.

Практически не всегда удастся обеспечить совпадение необходимых диапазонов регулирования скорости подачи стола с регулировочными возможностями двигателей, так как обычно $D_{\hat{O}_{\dot{a}\dot{i}\dot{i}}}$ < $D_{\dot{a}\dot{i}\dot{a}\dot{\delta}}$ стола, и приходится применять регулирование угловой скорости двигателя изменением напряжения на якоре на том участке диапазона регулирования, где $F_T < F_{T.\max}$, т. е. несколько завышать установленную мощность двигателя.

9 ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

9.1 Назначение и устройство шлифовальных станков

Шлифовальные станки применяются для чистовой обработки деталей шлифовальными абразивными кругами, снимающими с поверхности детали тонкий слой металла. На шлифовальных станках можно обрабатывать плоские, цилиндрические наружные и внутренние поверхности, шлифовать зубья шестерен, затачивать различные инструменты и т. д. Шлифовальные станки получили широкое распространение во всех отраслях промышленности в качестве станков общего и специального назначения.

Станки общего назначения делятся на следующие основные типы: а) круглошлифовальные; б) внутришлифовальные; в) плоскошлифовальные; г) бесцентровые кругло- и внутришлифовальные. Специализированные шлифовальные станки предназначаются для получения весьма чистых (гладких) поверхностей – доводочные, отделочные станки и другие, либо для выполнения определенных операций над различными деталями – резьбошлифовальные, шлицешлифовальные и др.

С внедрением в практику новых методов получения заготовок с малыми припусками (ковка в штампах, литье в формы под давлением и др.)

появилась возможность обрабатывать такие заготовки сразу шлифованием, минуя обработку на других металлорежущих станках. Поэтому шлифовальные станки со временем могут оказаться преобладающими среди других металлорежущих станков.

Круглошлифовальные станки предназначены для шлифования цилиндрических поверхностей тел вращения, пологих конических и торцевых поверхностей. В электромашиностроении на таких станках шлифуют валы электродвигателей. На рис. 18 изображен круглошлифовальный станок, основными узлами которого являются: станина 1; рабочий стол 2 с размещенными на нем передней 3 и задней 5 бабками; шлифовальная бабка 4, на шпинделе которой закрепляется шлифовальный круг 6. Обрабатываемая деталь устанавливается в центрах задней и передней бабки и закрепляется в патроне передней бабки. Патрон получает вращение от электродвигателя через плоскоремennую передачу. Шлифовальный круг приводится во вращение от главного двигателя 7 через клиноремennую передачу.

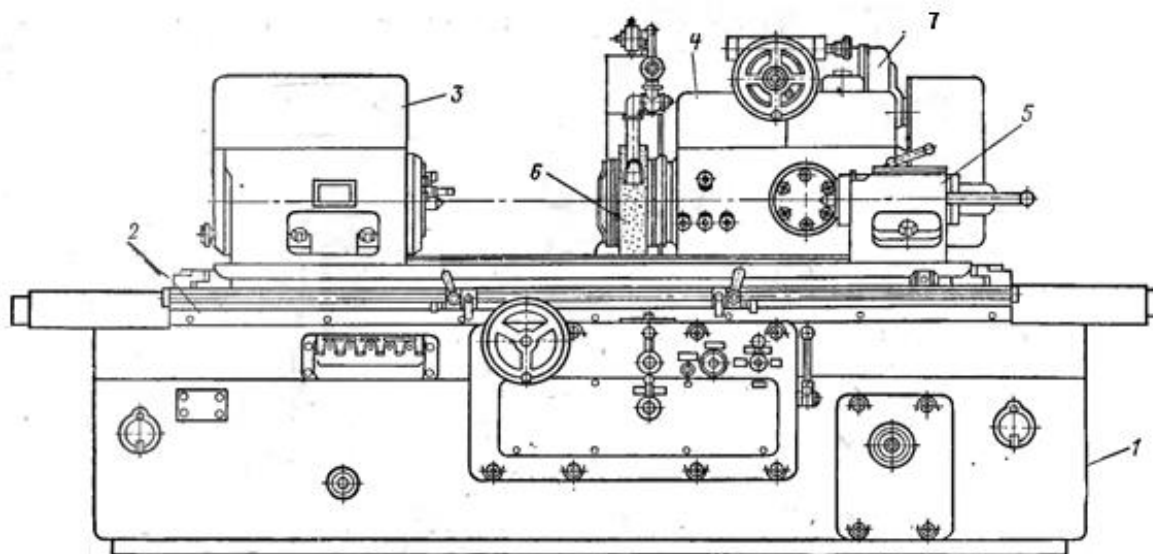


Рисунок 18 – Общий вид круглошлифовального станка модели 3151

На рис. 19, а изображена схема процесса наружного шлифования на круглошлифовальном станке. Шлифовальный круг 2 и обрабатываемая деталь 1 вращаются в разные стороны. Вращение детали создает круговую подачу v_f , вращение шлифовального круга – главное движение – скорость резания v_s . Для обработки детали по длине, если она превышает ширину круга, стол станка с установленной на нем деталью совершает возвратно-поступательное движение (создает продольную подачу s_1). Шлифовальный круг совершает поперечное периодическое перемещение относительно детали – поперечную подачу s_2 (подачу на глубину резания).

В тяжелых круглошлифовальных станках при больших размерах обрабатываемых деталей продольное перемещение совершает шлифовальная бабка с кругом, а стол с деталью, закрепленной в передней и задней бабках, остается неподвижным.

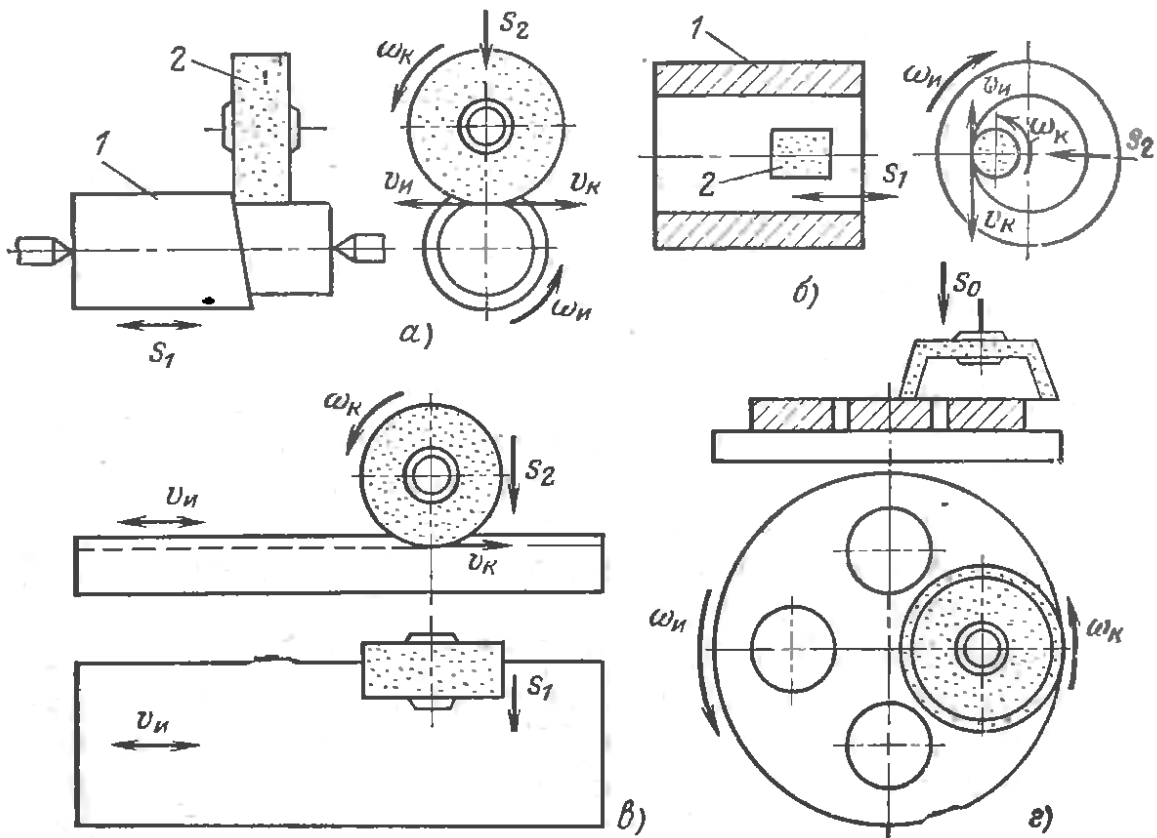


Рисунок 19 – Схемы движений в шлифовальных станках

Внутришлифовальные станки предназначены для шлифования внутренних цилиндрических, конических и других поверхностей тел вращения (рис. 19, б). Обычно у таких станков обрабатываемая деталь вращается вокруг оси шлифуемого отверстия, осуществляя круговую подачу v_f . Шлифовальный круг вращается вокруг своей оси, создавая скорость резания v_e . Продольная подача s_1 получается за счет возвратно-поступательного движения шлифовального круга или детали. Поперечная подача s_2 производится путем периодического поперечного перемещения шлифовальной бабки в конце каждого прохода поверхности обрабатываемой детали.

Плоскошлифовальные станки предназначены для обработки наружных поверхностей плоских деталей. По форме стола, на котором закрепляются шлифуемые изделия, эти станки подразделяются на станки с прямоугольным и круглым столами, а по расположению шлифовального круга – на станки с горизонтальным и вертикальным шпинделем.

На рис. 20 показан общий вид плоскошлифовального станка с прямоугольным столом. Его основные узлы: станина 1, стойка 2, шлифоваль-

ная бабка 3, рабочий стол 4. Дисковый абразивный круг 5 укрепляется на конце шпинделя шлифовальной бабки.

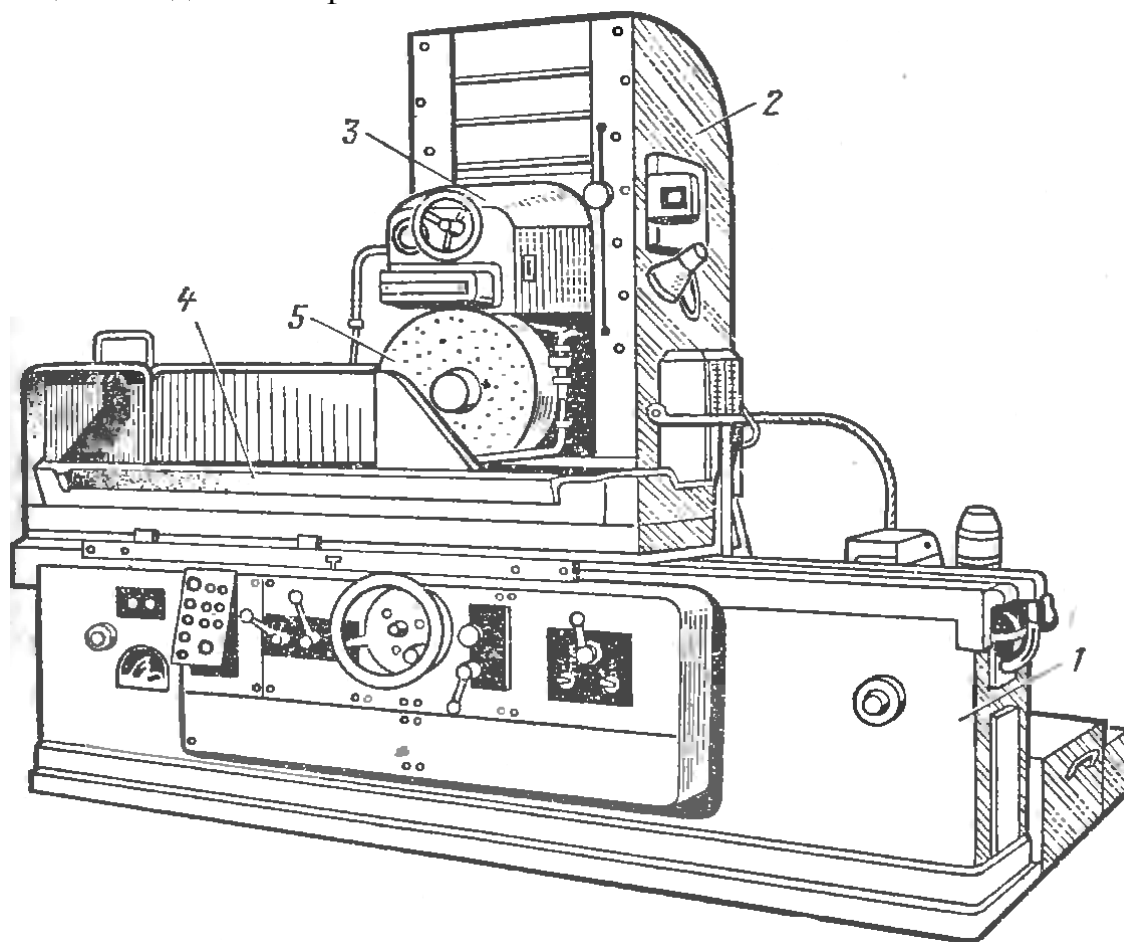


Рисунок 20 – Общий вид плоскошлифовального станка с прямоугольным столом

Шлифуемая деталь в зависимости от ее формы, размера и материала закрепляется непосредственно на столе станка либо на специальной магнитной плите, устанавливаемой на столе.

В плоскошлифовальных станках, кроме главного движения вращения круга, различают следующие виды движений:

1 В станках с прямоугольным столом и при обработке деталей периферией круга (см. рис. 19, в) стол с деталью совершает возвратно-поступательное движение подачи v_f , шлифовальная бабка (или стол) – периодическое перемещение s_1 на величину, несколько меньшую ширины круга, после каждого хода стола, а круг получает вертикальное перемещение – подачу s_2 на глубину резания – после очередной обработки всей плоскости шлифования.

2 В станках с круглым столом при обработке деталей торцом круга (см. рис. 19, г) столу сообщается движение круговой подачи ω_f , а кругу – вертикальное периодическое перемещение s_0 .

9.2 Типы электроприводов шлифовальных станков

Шлифовальные станки относятся к точным станкам, поэтому конструкции их отдельных узлов и кинематические передачи должны быть максимально просты, что достигается широким применением индивидуального привода. В шлифовальных станках различают следующие виды электроприводов: главный привод (вращение шлифовального круга), привод вращения изделия, привод подачи, вспомогательные приводы и специальные электромеханические устройства.

В шлифовальных станках малых и средних размеров при мощности главного привода до 10 кВт вращение круга обычно осуществляется от односкоростных асинхронных короткозамкнутых двигателей. На круглошлифовальных станках при значительных размерах шлифовальных кругов (диаметр до 1 000 мм, ширина до 700 мм), применяют понижающие ременные передачи от двигателя к шпинделю и электрическое торможение привода для уменьшения времени остановки.

На внутришлифовальных станках обработка ведется кругами небольших размеров, поэтому в них применяют ускоряющие передачи от двигателя к шпинделю или используют специальные высокоскоростные асинхронные двигатели, встраиваемые в корпус шлифовальной бабки. Устройство, в котором короткозамкнутый двигатель и шлифовальный шпиндель конструктивно объединены в один узел, называют электрошпинделем. Частоты вращения таких двигателей 24 000...48 000 об/мин, а при малых диаметрах шлифовальных кругов (до 5...7 мм) доходят до 150 000...250 000 об/мин.

Статор двигателя электрошпинделя (рис. 21) набирается из листов электротехнической стали, в его пазах располагается двухполюсная обмотка, а ротор выполняется типа беличьей клетки либо в виде массивного стального цилиндра. Двигатели электрошпинделей питаются от специальных индукционных генераторов повышенной частоты ($f_A = 300...2000$ Гц) или от статических преобразователей частоты на тиристорах.

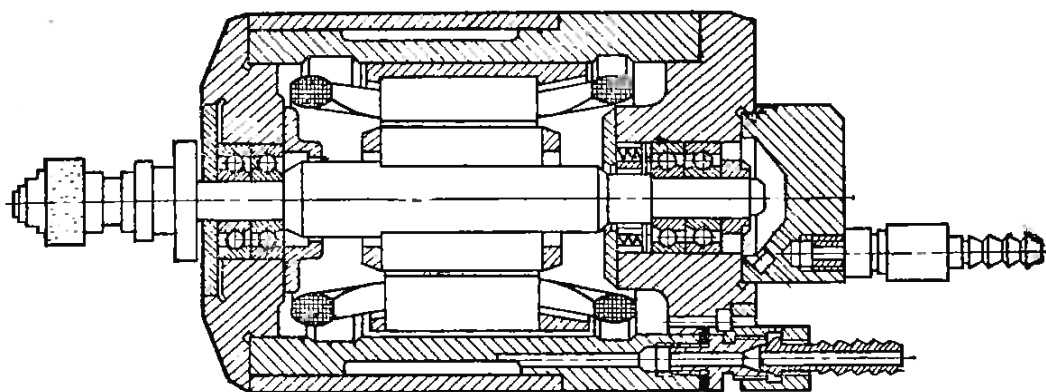


Рисунок 21 – Электрошпиндель типа Ш-24/2,2 горизонтального исполнения

При работе шлифовальный круг постепенно изнашивается и его диаметр D_e уменьшается, что вызывает уменьшение скорости резания, так

как $v_e = \frac{\pi D_e n_e}{60 \cdot 1000}$, м/с. Для получения хорошего качества шлифуемой по-

верхности и повышения производительности станка необходимо поддерживать скорость резания при износе круга постоянной. С этой целью в крупных шлифовальных станках устанавливают двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, угловая скорость которых регулируется изменением потока возбуждения в диапазоне (2...3):1. Питание таких двигателей осуществляется от полупроводниковых выпрямителей.

Для вращения обрабатываемого изделия на внутришлифовальных станках применяют асинхронные короткозамкнутые двигатели одно- или многоскоростные. На тяжелых круглошлифовальных станках привод вращения изделия выполняется по системе Г-Д с диапазоном регулирования скорости от (8...10):1 до (20...25):1 и более. Получили распространение приводы с тиристорными преобразователями переменного тока в постоянный, а также приводы с магнитными усилителями типа ПМУ на мощности 0,1...8 кВт. Особенностью нагрузки привода вращения изделия таких станков является большой момент сопротивления при пуске (до $2M_{in}$).

Подача (возвратно-поступательное движение стола, продольное и поперечное перемещение шлифовальной бабки) на шлифовальных станках небольших размеров производится от гидропривода. Приводы подачи тяжелых плоско- и круглошлифовальных станков выполняются от двигателя постоянного тока по системе ЭМУ-Д, ТП-Д с диапазоном регулирования до (40...50):1. Иногда для приводов продольных подач используют многоскоростные асинхронные двигатели с многоступенчатой коробкой подач. Однако такой привод применяют редко, так как он не дает возможности плавного регулирования и не обеспечивает постоянства заданной скорости (допустимая погрешность – до 5 %). Для вращения круглого стола плоскошлифовальных станков часто применяют асинхронные короткозамкнутые двигатели.

Для вспомогательных приводов шлифовальных станков (приводы насосов смазки и охлаждения, насосов гидропривода, быстрого перемещения шлифовальной бабки и др.) также применяются асинхронные короткозамкнутые двигатели.

9.3 Расчет мощности двигателя главного привода шлифовальных станков

Во всех шлифовальных станках главным движением является вращение шлифовального круга. Скорость резания v_z определяется окружной скоростью круга и обычно лежит в пределах от 30 до 50 м/с, но в некоторых случаях достигает 75 м/с. Толщина снимаемого слоя металла при таких скоростях резания незначительна.

Мощность резания, кВт, определяется по формулам: при шлифовании периферией круга:

$$D_z = C_p v_{\dot{e}}^A t^X B^Z, \quad (9.1)$$

где C_p – коэффициент, характеризующий материал изделия и твердость круга;

$v_{\dot{e}}$ – окружная скорость детали или скорость движения стола, м/мин;

t – глубина шлифования, мм;

s_1 – подача в направлении оси шлифовального круга (продольная или поперечная) в миллиметрах на один оборот детали или в долях ширины круга на один двойной ход стола (см. рис. 19);

d – диаметр шлифования, мм;

B – ширина шлифования, мм.

Значения коэффициентов и показателей степени в формуле (9.1) приводятся в технологических справочниках. Скорость $v_{\dot{e}}$, глубину шлифования t и продольную подачу s_1 выбирают в зависимости от вида шлифования.

После определения мощности резания при черновом D_{z1} и чистовом D_{z2} шлифовании и расчета соответствующего машинного времени t_{M1} и t_{M2} для обоих видов обработки подсчитывают вспомогательное время $\sum t_0$ и с учетом потерь в передачах строят нагрузочную диаграмму шлифовального станка. Затем определяют эквивалентную мощность двигателя по формуле, кВт,

$$P_{\dot{Y}.N} = \sqrt{\frac{D_1^2 t_{M1} + P_2^2 t_{M2} + P_0^2 \sum t_0}{t_{M1} + t_{M2} + \sum t_0}}. \quad (9.2)$$

Номинальную мощность двигателя, работающего в продолжительном режиме, выбирают по каталогу из условия $P_{\dot{m}} \geq D_{\dot{Y}.N}$, с

вращения $n_{\dot{m}} \approx \frac{60v_k i_n}{\pi D_k}$

10 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА

10.1 Структура автоматизированного электропривода постоянного тока

В состав комплектного электропривода постоянного тока (рис. 22) входят управляемые выпрямители, обеспечивающие регулирование напряжений якоря и тока обмотки возбуждения. В таком варианте обеспечивается двухзонное регулирование скоростью электродвигателя.

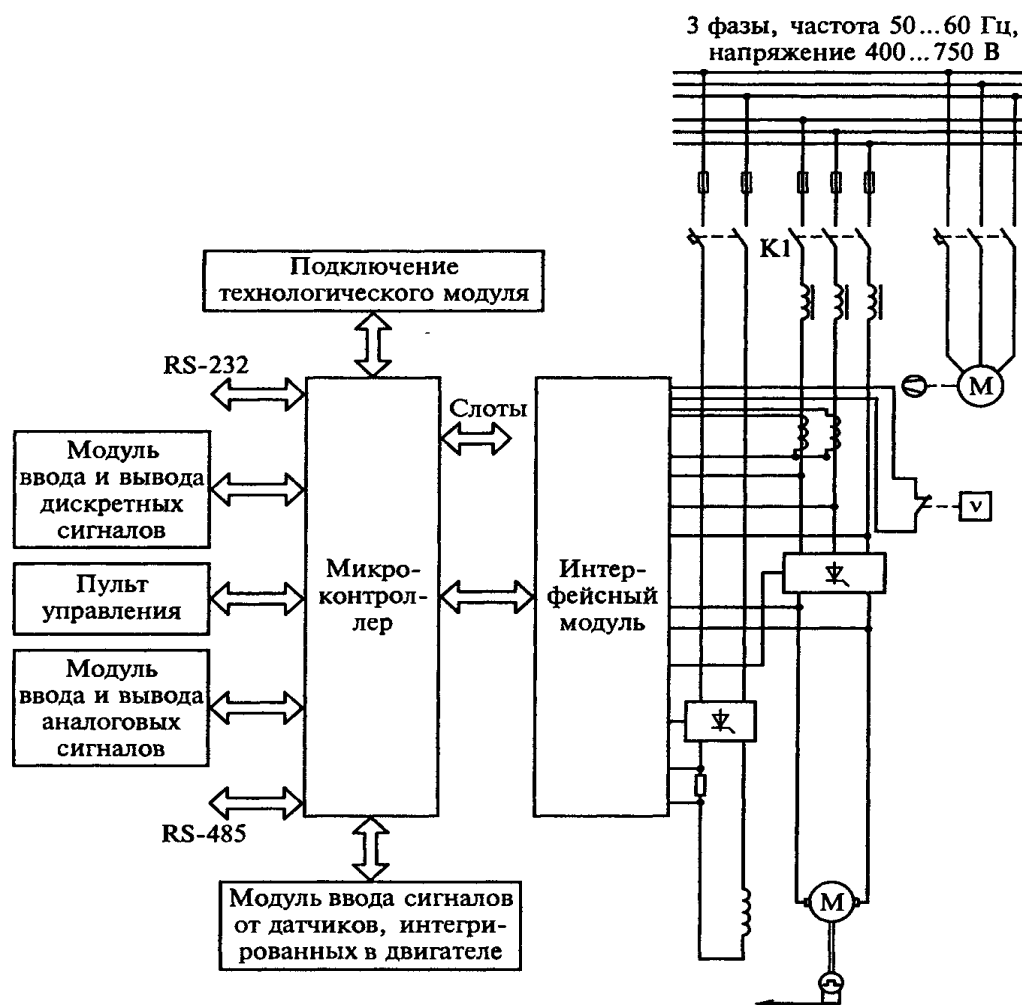


Рисунок 22 – Схема электропривода постоянного тока

Силовые выпрямители имеют различные электрические схемы, состоящие из одной, двух или четырех управляемых трехфазных групп, и выполняются из электрически изолированных тиристорных модулей.

Блоки имеют естественное воздушное охлаждение, а блоки, рассчитанные на большие мощности, – принудительное воздушное охлаждение (вентилятор или сборку из нескольких вентиляторов).

Контроллер обрабатывает информацию, поступающую от внешних датчиков, реализует функции управления и диагностирования. Фактические параметры могут быть определены в аналоговой и цифровой форме.

Шкаф электроники содержит аппаратуру электроники и дополнительные платы. Внешние сигналы (бинарные, аналоговые, импульсные и др.) передаются на модули ввода и вывода по кабелям. Экранированные кабели позволяют устанавливать датчики на некотором расстоянии от силового блока электропривода.

Пульт управления состоит из блока индикации, светодиодов для индикации состояния, кнопок для ввода управляющих команд. В состав электропривода также входит выносной пульт управления.

К электроприводу через последовательный интерфейс может быть подключен персональный компьютер, который выполняет следующие функции: доступ к параметрам электропривода; запись и хранение параметров; копирование существующих параметров на другие преобразователи; контроль через словосостояние и считывание фактических величин; чтение сигналов неисправности и системы индикации аварии.

Датчики, интегрированные в электроприводе, позволяют контролировать температуру двигателя, воздушный поток, проходящий через вентилятор, состояние подшипников.

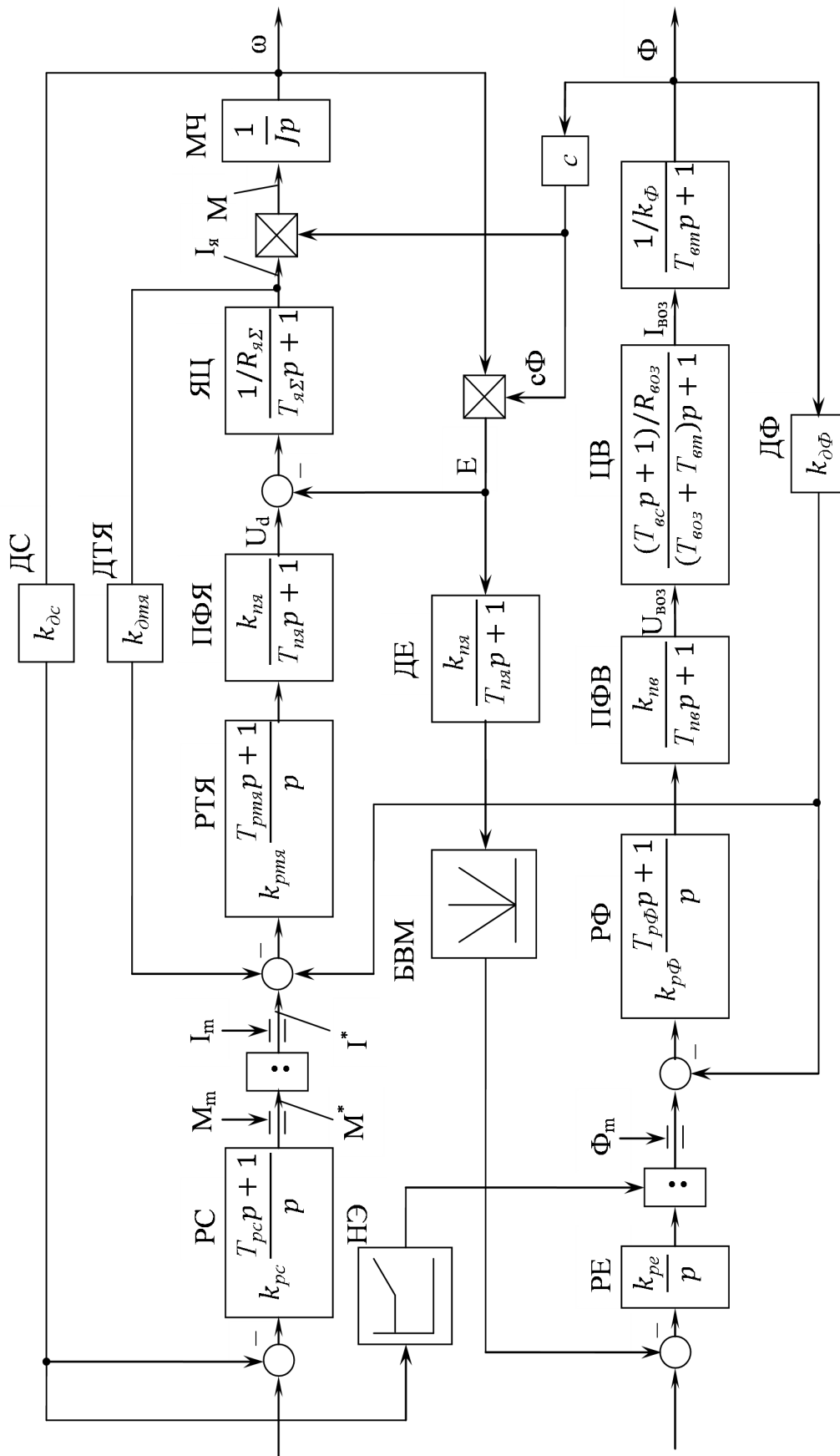
Если к данному преобразователю необходимо подключить электродвигатель большей мощности, к силовой схеме подключаются дополнительные тиристорные модули.

10.2 Особенности двухзонных электроприводов

Двухзонные электроприводы используют, прежде всего, в тех механизмах, статический момент которых с увеличением скорости уменьшается, поскольку допустимый момент электрического двигателя с ослаблением поля также снижаются. Это дает возможность в сравнении с однозонными приводами полнее использовать мощность двигателя.

В современных электроприводах используют только системы зависящего (от напряжения якоря и его ЭДС) ослабления поля. Они обычно построены как двухконтурные либо одноконтурные с переключениями обратных связей. Для обеспечения неизменного качества переходных процессов в процессе ослабления поля действует адаптация регуляторов скорости и ЭДС.

Двухконтурная система имеет наилучшие динамические характеристики (рис. 23). Она состоит из двух взаимосвязанных контуров – контура регулирования якоря (регуляторы скорости РС и тока якоря РТЯ с переда-



точной функцией цепи якоря ПФЯ) и контура регулирования цепи возбуждения (регуляторы ЭДС РЕ и потока РФ с передаточной функцией цепи возбуждения ПФВ).

Делитель (делительное устройство) в контуре скорости преобразует выходной сигнал РС (задание на момент M^*) на задание на ток якоря $I^* = M^* / \hat{n}\hat{\Omega}$. Необходимость операции деления в регуляторе обусловлена наличием операции умножения в его объекте управления ($\dot{I} = \hat{n}\hat{\Omega}I_\beta$). Соответственно, делитель (делительное устройство) на выходе регулятора ЭДС компенсирует нелинейность в объекте его управления ($E = c\Phi\omega$). Ограничение максимального момента в двухзонных САР с адаптацией происходит путем ограничения выходного сигнала РС, максимального тока и потока – на входах соответствующих регуляторов. Нелинейный элемент НЭ обеспечивает корректность работы делителя (делительное устройство) на малых скоростях.

В первой зоне сигнал датчика ЭДС **меньше от задания**, и регулятор ЭДС насыщенный (уровень насыщения соответствует номинальному потоку). Это задание на номинальный поток и обрабатывается регулятором потока. Регулирование скорости осуществляется изменением напряжения на якоре при неизменном потоке с помощью регуляторов скорости якоря и регулятора тока якоря.

Если заданная скорость превышает номинальную, на входе регулятора скорости присутствует положительная ошибка регулирования, что вызывает повышение задания на ток, выходного сигнала РТЯ и выходного напряжения U_d передаточной функции цепи якоря (т. е. канал регулирования цепи якоря пытается поднять скорость увеличением напряжения на якоре выше номинального). Как только скорость превысит номинальную, а ЭДС якоря – заданную (ЭДС при номинальной скорости и номинальном потоке), регулятор ЭДС выйдет из насыщения, и задание на поток начнет уменьшаться. Темп увеличения напряжения якоря и ЭДС уменьшится, поскольку скорость будет возрастать уже и по причине ослабления поля. Вследствие большой инерционности контура возбуждения некоторое время после достижения номинальной скорости контур якоря повышает напряжение на якоре. Поэтому в момент перехода во вторую зону всегда наблюдается перерегулирование по напряжению и ЭДС. Регулятор ЭДС, уменьшая задание на поток, постепенно берет на себя функцию регулирования скорости, и после достижения заданной скорости исчезает ошибка ее регулирования, регулятор скорости перестает увеличивать задание на ток и напряжение якоря. Так как этот момент ЭДС пока немного превышает номинальный, некоторое время поток уменьшается, что приводит к перерегулированию по скорости, изменению знака ошибки ее регулирования и возвращению напряжения на якоре к номинальному значению. Далее установившееся значение потока определяется заданием на скорость. В процессе пуска и торможения с неизменным заданием на ток якоря во второй

зоне пропорциональность между этим током и моментом нарушается из-за изменения потока.

Управление регулятора потока по структуре ничем не отличается от подобного в контуре тока якоря. Поэтому РФ всегда пропорционально-интегральный, синтезированный по модульному оптимуму. Во время синтеза РФ необходимо иметь в виду, что благодаря насыщению магнитопровода коэффициент передачи канала $I_{\text{воз}} \rightarrow \Phi$, а также постоянные времени цепи возбуждения $T_{\text{воз}}$, $T_{\text{вс}}$ с ослаблением поля возрастают. При этом переходный процесс в контуре становится более колебательным. Поэтому постоянную времени регулятора потока необходимо выбирать соответственно **постоянной часа** объекта

$$\dot{O}_{\delta\delta} = \dot{O}_{\hat{a}\hat{c}\hat{a}} + \dot{O}_{\hat{a}\delta}, \quad (10.1)$$

которая соответствует минимальному потоку. Когда с увеличением потока уменьшаются постоянные времени $T_{\text{воз}}$, $T_{\text{вт}}$, устойчивость замкнутого контура увеличивается.

Кроме того, коэффициент передачи регулятора, хотя и выбирается по параметрам при номинальном потоке, настраивается на апериодический характер переходного процесса:

$$k_{\delta\delta} = \frac{k_{\delta} R_{\hat{a}\hat{c}}}{\dot{a}_{\delta} \dot{O}_{\hat{a}} k_{\hat{a}\delta} k_{\hat{a}\delta}}, \quad (10.2)$$

где k_{Φ} – коэффициент пропорциональности тока возбуждения и потока при $\Phi = \Phi_{\text{н}}$;

a_{Φ} – настроечный коэффициент.

Быстродействие при этом ухудшается.

Если коэффициент k_{Φ} изначально не известен, можно рассчитать соотношение для номинального тока возбуждения:

$$\frac{k_{\hat{a}\delta}}{k_{\delta}} = \frac{U_{\hat{a}\delta t}}{I_{\hat{a}\hat{c}\hat{a}}}, \quad (10.3)$$

где $U_{\text{дФн}}$ – напряжение датчика потока при $\Phi = \Phi_{\text{н}}$ (около 10 В).

Благодаря тому, что нелинейность и основная инертность остались в середине замкнутого контура потока, регулятор ЭДС

$$W_{0E} = \frac{k_{\delta}}{U_{\hat{a}\hat{n}\hat{t}}} \frac{\tilde{n}\omega/k_{\hat{a}\delta}}{\dot{O}_{\hat{e}\delta} \delta + 1} \frac{k_{\hat{a}\hat{a}}}{\dot{O}_{\hat{a}\hat{a}} \delta + 1}, \quad (10.4)$$

где $T_{\text{кФ}} = a_{\Phi} T_{\text{пв}}$ – постоянная времени замкнутого контура потока;

$U_{\text{дсн}}$ – выходное напряжение ДС при номинальной скорости;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент передачи делителя.

Коэффициент усиления регулятора ЭДС:

$$k_{pe} = \frac{U_{\text{ант}} k_{\text{ао}}}{\dot{a}_{\text{А}} \dot{\omega}_{\text{м}} k_{\text{аа}} \tilde{n} \omega_i k_{\text{а}}} = \frac{U_{\text{ант}} U_{\text{аот}}}{\dot{a}_{\text{А}} \dot{\omega}_{\text{м}} U_{\text{аат}} k_{\text{а}}}, \quad (10.5)$$

где $a_E = 2 \dots 3$;

$U_{\text{дсн}}$ – выходное напряжение датчика ЭДС при номинальной скорости.

Когда постоянная времени датчика ЭДС близка к постоянной времени контура потока, их относят к некомпенсированным ($T_{\text{ме}} = T_{\text{кф}} + T_{\text{де}}$), а регулятор ЭДС выполняют интегрированным. Если одна из них намного меньше (довольно редкий случай), ее принимают некомпенсированной, а регулятор должен быть пропорционально-интегральным.

В некоторых электроприводах вместо контура ЭДС используют контур напряжения якоря (т. е. ослабление поля осуществляется в функции напряжения). Это дает возможность отказаться от датчика ЭДС, но ухудшается динамика.

Обмотка возбуждения имеет очень большую инерцию. Поэтому для обеспечения требуемого темпа роста потока при торможении с заданной производной скорости преобразователь обмотки возбуждения должен иметь возможность увеличения выходного напряжения выше номинального (форсировка напряжения). Необходимость форсирования следует учитывать при выборе силового преобразователя.

10.3 Ограничение тока (момента) в электроприводах постоянного тока

Целый ряд станочных механизмов может требовать от системы управления электроприводом ограничения момента (или тока) двигателя при возникновении нагрузок. Иногда возникают требования ограничения скорости, напряжения и т. д. В таких случаях для получения желаемых механических характеристик могут дополнительно применяться отрицательные обратные связи с отсечками. Наибольшее распространение находит отрицательная обратная связь по току с отсечкой (токовая отсечка).

Системы токоограничения используют для ограничения тока в пускорезных режимах и при изменении нагрузки, чтобы опередить аварийное отключение электропривода системой защиты.

В электроприводах используют три способа ограничения момента:

- токовая отсечка (чаще всего в одноконтурных САР скорости),
- ограничение задания на ток (в двухконтурных САР),
- опережающее токоограничение (в одноконтурных САР).

Принцип токовой отсечки основывается на резком снижении входного регулирующего напряжения преобразователя после превышения током допустимого значения.

Схема с токовой отсечкой приведена на рисунке 24. Принято, что другие обратные связи, обеспечивающие требуемую жесткость механических характеристик, отсутствуют.

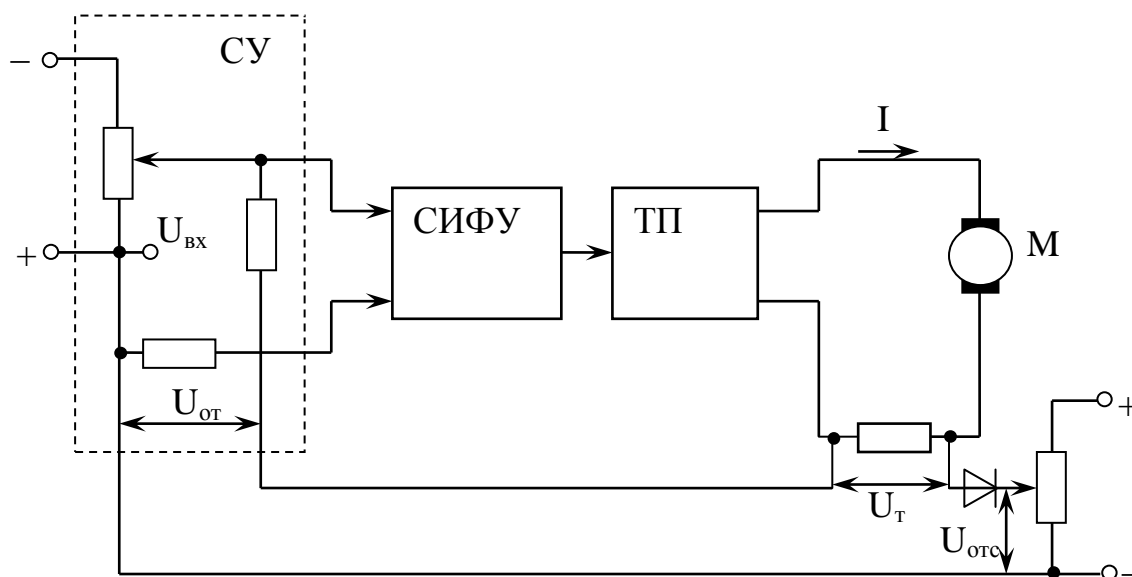


Рисунок 24 – Схема с токовой отсечкой

В этой схеме при токах, меньших определенного значения (пока $U_T < U_{отс}$, где $U_{отс}$ – напряжение отсечки), на узел сравнения СУ поступает только входное напряжение $U_{вх}$, и система представляет собой обычную разомкнутую систему. С возрастанием тока двигателя при увеличении нагрузки на его валу возрастает напряжение $U_T = IR_{доб}$. При $U_T > U_{отс}$ разность напряжений, т. е. сигнал обратной связи по току $U_{i.д} = U_{д} - U_{i.д}$, будет подаваться на узел сравнения (разность обратного знака подаваться не может из-за вентиля Д). Появление напряжения $U_{от}$ уменьшит при неизменном $U_{вх}$ напряжение $U_{д} = U_{а.д} - U_{i.д}$, что приведет к снижению напряжения на тиристорном преобразователе и скорости двигателя.

Уравнение электрического равновесия якорной цепи при работе токовой обратной связи будет иметь вид:

$$(U_{а.д} - U_{i.д})k_r = k\hat{O}_i\omega + IR_0. \quad (10.6)$$

Подставив в это уравнение $U_{от}$ и $U_T = IR_{доб}$, после преобразований найдем уравнение электромеханической характеристики двигателя в системе с токовой отсечкой при $I > I_{отс}$:

$$\omega = \frac{(U_{\dot{a}\dot{o}} + U_{i\dot{o}\dot{n}})k_r}{k\hat{O}_i} - \frac{IR_0}{k\hat{O}_i} = \left(1 + \frac{R_{\dot{a}\dot{i}\dot{a}}}{R_{\dot{a}}}\right)k_r, \quad (10.7)$$

где $I_{отс} = U_{отс}/R_{доб}$ – ток отсечки.

Как видно, характеристика представляет собой участок прямой линии, проходящей через фиктивную точку, лежащую на оси скорости:

$$\omega'_0 = (U_{\dot{a}\dot{o}} + U_{i\dot{o}\dot{n}})k_r / (k\hat{O}_i), \quad (10.8)$$

и точку

$$I_{\dot{n}\dot{o}\dot{i}\dot{i}} = \frac{(U_{\dot{a}\dot{o}} + U_{i\dot{o}\dot{n}})k_r}{R_0 \left(1 + \frac{R_{\dot{a}\dot{i}\dot{a}}}{R_{\dot{a}}}\right)}, \quad (10.9)$$

лежащую на оси токов. $I_{стоп}$ – ток при скорости, равной нулю, называется *током стопорения*.

Характеристика показана на рисунке 25.

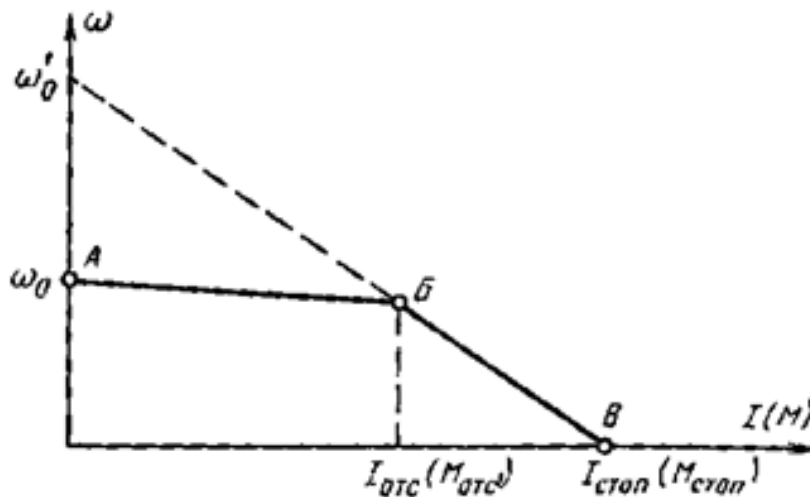


Рисунок 25 – Электромеханическая характеристика двигателя в системе с токовой отсечкой

На участке АБ токовая отсечка не действует. На участке БВ действует токовая отсечка, и характеристика удовлетворяет уравнению (10.8). Обычно ток стопорения $I_{стоп}$ выбирают, исходя из максимально допустимого значения тока якоря двигателя. Ток $I_{отс}$ выбирается в зависимости от желаемого наклона характеристики. При известных значениях $I_{стоп}$ и $I_{отс}$ рассчитывается $R_{доб}$ для данной схемы. Из выражения (10.9) после подстановки $U_{i\dot{o}\dot{n}} = I_{i\dot{o}\dot{n}} R_{\dot{a}\dot{i}\dot{i}}$ получим:

$$R_{\ddot{a}\ddot{r}} = \frac{U_{\dot{a}\dot{o}} k_i - I_{\ddot{n}\ddot{o}\ddot{r}} R_0}{(I_{\ddot{n}\ddot{o}\ddot{r}} - I_{\dot{o}\dot{n}}) k_i}. \quad (10.10)$$

Затем определяется необходимое напряжение сравнения:

$$U_{\dot{o}\dot{n}} = I_{\dot{o}\dot{n}} R_{\ddot{a}\ddot{r}}. \quad (10.11)$$

С помощью токовой отсечки обеспечивается надежное ограничение тока, если преобразователь может сразу уменьшить выходное напряжение. Однако в выпрямителях с естественной коммутацией ток в промежутке между коммутационным интервалом продолжает расти. Вследствие чего в начале токоограничения всегда возникает скачок тока. Поэтому в тиристорных электроприводах отсечка используется только в таких случаях:

- небольшая мощность;
- невысокие условия к качеству регулирования;
- достаточная индуктивность цепи якоря (способствует ограничению производной тока и амплитуды его первого прыжка).

Ограничение задания на ток – наиболее распространенный способ токоограничения, как из-за распространенности двухконтурных САР скорости, так и из-за ограничения (хотя бы в пускотормозных режимах) самой причины увеличения тока, то есть задания на ток.

Допустимый момент двигателя с возрастанием скорости уменьшается, что характерно для высокомоментных коллекторных двигателей с постоянными магнитами либо для двигателей постоянного тока. Узел токоограничения должен обеспечить изменение уровня токоограничения в функции скорости. Для этого используют схемы с опорным напряжением (рис. 26).

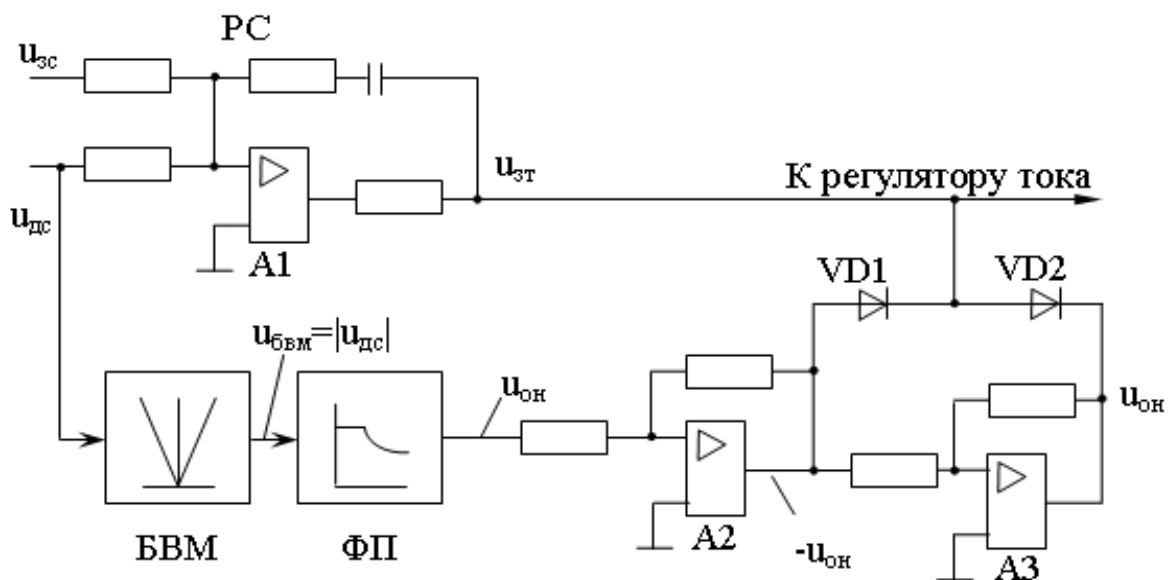


Рисунок 26 – Схема ограничения задания на ток с опорным напряжением

Функциональный преобразователь ФП формирует опорное напряжение $u_{он}$, которое зависит от скорости, обеспечивая моделирование зависимости допустимого момента от скорости (рис. 27). Блок выделения модуля БВМ обеспечивает возможность работы схемы при любом направлении вращения.

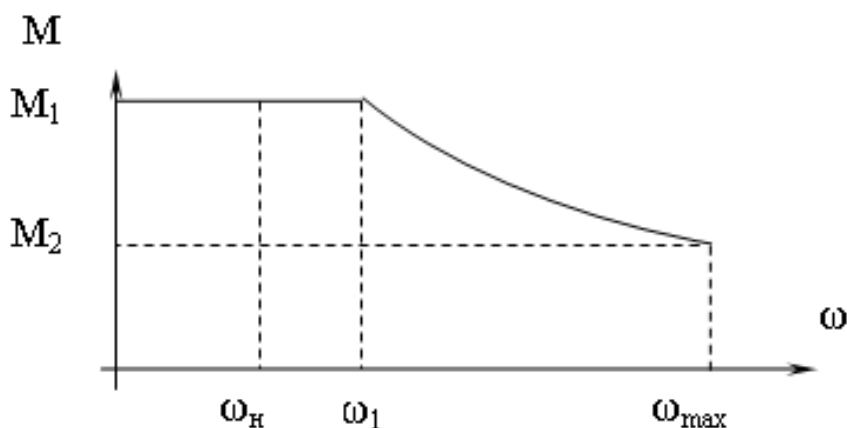


Рисунок 27 – Зависимость допустимого момента от скорости

При использовании принципа опережающего токоограничения выходное напряжение регулятора скорости (РС) также ограничивается, только в одноконтурных САР оно ставит заданием не на ток, а на напряжение преобразователя. Для обеспечения неизменного тока в режиме токоограничения напряжение на якоре должно зависеть от скорости:

$$U_{\beta} = \dot{A} \pm I_m R_{\beta} = \tilde{n} \hat{O} \omega \pm I_m R_{\beta} . \quad (10.12)$$

Знак «+» соответствует режиму двигателя, а «-» – тормозным режимам.

В узле токоограничения опорное напряжение должно иметь две составляющие – неизменное U_0 (пропорциональное $I_m R_{\beta}$) и переменное U_{ω} (пропорциональное скорости $U_{\omega} = E/k_{п}$):

$$u_{\tilde{n}} = u_{\delta \tilde{n} \max} = (c \hat{O} \omega \pm I_m R_{\beta}) / k_i , \quad (10.13)$$

где $k_{п}$ – коэффициент передачи преобразователя энергии.

Простейшая схема опережающего токоограничения изображена на рисунке 28.

В процессе пуска как раз переменная составляющая опорного напряжения обеспечивает линейное возрастание якорного напряжения в функции скорости и времени. Улучшенные схемы токоограничения можно получить путем использования операционного усилителя как источника опорного напряжения.

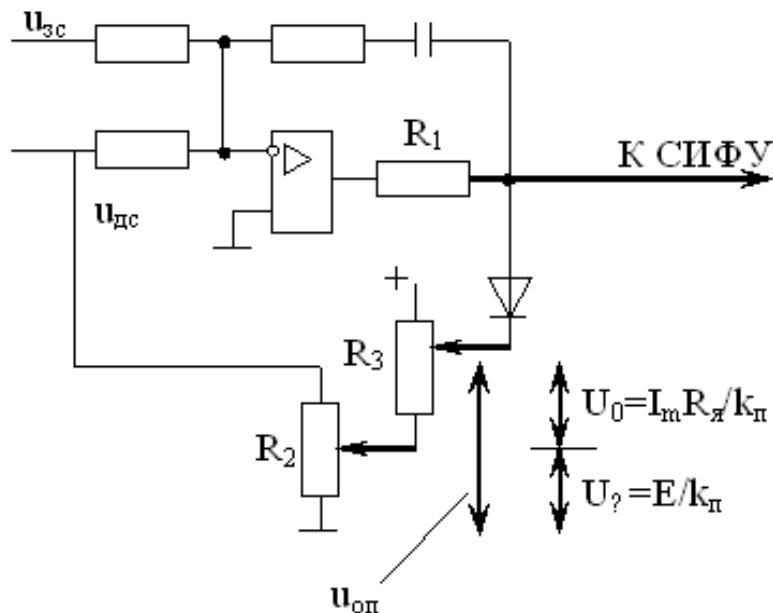


Рисунок 28 – Схема опережающего токоограничения

Иногда для уменьшения перегрева двигателя при длительных перегрузках длительность пребывания схемы токоограничения в режиме ограничения контролируют, а после, если причина перегрузки не исчезла, уровень ограничения автоматически снижают.

10.4 Трехфазные комплектные электроприводы ЭТУ2 (ЭПУ2)

Комплектные тиристорные электроприводы постоянного тока ЭТУ2 (ЭПУ2) предназначены для станков с ЧПУ. Эти серии – наиболее популярные в отечественной машиностроительной отрасли. Электропривод ЭТУ2 (ООО «ЭТАЛ», г. Александрия) – фактически аналог ЭПУ2 (г. Чебоксары). Обе серии имеют практически идентичные принципиальные схемы и отличаются только некоторыми конструктивными особенностями. Электроприводы выпускаются на токи от 25 до 630 А (ЭТУ2 – до 100 А). Питаются они от сети переменного тока 380 В через трансформатор (для номинальных выходных напряжений 115, 230 В) или коммутирующий дроссель (для напряжения 460 В).

Классификация серий по критериям:

1 Наличие реверса:

- а) нереверсивные;
- б) реверсивные (по якорю).

2 По назначению:

- а) для механизмов главного привода станков с ЧПУ;
- б) для механизмов подач станков с ЧПУ;
- в) для вспомогательных приводов.

3 По структуре САР:

а) однозонные системы автоматического регулирования скорости для высокомоментных двигателей с постоянными магнитами (диапазон регулирования скорости 10 000);

б) однозонные системы автоматического регулирования скорости для двигателей с электромагнитным возбуждением (диапазон регулирования скорости 1 000);

в) однозонные системы автоматического регулирования ЭДС или напряжения якоря (диапазон регулирования скорости 20);

г) двухзонные системы автоматического регулирования скорости (диапазон регулирования скорости 1 000).

Силовая часть якорных выпрямителей выполнена по трехфазной мостовой схеме, возбуждение – однофазной мостовой. Реализована на тиристорных модулях МТТ, МТТ2, оптронных тиристорных модулях МТО или тиристорах серии Т. Охлаждение – естественное воздушное или принудительное (для токов от 100 А).

Управление реверсивными выпрямителями отдельное. СИФУ вертикального типа с пилообразным опорным напряжением. Структурные модификации максимально унифицированные по структуре и элементной базе.

На рисунке 29 изображена функциональная схема двухзонной системы автоматического регулирования скорости, которая используется в механизмах главного движения станков с ЧПУ. Логическое переключающее устройство ЛПУ обеспечивает отдельное регулирование выпрямителем по информации о знаке заданного тока и положению тиристорных (от датчика положения тиристорных). Он переключает по мере необходимости каналы СИФУ и изменяет знак коэффициента передачи переключателя характеристик ПХ.

Контур регулирования тока якоря создается подачей сигналов от датчика тока якоря к входу СИФУ. Входной усилитель СИФУ выполняет роль пропорционального регулятора тока, коэффициент передачи которого регулируется изменением интенсивности обратной связи по току. Для обеспечения качества регулирования использована положительная обратная связь по напряжению якоря (через функциональный преобразователь ЭДС ФПЕ), который компенсирует отрицательную обратную связь по ЭДС в двигателе (в однозонных электроприводах вместо напряжения якоря используют сигнал тахогенератора).

Нелинейное звено НЗ компенсирует негативное влияние прерывистых токов, т. к. имеет статическую характеристику, обратную характеристике замкнутого контура тока в этом режиме. Нелинейная характеристика ФПЕ компенсирует нелинейный косинусоидальный характер регулировочной характеристики выпрямителя (из-за пилообразной формы опорного напряжения). Узел зависимого токоограничения предназначен для умень-

Преобразователи SIMOREG являются полностью цифровыми компактными модулями с трехфазным питанием, предназначенными для питания якоря и обмотки возбуждения двигателей постоянного тока с регулируемой скоростью и с номинальным током якоря в диапазоне от 15 А до 2000 А. Максимальное значение тока для питания цепей возбуждения равно 40 А.

Все функции регулирования с замкнутой и разомкнутой обратной связи, а также функции связи выполняются с помощью двух мощных микропроцессоров. Функции управления двигателем применены в программе как программные модули, которым можно задавать параметры.

Наиболее важные характеристики:

- полная интеграция в любую систему автоматизации;
- возможность модульного расширения;
- от типовых применений до высокопроизводительных решений;
- отказоустойчивые конфигурации до 15 000 А благодаря интеллектуальному параллельному подключению;
- диапазон питающих напряжений от 400 В до 950 В;
- быстрый и лёгкий запуск системы благодаря электронной настройке всех параметров;
- единая философия управления.

На рисунке 30 изображено расположение необходимых компонентов для правильной работы преобразователя:

1 – коммутационный дроссель в цепи возбуждения (выбирается исходя из номинального тока возбуждения двигателя);

2 – коммутационный дроссель в цепи якоря (выбирается исходя из номинального тока якоря двигателя (сетевой ток равен DC току $\times 0,82$);

3 – фильтр для цепи возбуждения и источника питания электроники (выбирается исходя из номинального тока возбуждения двигателя плюс 1,1 А);

4 – фильтр для цепи якоря (выбирается исходя из номинального тока якоря двигателя, сетевой ток равен DC току $\times 0,82$);

5 – фильтр для источника питания электроники выбирается на 2А.

В зависимости от использования преобразователи могут работать в нереверсивном или в реверсивном режиме. Преобразователи автономны благодаря интегрированной системе настройки параметров и не требуют дополнительных устройств для параметрирования. Все функции управления и регулирования, а также контрольные и вспомогательные функции выполняются под управлением одной микропроцессорной системы. Ввод заданного и текущего значения может производиться по выбору в цифровом или в аналоговом виде.

Процедура параметрирования. Параметрирование – это процесс изменения установок значений (параметров) с помощью панели оператора, активирование функций преобразователя или отображение измеренных значений.

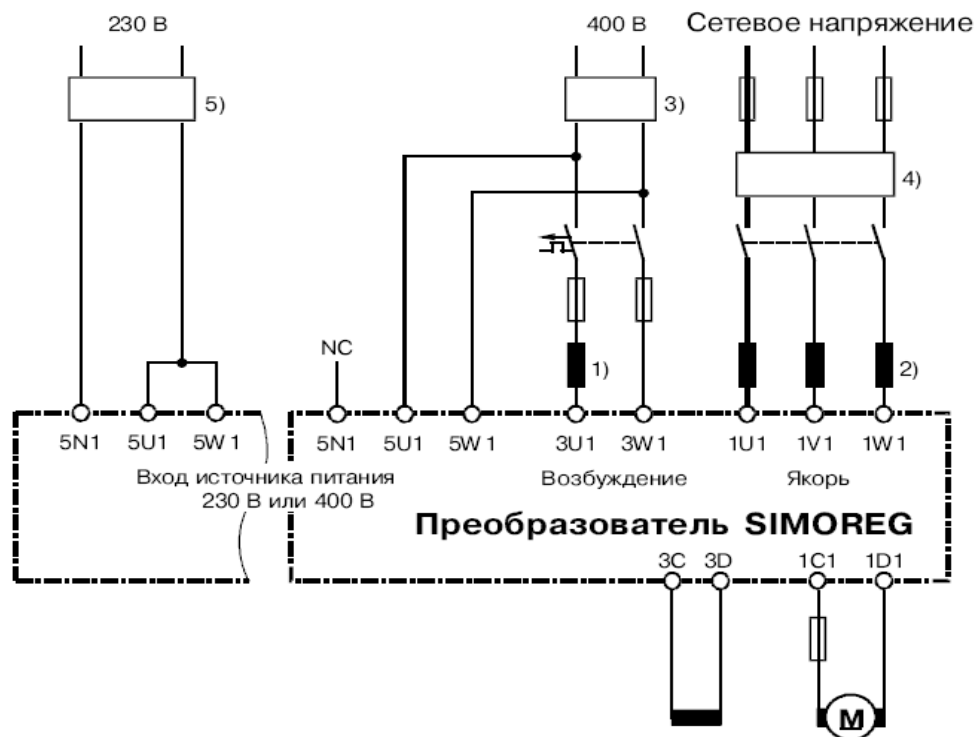


Рисунок 30 – Расположение компонентов для преобразователей SIMOREG

Параметры для основного преобразователя называются P-, r-, U- или n-параметрами.

Параметры для опциональной дополнительной платы называются H-, d-, L- или c-параметрами.

Параметры основного блока отображаются на PMU первыми, затем – параметры технологической платы (если таковая установлена). Важно не путать параметры опциональной технологической программы S00 основного модуля с параметрами опциональной дополнительной платы (T100, T300 или T400).

Типы параметров:

1 Параметры отображения используются для отображения текущих величин, таких как основное задание, напряжение якоря, разница между заданным/действительным значением регулятора скорости и т. д. Значения параметров отображения предназначены только для чтения и не могут быть изменены.

2 Параметры настройки используются как для отображения, так и для изменения величин, таких как номинальный ток двигателя, тепловая постоянная времени двигателя, коэффициент передачи P регулятора скорости и т. д.

3 Индексированные параметры используются как для отображения, так и для изменения значений параметров, которые целиком присвоены одному номеру параметра.

Функциональные блоки на функциональных схемах выполнены в цифровом виде, но могут «читаться» как схемы с аналоговыми элементами.

Все выходные переменные и важные вычисленные величины в пределах функциональных блоков доступны в виде коннекторов (например, для дальнейшей обработки как входные сигналы для других функциональных блоков). Величины, доступные через коннекторы, соответствуют выходным сигналам или точкам измерений в аналоговой схеме и идентифицируются их номерами коннекторов (например, К0003 = коннектор 3).

Все выходные цифровые величины и важные выходные двоичные сигналы функциональных блоков доступны как бинекторы (коннекторы для бинарных сигналов). Бинекторы могут принимать состояния лог. "0" и лог. "1". Величины, доступные через бинекторы, соответствуют выходным сигналам или точкам измерений в цифровой схеме и идентифицированы их номерами бинекторов (например, В0003 = бинектор 3).

На рисунке 31 изображена функциональная схема управления преобразователем Simoreg.

Система управления по каналу якорной цепи представляет собой замкнутую двухконтурную систему регулирования. Первый контур – контур регулирования тока якоря с обратной связью по току якоря. Обратная связь по току осуществляется путем соединения коннектора К117 с отрицательным входом регулятора тока Р602. Сигнал задания на регулятор тока приходит через коннектор К120 с блока ограничения задания на регулятор тока. Постоянная времени РТ задаётся в параметре Р156 ($T_{рт} = 0,05$ с), коэффициент пропорциональной части задаётся в параметре Р155 ($K_{рт} = 0,03$). Второй контур – контур регулирования скорости. Выходной сигнал с регулятора скорости является заданием регулятора тока и подаётся на блок ограничения тока якоря посредством соединения коннектора К160 с Р601.03, К160 – выход РС. В блоке ограничения тока якоря реализуется ограничение задания на РТ посредством параметров Р603.07 = 100 % (ограничение max), Р604.07 = – 100 % (ограничение min). В качестве РС используется регулятор скорости с заданным статизмом, задание статической ошибки осуществляется в параметре Р227 = 3 %, постоянная времени РС задаётся в параметре Р226 ($T_{рс} = 0,6$ с), коэффициент пропорциональной части задаётся в параметре Р225 ($K_{рс} = 4,0$). Задание на РС задаётся через соединение коннектора К165 с параметром Р620. На входе РС установлен суммирующий элемент для суммирования сигнала задания скорости Р622, сигнала отрицательной обратной связи по скорости Р623, сигнала статической ошибки Р621.

Задание скорости осуществляется в параметре Р402 = 25 % (установочное значение), затем сигнал задание скорости подаётся на задатчик интенсивности, в котором устанавливается время разгона T_r Р303, время торможения T_t Р304, а также ограничение сигнала задания скорости Р300 (ограничение min значения), Р301 (ограничение max значения).

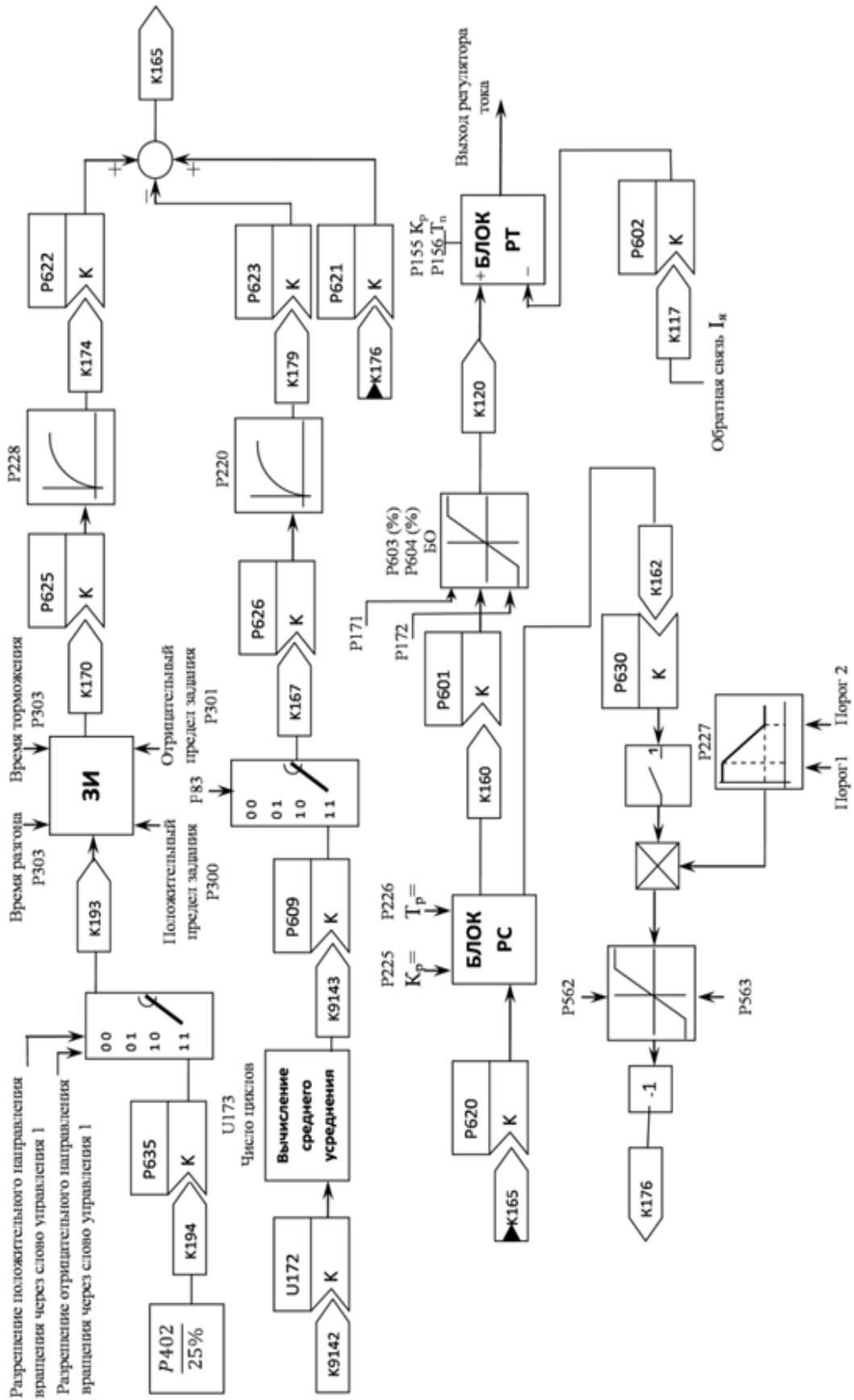


Рисунок 31, лист 1 – Функциональная схема электропривода Simoreg DC

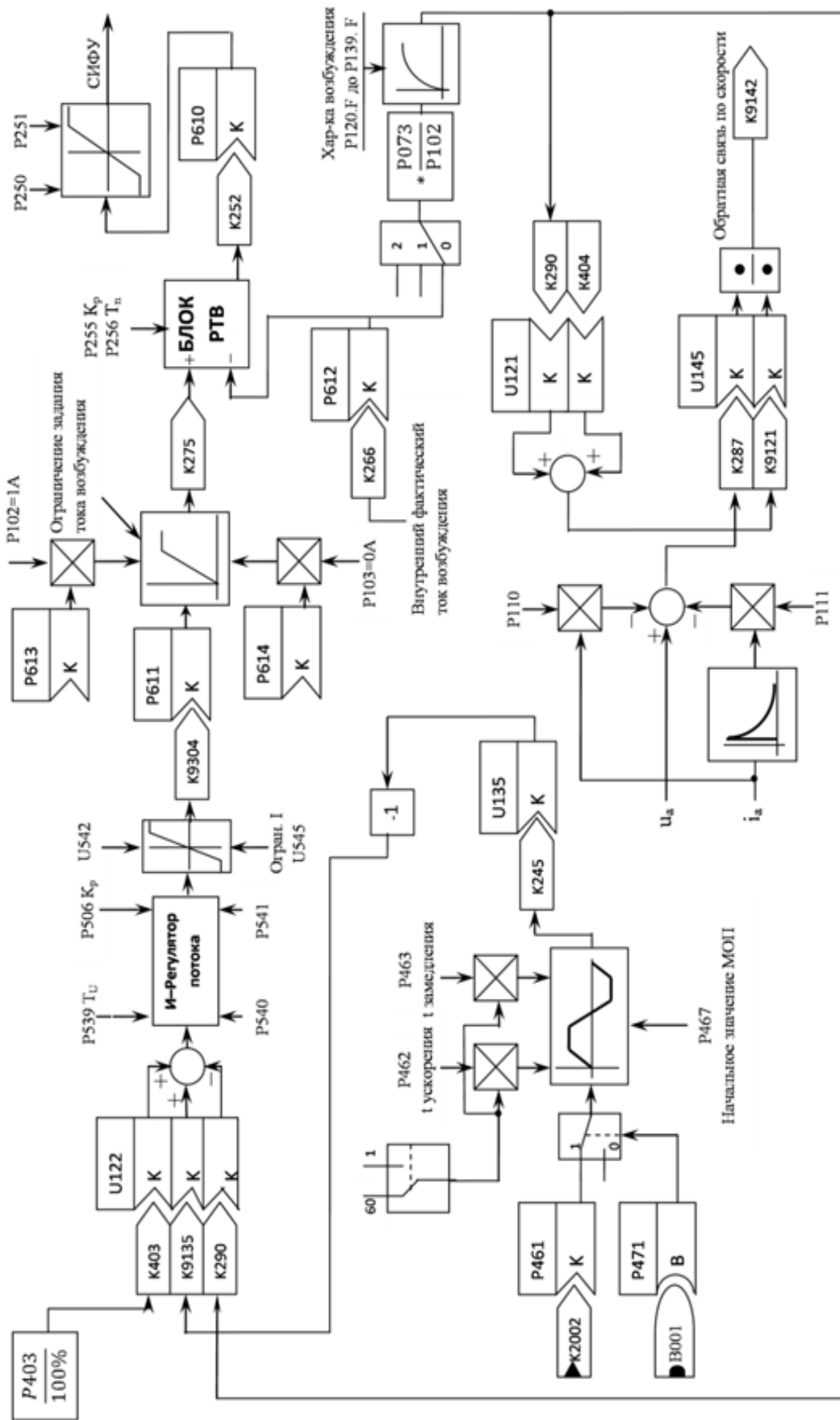


Рисунок 31, лист 2

Выход 3И коннектор K170 соединяется с P625 входом фильтра прямого канала, в блоке P228 устанавливается постоянная времени фильтра Тф. **Выход фильтра-коннектор K174-заводится** на P622 суммирующего элемента РС.

Сигнал обратной связи по скорости рассчитывается программно, т. к. исключается датчик скорости. Для получения значения скорости математическим путём используется соотношение, где $E_{дв}$ – ЭДС двигателя (коннектор K287):

$$\omega = \frac{\dot{A}_{\dot{A}\dot{A}}}{k\hat{O}}, \quad (10.14)$$

где Φ – поток двигателя (коннектор K9121);

k – конструктивная постоянная двигателя (при расчете не используется).

Значение скорости вычисляется в результате деления в блоке U145(.03, .04) значения ЭДС на поток. Полученное значение скорости через коннектор K9142 **заводится блок вычисления** среднего значения U172.01, где в параметре U173.01 задаётся число циклов усреднения N . Вычисление среднего значения скорости позволяет снизить расчётные колебания скорости, вызванные при делении на поток в зоне нагружения, т. к. в этом режиме рабочая точка потока находится внизу кривой намагничивания и приближается к остаточному потоку, а также становится очень чувствительной к изменению тока возбуждения. В параметре P083 = 4 устанавливается внутренняя обратная связь по скорости без датчика скорости. Через соединение коннектора K167 с P626 сигнал обратной связи подаётся на вход фильтра обратного канала, в параметре P200 устанавливается постоянная времени фильтра, выход фильтра через коннектор K179 подаётся на P623 суммирующего элемента РС.

Ослабление потока двигателя осуществляется двухконтурной замкнутой системой. Внутренний контур – контур регулирования тока возбуждения. Контур регулирования тока возбуждения имеет ПИ-регулятор тока возбуждения с отрицательной обратной связью по току возбуждения (K266 – обратная связь по току возбуждения). Задание на РТВ подаётся через коннектор K275 от блока ограничения сигнала задания на ток возбуждения. Постоянная времени РТВ задаётся в параметре P256 ($T_{р\tau\text{в}} = 1,0$ с), коэффициент пропорциональной части задаётся в параметре P255 ($K_{р\tau\text{в}} = 3,0$). В блоке ограничения установлено максимальное значение тока возбуждения $P102 = 1$ А и минимальное значение $P103 = 0$ А. Задание на БО РТВ поступает с внешнего контура – контура регулирования потока через соединение коннектора K9304 и P611.01.

Регулятор потока представляет собой И-регулятор, постоянная времени интегрирования задаётся в блоке U539 $T_i = 5,0$ с, в блоке U540 = 0

задаётся запрет на работу пропорциональной части, в $U_{541} = 1$ задаётся разрешение на работу интегральной части. Задание потока устанавливается в блоке $P_{403} = 100\%$. Задание 100% потока обеспечивает безопасный пуск двигателя при полном потоке. Ослабление потока осуществляется датчиком интенсивности потока, на вход которого через соединение коннектора K_{2002} и $P_{461.01}$ подаётся требуемая величина ослабления потока в относительных единицах, где K_{2002} – величина ослабления потока в относительных единицах. В блоке P_{471} , путём подключения на него логической 1 (B_{0001}), устанавливается автоматический режим работы ЗИ. В $P_{467} = 0\%$ устанавливается начальное значение. В блоке P_{462} – время разгона $T_{рп}$, P_{463} – торможения $T_{тп}$. После этого в U_{135} сигнал задания на ослабление инвертируется и в суммирующем элементе U_{122} складывается с заданием потока. На отрицательный вход U_{122} подаётся сигнал обратной связи по потоку. При оптимизации контура регулирования тока возбуждения преобразователь рассчитывает зависимость $\Phi = f(I_v)$ (кривая намагничивания двигателя) по 20 точкам в параметрах P_{120} - P_{139} . Значение потока возбуждения берётся из расчётной кривой намагничивания и используется как сигнал обратной связи по потоку.

Слабым местом данной системы является то, что кроме основных параметров двигателя необходимо знать величину остаточного потока двигателя $\Phi_{ост}$.

11 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

11.1 Статические преобразователи частоты

Базовыми элементами асинхронного частотно-регулируемого электропривода являются управляемый преобразователь частоты ПЧ, питающий от промышленной сети напряжением U_c и частотой f_c , и асинхронный двигатель АД, питающий от ПЧ.

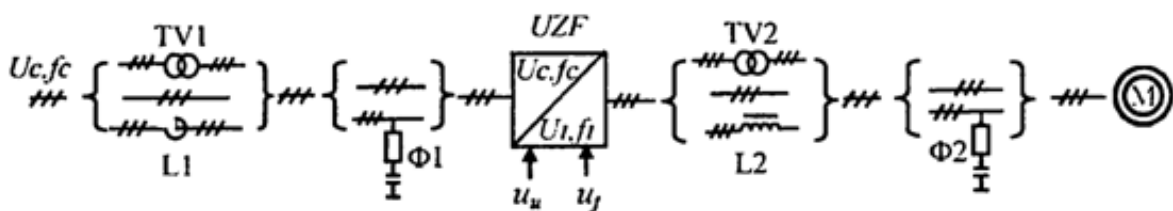


Рисунок 32 – Состав силовой части системы ПЧ-АД

При необходимости согласования мощности и входных напряжений питания собственно ПЧ с сетью, между ними может устанавливаться со-

гласующий трансформатор TV1. Для ограничения токов короткого замыкания и перенапряжений на входе ПЧ могут устанавливаться токоограничивающие реакторы L1 и дополнительные RC – фильтры Ф1. При необходимости согласования выходного напряжения ПЧ и цепи питания М (например, для высоковольтных электрических машин) между ними могут устанавливаться согласующие трансформаторы TV2. При значительном удалении двигателя от преобразователя (при длине кабельной связи между ними более 50 м, а для ряда преобразователей допускается и более 200 м) на выходе ПЧ для ограничения от перенапряжений на его силовых полупроводниковых элементах устанавливаются фильтрующие дроссели L2, а также помехоподавляющие RC – фильтры Ф2.

Выходные частота f_1 и фазное напряжение U_1 (или ток I_1) ПЧ определяются, соответственно, сигналами управления u_u и u_f . Регулирование частоты f_1 и напряжения U_1 (или тока I_1) обеспечивает регулирование основных координат АД (тока, электромагнитного момента М, угловой скорости ω).

Наибольшее распространение получили две группы управляемых полупроводниковых ПЧ:

1 Преобразователи со звеном постоянного тока и автономным инвертором АИ (инвертором напряжения АИН или тока АИТ)

2 Преобразователи с непосредственной связью питающей сети и нагрузки (без широтно-импульсной модуляции выходного напряжения)

Преобразователь по системе ПЧ-АИ состоит из трех силовых блоков: управляемого или неуправляемого выпрямителя UZ1, силового фильтра Ф (С- или LC-типа) в звене постоянного тока и автономного инвертора UZ2.

АИ может быть выполнен либо на основе однооперационных тиристоров с искусственной их коммутацией, либо запираемых (GTO) тиристорах, либо на полностью управляемых силовых транзисторах (чаще всего на базе IGBT-модулей, содержащих транзистор с изолированным затвором и шунтирующий его силовой диод).

АИН является источником напряжения. Благодаря емкости С фильтра Ф и обратным диодам VT1-VT6, при работе АИН на активно-индуктивную нагрузку, к числу которой относится АД, обеспечивается обмен реактивной энергией между АД и звеном постоянного тока. Они обеспечивают непрерывность цепи тока в обмотках М при отключении их от источника питания в процессе коммутации и возврат запасенной магнитной энергии в конденсатор фильтра.

Выходное напряжение АИН может регулироваться двумя способами:

1) при управляемом выпрямителе UZ1 – изменением напряжения в звене постоянного тока, когда инвертору отводится роль лишь коммутатора фаз, формирующего требуемую частоту (АИН с амплитудно-импульсной модуляцией АИМ);

2) при неуправляемом выпрямителе – широтно-импульсным регулированием напряжения в инверторе за счет модуляции напряжения несущей частоты (частоты коммутации силовых ключей) сигналом требуемой частоты (АИН с широтно-импульсной модуляцией ШИМ).

В ПЧ с АИН отсутствует рекуперация энергии в питающую сеть. При необходимости возврата энергии в сеть питания выпрямитель должен быть реверсивным и управляемым (на рис. 33 изображен пунктиром). При отсутствии подобного выпрямителя для обеспечения режима динамического торможения АД параллельно фильтру Φ устанавливается узел сброса энергии на основе ключа $VT7$ и силового резистора R . При превышении допустимого напряжения на выходе фильтра ключ открывается и обеспечивает разряд конденсатора на резистор R .

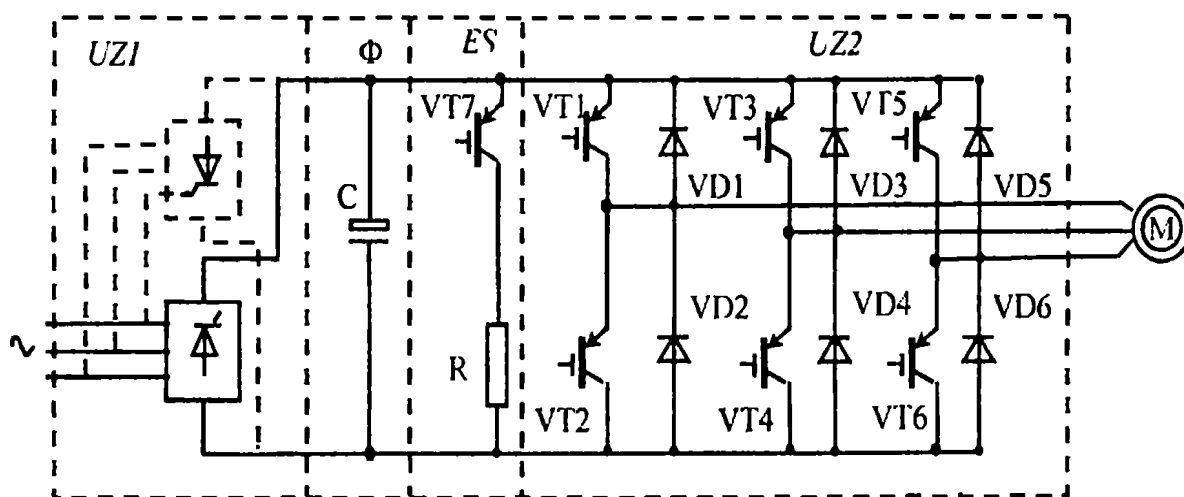


Рисунок 33 – Состав силовой части системы ПЧ-АИ

В ПЧ с АИТ управляемый преобразователь $UZ1$ работает в режиме источника тока, инвертор $UZ2$ обеспечивает коммутацию обмоток статора АД силовыми ключами $VT1-VT6$. Главное техническое отличие ПЧ с АИТ от ПЧ с АИН в наличии индуктивного L-фильтра и отсутствии емкостного фильтра на выходе выпрямителя, отсутствии обратных диодов, шунтирующих силовые ключи, и наличии конденсаторов $C1, C2, C3$ на выходе инвертора, являющихся источником реактивной энергии для нагрузки преобразователя частоты.

При переходе АД в генераторный режим изменяется направление его ЭДС, и инвертор, который переходит в режим выпрямителя, стремится увеличить ток I_d в звене постоянного тока. Однако за счет отрицательной обратной связи по току I_d преобразователь $UZ1$ переводится в режим инвертора, ведомого сетью, сохраняя прежнее направление и значение I_d и обеспечивая тем самым режим рекуперативного торможения АД.

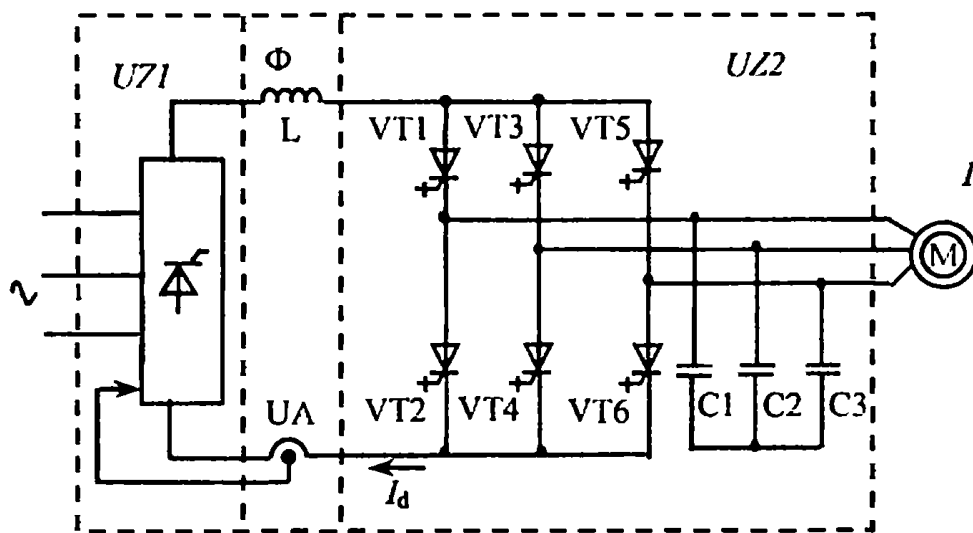


Рисунок 34 – Схема силовой части АИТ

К достоинствам преобразователей по системе ПЧ-АИ относятся:

- высокий диапазон частот выходного напряжения АИН (практически от 0 до 1 500 Гц), ограничиваемый лишь частотой коммутации и коммутационными потерями в силовых ключах автономного инвертора (для АИТ максимальная выходная частота 100...125 Гц);
- низкий уровень гармонических составляющих напряжения или тока статора двигателя и тока, потребляемого из сети питания;
- высокий коэффициент мощности (до 0,95...0,98) в преобразователях с неуправляемым выпрямителем. В случае применения управляемого выпрямителя коэффициент мощности меньше и близок коэффициенту в системах «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока»;
- относительно небольшое число силовых ключей преобразователя и более простая схема их управления, не требующая синхронизации с питающей сетью;
- для АИТ возможность рекуперации энергии в сеть и безаварийность режима короткого замыкания по выходу.

К недостаткам подобных преобразователей следует отнести:

- двукратное преобразование энергии (с переменного напряжения питающей сети на постоянное выпрямителя, а затем с постоянного – на переменное выходное напряжение инвертора), что снижает результирующий КПД преобразователя частоты (до 0,94...0,96);
- зависимость (для тиристорных ключей АИ) условий их искусственной коммутации от $\cos\phi$ и уровня нагрузки двигателя;
- для АИН отсутствие возврата энергии в питающую сеть преобразователя, что ограничивает быстродействие регулирования скорости АД в тормозных режимах; высокие требуемые значения емкости фильтра Φ и, соответственно, большие габариты конденсаторной батареи;

– для АИТ невозможность работы на групповую нагрузку, существенные масса и габариты реактора фильтра Φ , наличие коммутационных перенапряжений на силовых ключах, более низкий $\cos\phi$ по сравнению с АИН с ШИМ и неуправляемым входным выпрямителем.

Основу ПЧНС составляют управляемые реверсивные выпрямители в каждой из фаз АД. Силовыми ключами выпрямителей $K_{1.1} \dots K_{3.3}$ могут быть встречно включенные тиристоры VS , запираемые (GTO) тиристоры либо полностью управляемые силовые транзисторы VT (IGBT-модули).

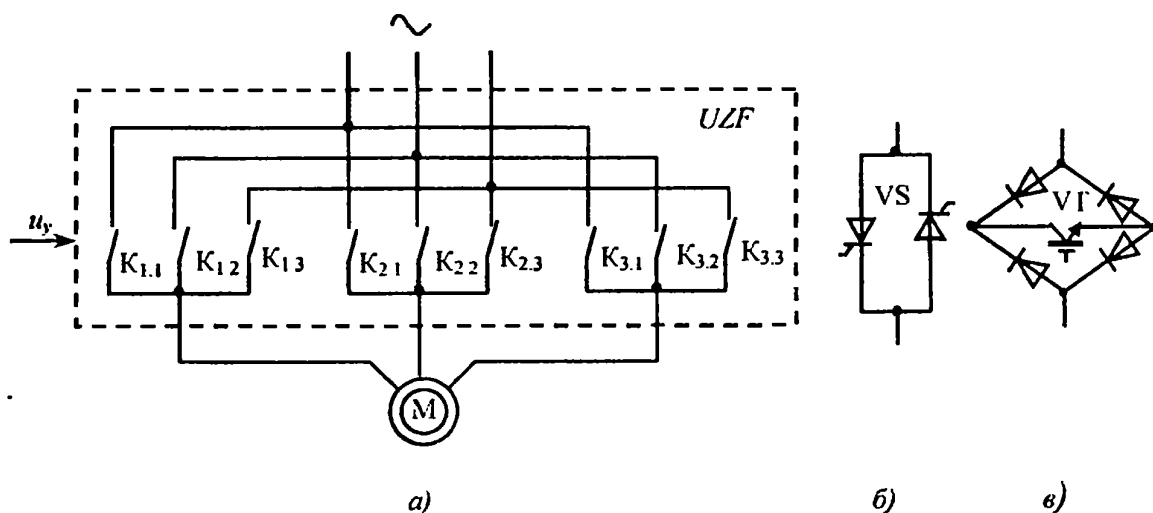


Рисунок 35 – Схема силовой части ПЧНС (а), варианты его силовых ключей (б, в)

Формирование выходного напряжения или тока ПЧНС производится из отрезков кривых напряжения питающей сети за счет циклического подключения нагрузки на определенные интервалы времени к различным фазам питающей сети.

Для тиристорных ключей ПЧНС, воздействуя сигналами управления u_y на уровень и частоту изменения углов управления выпрямителей так, чтобы средние за полупериод питающей сети значения напряжений выпрямителей U изменялись в течение полупериода выходного напряжения по синусоидальному закону, можно регулировать амплитуду и частоту их средних выходных напряжений. При полностью управляемых ключах возможна широтно-импульсная модуляция выходного напряжения или тока (при наличии обратной связи по току) каждого из выпрямителей.

К достоинствам ПЧНС относятся:

- однократное преобразование энергии и, следовательно, высокий КПД ($\approx 0,95 \dots 0,97$);
- реверсивный режим работы выпрямителей и, соответственно, свободный обмен реактивной и активной энергией из сети к электрической машине и обратно;
- для однооперационных тиристоров естественный режим коммутации за счет напряжения питающей сети, что повышает надежность работы;

- устойчивый режим работы на нагрузку с любым $\cos\varphi$;
- возможность реализации весьма низких частот выходного напряжения.

К недостаткам следует отнести:

- ухудшение формы выходного напряжения при увеличении частоты, ограничение верхнего диапазона частоты выходного напряжения;
- сравнительно большое число силовых полупроводниковых элементов и для однооперационных тиристоров необходимость жесткой синхронизации схемы управления ими с питающей сетью;
- низкий (по сравнению с АИН) коэффициент мощности, и особенно при уменьшении амплитуды выходного напряжения преобразователя в области малых частот.

11.2 Принципы построения систем управления двигателем переменного тока

В соответствии с векторными диаграммами и соотношениями между основными переменными АД (**список литературы**) его электромеханические свойства при фиксированной частоте питания однозначно определяются как абсолютными значениями магнитных потоков, потокосцеплений и токов цепей машины, так и их векторными взаимосвязями в функции абсолютного скольжения АД. Отсюда и различные принципы управления АД: *скалярный*, при котором осуществляется регулирование лишь абсолютных значений переменных АД, и *векторный*, при котором одновременно осуществляется принудительная взаимная ориентация векторов переменных АД в соответствии с принятым законом управления. При этом управляемость АД может обеспечиваться совместным регулированием либо частоты f_1 и напряжения U_1 , либо частоты f_1 и тока I_1 статорной обмотки. Первый способ управления принято трактовать как *частотное* управление, второй – как *частотно-токовое* управление.

Скалярный принцип частотного управления является наиболее распространенным в электроприводе. Ему свойственна техническая простота измерения и регулирования абсолютных значений переменных АД. Однако реализация желаемых законов регулирования скорости и момента АД, их стабилизация и ограничение, при которых обеспечивалось бы постоянство или ограничение в допустимых пределах внутренних переменных АД (токов статора, их потокосцеплений, основного магнитного потока), из-за сложных функциональных зависимостей между ними весьма ограничена. И если в статических режимах за счет комбинаций обратных связей по переменным АД в замкнутых системах частотного регулирования и можно добиться желаемых или близких к ним свойств электропривода, то в динамических режимах эта задача трудно выполнима. Связано это с весьма сложными электромагнитными процессами.

При любых динамических возмущениях в АД происходит взаимное изменение токов и связанных с ними магнитных потоков машины. При этом скорость изменения магнитных потоков заметно отстает от темпа изменения токов АД. В результате в переходном процессе не только нарушается взаимосвязь абсолютных значений токов и потоков, но и возникает фазовый сдвиг между их векторами. Поскольку и абсолютные и взаимные фазовые сдвиги векторов токов и потоков цепей статора и ротора изменяются одновременно, то при наличии взаимосвязанных звеньев, содержащих электромагнитные постоянные времени цепей статора, контура намагничивания, ротора и механическую постоянную времени ротора, изменение переменных АД во времени будет носить затухающий колебательный характер. Период колебаний и коэффициент их демпфирования зависит от соотношений постоянных времени и абсолютного скольжения АД. После окончания переходного процесса абсолютные значения токов и потоков и фазовые сдвиги между их векторами взаимно ориентируются в пространстве и определяются уже в соответствии с заданным установившимся режимом работы АД.

Скалярное частотно-токовое управление АД характеризуется малым критическим скольжением и постоянством критического момента при постоянстве АД тока и изменении его частоты. Однако в разомкнутых системах подобное управление практически исключено, поскольку с увеличением нагрузки (скольжения) резко падает магнитный поток АД и для обеспечения желаемых перегрузочных способностей АД по моменту потребуются заметное превышение номинальных значений напряжений питания и тока статора.

Векторный принцип управления базируется на принудительной взаимной ориентации векторов потокосцеплений и токов АД в полярной или декартовой системах координат в соответствии с заданным законом регулирования. В замкнутых **системах векторного** по цепям обратных связей наряду с абсолютными значениями регулируемых переменных поступает информация о текущем пространственном положении их векторов. За счет регулирования модулей переменных и углов между их векторами обеспечивается полное управление АД, как в статике, так и динамике, обеспечивая тем самым заметное улучшение качества переходных процессов по сравнению со скалярным управлением.

Информация о текущих значениях модуля и пространственного положения векторов переменных АД может быть получена как прямым их измерением, с помощью соответствующих датчиков, так и косвенно, на основе математической модели АД.

При векторном управлении регулирование электромагнитного момента АД может осуществляться формированием мгновенных значений, как напряжений, так и токов в обмотках статора. Вариант *частотно-токового векторного управления* является наиболее распространенным, поскольку при регулировании тока обеспечивается регулирование момента

независимого от частоты питания АД, что упрощает схему управления, а также одновременно достаточно просто обеспечивается ограничение перегрева двигателя. При этом напряжение на обмотках статора АД образуется автоматически в зависимости от его режима работы.

Диапазон регулирования разомкнутых систем частотного управления ограничен неточностью реализации ФП, а также возрастанием главного потока с уменьшением нагрузки и частоты. Поэтому такие системы работоспособны только в ограниченном диапазоне регулирования скоростью и при практически неизменной нагрузке. Таким образом, при скалярном управлении для регулирования скорости АД с высокой точностью при заметном изменении момента нагрузки на его валу необходимо применять замкнутую систему управления.

В асинхронных частотно-регулируемых электроприводах применяются как аналоговые, так и цифровые системы управления. Их выбор обосновывается технико-экономическими показателями и эксплуатационными соображениями. В наиболее совершенных электроприводах, отличающихся высокими показателями регулирования, системы управления выполняются на основе устройств микропроцессорной техники, где алгоритмы управления реализуются программным путем. При этом функции регуляторов и для цифровых, и для аналоговых систем управления аналогичны.

11.3 Скалярные системы частотного управления

При скалярном управлении по определенному закону изменяют амплитуду и частоту приложенного к двигателю напряжения. Изменение частоты питающего напряжения приводит к отклонению от расчетных значений максимального и пускового моментов двигателя, КПД, коэффициента мощности. Поэтому для поддержания требуемых рабочих характеристик двигателя необходимо с изменением частоты одновременно соответственно изменять и амплитуду напряжения.

Скалярное управление находит применение в приводах с неглубоким регулированием скорости и невысокими требованиями к динамическим показателям. Это, прежде всего, механизмы, которые работают в продолжительном режиме S1 (конвейеры, транспортеры, вентиляторы), и разнообразные вспомогательные механизмы (рольганги прокатных станков, подъемные краны, лебедки). В таких системах обычно используют автономные инверторы с амплитудной модуляцией.

Разомкнутые системы частотного управления. Простейшие системы частотного управления – разомкнутые. На рисунке 36 изображена функциональная схема, которая реализует закон управления $\frac{U_1}{f_1} = const$.

Из уравнения видно, что для обеспечения неизменного критического мо-

мента одновременно с изменением частоты необходимо изменять и напряжение.

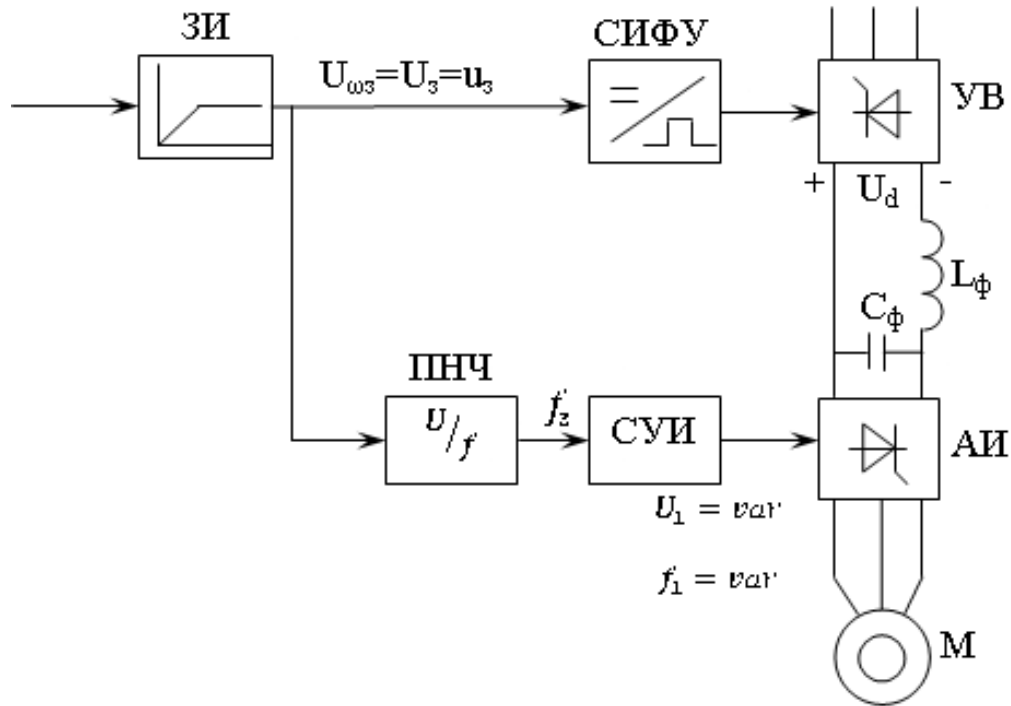


Рисунок 36 – Разомкнутая система частотного управления

Соотношение $\frac{U_1}{f_1}$ стабилизируется благодаря тому, что канал регулирования амплитуды напряжения (управляемый выпрямитель УВ) и канал регулирования частоты (автономный инвертор АИ) получают одинаковое задание (первый – в виде аналогового сигнала задаваемого напряжения $u_з$, второй – серией импульсов, частота которых f_c пропорциональна напряжению). Преобразование аналогового сигнала на последовательность импульсов осуществляется преобразователем «напряжение – частота» ПНЧ. Задатчик интенсивности ЗИ обеспечивает плавный пуск и торможение.

Коэффициент пропорциональности между напряжением и частотой (т. е. коэффициент передачи ПНЧ)

$$k_{uf} = \frac{f_{1r}}{U_{1r}}. \quad (11.1)$$

Для реверса электропривода необходимо введение специального узла, который в зависимости от знака задания на скорость изменяет порядок переключения ключей АИ.

При вентиляторной нагрузке, а также для механизмов с тяжелым пуском необходимо обеспечение закона управления близкий к постоянству

$\frac{U_1}{f_1^2}$. В разомкнутой системе закон может быть реализован добавлением в канал регулирования амплитуды функционального преобразователя ФП (рисунок 37), который отображает определенные зависимости между напряжением питания и частотой. В подобных системах закон частотного регулирования реализуется параметрически, без непосредственного контроля ЭДС или потока.

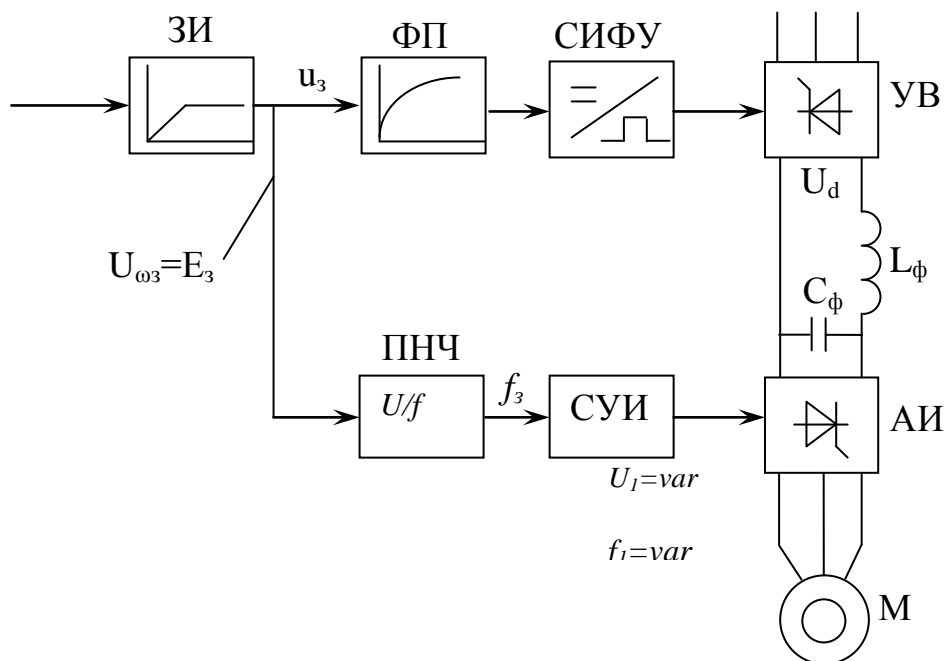


Рисунок 37 – Разомкнутая система частотного регулирования с функциональным преобразователем

Статическую характеристику ФП для закона зависимости напряжения питания от соответствующей ЭДС либо пропорциональной ей частоты можно получить двумя методами: 1) числовым расчетом такого напряжения, которое обеспечивает неизменное соотношение ЭДС к частоте при любой частоте, и 2) аналитически.

В данной схеме сигналы i_{3a} и i_{3c} , пропорциональные мгновенному значению токов обмоток статора фаз А и С, с выхода датчиков тока UA_a и UA_c поступают на функциональный преобразователь $U1$, где формируются выходные сигналы I_1 и I_{1a} , пропорциональные соответственно модулю абсолютного значения тока статора и активной составляющей этого тока. Выделение активной составляющей тока статора связано либо с векторным преобразованием токовых сигналов в U_1 , либо с изменением тока выпрямителя в преобразователях частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Наиболее часто в скалярных системах частотного управления для простоты технических решений вместо активной составляющей тока статора на функциональные устройства А1 и А2 подается сигнал действующего значения тока статора I_1 .

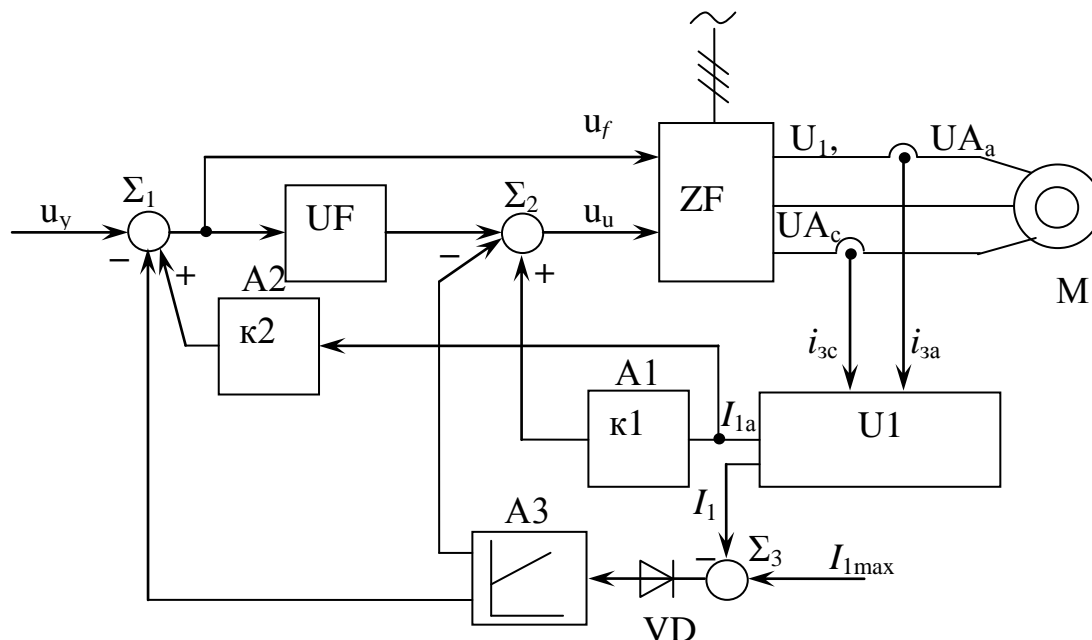


Рисунок 38 – Система скалярного управления с обратной связью по току статора АД

В узлах Σ_1 , Σ_2 , Σ_3 функциональной схемы выполняется суммирование сигналов управления и сигналов обратных связей, поступающих с функциональных устройств A1, A2, A3. Вентиль VD условно отражает прохождение сигнала $|I_1|$ на вход A3 лишь при превышении сигнала $|I_{1max}|$, соответствующего модулю максимально допустимого тока статора АД.

Положительная обратная связь с коэффициентом усиления k_1 устройства A1 по действующему значению тока статора оказывает влияние на переменные и механическую характеристику АД. При скорости идеального холостого хода $\omega_{0,0}$, частоте f_{10} и напряжении U_{10} питания АД его магнитный поток намагничивания $\Phi_{\mu 0}$. В разомкнутой системе управления при постоянстве частоты и напряжении питания по мере увеличения нагрузки на валу АД скорость ω и поток намагничивания Φ_{μ} двигателя уменьшаются. В замкнутой системе по мере увеличения моментов статической нагрузки АД и соответствующему увеличению тока статора на входе сумматора Σ_2 со стороны A1 поступает дополнительный сигнал – увеличивающий сигнал u_u . В итоге, по мере увеличения тока статора увеличивается и выходное напряжение преобразователя частоты. При этом выходная частота, определяемая сигналом u_f , остается постоянной. Увеличение напряжения на обмотках статора АД способствует компенсации падения напряжения на полном их сопротивлении и, в результате, увеличению потока намагничивания АД.

Степень компенсации определяется коэффициентом усиления k_1 цепи положительной обратной связи по току. Чем больше будет k_1 , тем больше будет поток при том же абсолютном скольжении. Следовательно, по мере увеличения k_1 увеличивается как абсолютное критическое скольжение, так и максимальный момент АД. Предел увеличения k_1 ограничен условиями

устойчивости замкнутой системы управления и допустимыми значениями потока намагничивания и напряжения питания АД. По мере снижения частоты питания полное сопротивление цепи намагничивания и, соответственно, падение напряжения на статоре АД уменьшается. Поэтому для стабилизации и ограничения потока намагничивания в замкнутой по току системе степень компенсации падения напряжения и отсюда коэффициент k_1 необходимо уменьшать в соответствии с уменьшением полного сопротивления статорной цепи АД. Если это не предусмотрено, то максимально допустимый k_1 должен выбираться для режима работы АД при минимальной частоте, определяемой диапазоном регулирования скорости в замкнутой системе. При этом следует учесть, что даже при идеальном холостом ходе АД за счет заметных токов намагничивания в статорной цепи обратная связь по полному току **уде действует**.

Подобный недостаток отсутствует при использовании обратной связи по активной составляющей тока статора. Ее можно выделить как при векторном преобразовании токов статора, так и изменением тока выпрямителя в преобразователях частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Если в качестве сигнала обратной связи принять активную составляющую тока статора, то регулирование скорости будет выполняться при постоянстве потокосцепления статора. При этом обеспечение той же перегрузочной способности АД по моменту, что при обратной связи по полному току, потребует меньшей доли компенсации падения напряжения в статорной цепи и, соответственно, меньшего запаса по выходному напряжению преобразователя частоты.

В системе с подобными обратными связями по току возможна реализация механических характеристик АД с повышенной перегрузочной способностью по моменту и жесткостью, близкой к естественной, в диапазоне регулирования скорости вниз от номинальной при постоянной статической нагрузке от 7:1.

Влияние положительной обратной связи по току с пропорциональным коэффициентом усиления k_2 устройства А2 связано с одновременным воздействием на выходную частоту и напряжение преобразователя. За счет увеличения частоты питания АД при увеличении нагрузки на его валу (M_1 , M_2) соответственно увеличиваются и скорости идеального холостого хода АД, **обеспечивая тем самым лишь стабилизацию скорости за счет одновременного и пропорционального частоте увеличения напряжения питания АД при $M_c = \text{const}$ сохраняется постоянство и перегрузочной способности АД по моменту**. При этом поток намагничивания АД остается постоянным лишь на идеальном холостом ходу и снижается по мере увеличения нагрузки. Увеличением коэффициента k_2 можно добиться заметного увеличения жесткости механической характеристики АД, вплоть до абсолютного ее значения. Однако выбор k_2 ограничен условиями устойчивости замкнутой системы управления и допустимыми значениями частоты и напряжения питания АД.

Для защиты преобразователя частоты и двигателя от перегрузок по току используется режим его ограничения с помощью устройства токовой отсечки. Это устройство включает в себя узел суммирования Σ_3 текущего значения $|I_1|$ и максимально допустимого $|I_{1\max}|$ модулей тока статора с различными знаками (узел сравнения), вентиль VD и пропорционально-интегральный регулятор тока АЗ. При $|I_1| > |I_{1\max}|$ вентиль VD пропускает сигнал превышения тока статора выше допустимого на вход АЗ, выходной сигнал которого может воздействовать как одновременно на частоту и выходное напряжения преобразователя (узел Σ_1), так и на напряжение преобразователя (узел Σ_2).

Системы скалярного управления с обратной связью по скорости двигателя. Увеличение диапазона регулирования по скорости АД возможно за счет применения в системах управления электроприводом отрицательной обратной связи по скорости. Функциональная схема подобной системы показана на рисунке 39. Здесь, дополнительно к ранее рассмотренным каналам обратных связей по току АД, используется канал отрицательной обратной связи по скорости. Он включает в себя тахогенератор ВУ, как датчик обратной связи, узел суммирования Σ_5 сигналов управления скоростью АД u_y и обратной отрицательной связи по скорости u_{oc} , регулятор абсолютного скольжения А4, блок ограничения АQ его выходного сигнала u_{pc} , а также узел суммирования Σ_4 сигнала u_{pc} и результирующего сигнала u_{y1} с выхода сумматора Σ_1 .

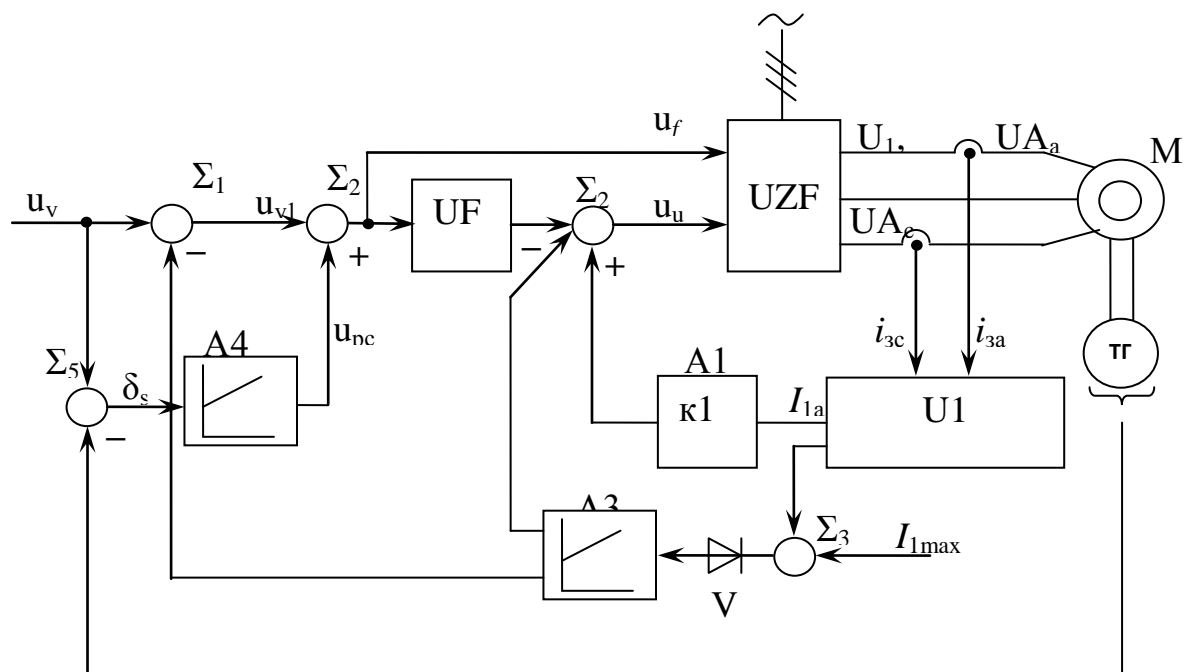


Рисунок 39 – Система скалярного частотного управления с обратной связью по скорости

По мере увеличения нагрузки на валу АД, за счет уменьшения скорости АД и, соответственно, сигнала u_{oc} , увеличивается сигнал рассогласо-

вания $\delta_s = u_y \cdot u_{in} \equiv \omega_{in} \cdot \omega \equiv s_a$, пропорциональный абсолютному скольжению двигателя. Здесь ω_{00} – заданная скорость идеального холостого хода АД, соответствующая исходному сигналу управления u_y ; ω – реальная скорость АД при заданной нагрузке на его валу. При $\delta_s \neq 0$ сигнал u_{pc} на выходе регулятора скольжения, суммируясь с сигналом $u_{y1} = u_y$ (при $I_1 < I_{1max}$), за счет интегральной составляющей передаточной функции регулятора А4 обеспечивает такое приращение сигнала управления u_f преобразователя частоты, при котором частота его выходного напряжения становится равной $f_{10}(1 + s_a)$. Одновременно с изменением частоты за счет функционального преобразователя УФ меняется, по сравнению с начальным U_{10} , и выходное напряжение преобразователя U_1 . При этом скорость двигателя восстанавливается до заданного значения ω_{00} , т. е. обеспечивается абсолютная жесткость механической характеристики АД. Для увеличения перегрузочной способности АД по моменту дополнительно к основному контуру стабилизации скорости может быть использован и канал положительной обратной связи по току статора (устройство А1).

При превышении максимально допустимого тока статора АД (при $|I_1| \geq |I_{1max}|$ и, соответственно, $M \geq M_{max}$), регулятор скольжения должен быть исключен из работы, например ограничением его выходного сигнала u_{pc} на уровне u_{pcmax} . При этом вступают в работу отрицательные обратные связи по току статора с регулятором А3, обеспечивая за счет одновременного уменьшения частоты и напряжения статора АД до их минимальных значений f_{1min} и U_{1min} ограничение момента АД при $\omega = 0$ на уровне M_{max} .

Устойчивость и динамические показатели качества регулирования скорости АД определяются выбором коэффициента пропорциональной и постоянной времени интегральной составляющих передаточных функций регуляторов А4 и А3.

11.4 Система векторного управления

Система управления с прямой ориентацией по вектору потокосцепления ротора АД. Функциональная схема системы регулирования скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором M при питании его от преобразователя частоты UZF с управлением по вектору потокосцепления ротора двигателя представлена на рисунке 40.

Подобная система векторного управления (система Transvektor) впервые предложена фирмой Siemens (ФРГ). Система имеет два внешних контура регулирования – модулем вектора потокосцепления ротора $|\psi_2|$ и угловой скорости ω ротора, а также два подчиненных им внутренних контура регулирования составляющих тока статора I_{1x} и I_{1y} в осях x и y ортогональной системы координат, вращающейся с синхронной скоростью $\omega_{0,y\dot{e}}$ поля двигателя.

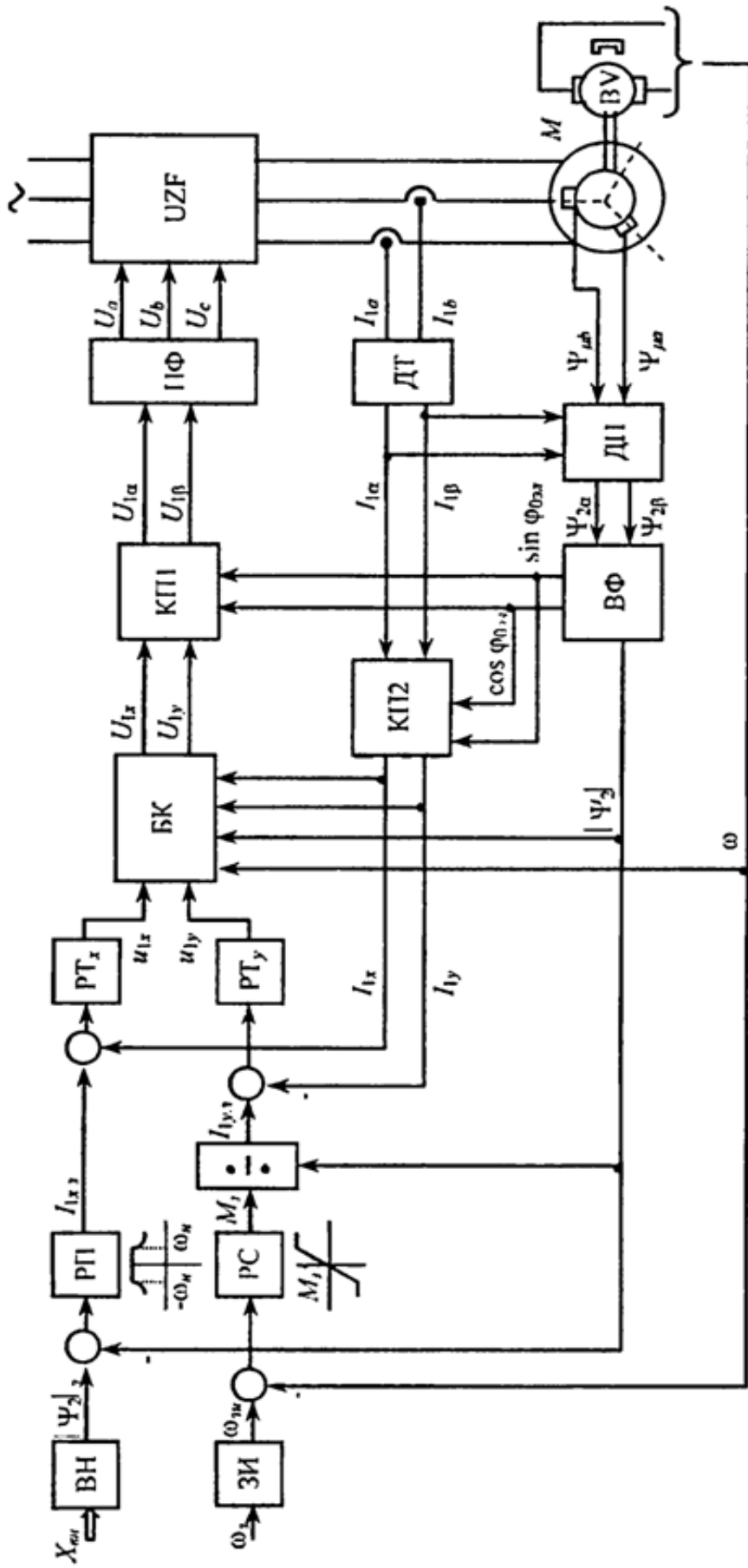


Рисунок 40 — Функциональная схема системы управления с прямой ориентацией по вектору
потокосцепления ротора

Система осуществляет независимое регулирование модуля вектора потокосцепления ротора и скорости ротора при сохранении прямой пропорциональности между моментом двигателя и составляющей намагничивающей силы статора, находящейся в квадратуре с волной потокосцепления ротора. Сигнал задания потокосцепления ротора $|\psi_2|$ формируется в специальном вычислительном устройстве ВУ, использующем математическую модель АД и вводимые в нее реальные параметры двигателя: активные и реактивные сопротивления цепей статора и ротора, число пар полюсов, номинальные значения мощности, скорости, напряжения и тока статора, их частоту, коэффициенты полезного действия и мощности. На рис. 40 вводимые параметры двигателя условно изображены совокупностью внешних сигналов $X_{\text{вн}}$ на входе ВУ. Внешний сигнал задания скорости двигателя ω подается на вход задатчика интенсивности ЗИ, формирующего темп изменения скорости двигателя в соответствии с требуемыми технологическими ограничениями.

Измерение текущих значений скорости, потокосцепления ротора и токов статора АД производится с помощью датчиков скорости (тахогенератор ВУ), потокосцепления (ДП) и тока (ДТ).

ДП преобразует измеренные с помощью датчиков Холла трехфазные мгновенные значения потокосцеплений в воздушном зазоре $\psi_{\mu a}, \psi_{\mu b}$ составляющие потока $\psi_{\mu \alpha}, \psi_{\mu \beta}$ осях α, β ортогональной системы координат, жестко связанной с неподвижным статором двигателя, причем ось α совмещается с магнитной осью статорной обмотки фазы А:

$$\psi_{\mu \alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_{\mu a}; \psi_{\mu \beta} = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} \psi_{\mu a} + \psi_{\mu b} \right). \quad (11.2)$$

Кроме того, в ДП осуществляется вычисление составляющих потокосцепления ротора согласно соотношениям

$$\psi_{2\alpha} = \frac{L_2}{L_\mu} \psi_{\mu \alpha} - (L_2 - L_\mu) I_{1\alpha}; \psi_{2\beta} = \frac{L_2}{L_\mu} \psi_{\mu \beta} - (L_2 - L_\mu) I_{1\beta}, \quad (11.3)$$

где L_2 и L_μ – соответственно, собственная индуктивность обмотки ротора и взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора, приведенные к цепи статора.

ДТ измеряет мгновенные значения фазных токов статора I_{1a}, I_{1b} и аналогично выражениям (11.2) преобразует их в двухфазную систему переменных $I_{1\alpha}, I_{1\beta}$.

Преобразование переменных из неподвижной системы координат α, β в систему координат x, y , связанную с потокосцеплением ротора и вращающуюся со скоростью $\omega_{0y\dot{e}}$, осуществляется вектор-фильтром (ВФ) и координатным преобразователем КП1. Вектор-фильтр выделяет модуль вектора потокосцепления ротора

$$|\psi_2| = \sqrt{\psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2} \quad (11.4)$$

и тригонометрические функции

$$\cos \varphi_{0y\dot{e}} = \psi_{2\alpha} / |\psi_2|, \sin \varphi_{0y\dot{e}} = \psi_{2\beta} / |\psi_2|, \quad (11.5)$$

где $\varphi_{0y\dot{e}} = \omega_{0y\dot{e}} t$ – электрический угол поворота ротора относительно статора в осях x, y .

Преобразователь КП2 осуществляет поворот вектора намагничивающей силы статора на угол $\varphi_{0y\dot{e}}$ определены через составляющие тока статора по осям x, y вращающейся системы координат.

Напомним, что вектор потокосцепления ротора в системе координат x, y совмещен с осью x , т. е. $|\psi_2| = \psi_{2x}, \psi_{2y} = 0$, и составляющая тока I_{1x} определяет магнитный поток двигателя. При этом составляющая тока I_{1y} подобная току в якорной цепи двигателя постоянного тока, определяет электромагнитный момент двигателя.

Задание на электромагнитный момент двигателя формируется выходным сигналом регулятора скорости РС, на входе которого сравниваются сигнал задания скорости $\omega_{c\dot{e}}$ с выхода ЗИ и сигнал, пропорциональный реальной скорости ω двигателя. Для поддержания постоянства электромагнитного момента при изменениях модуля потокосцепления ротора введен блок деления БД сигнала с выхода регулятора скорости на $|\psi_2|$. На выходе блока деления формируется сигнал задания $I_{1y\zeta}$ составляющей тока статора I_{1y} по оси y .

Сигнал задания $I_{1x\zeta}$ составляющей тока статора I_{1x} по оси x формируется на выходе регулятора потока РП, на входе которого сравниваются сигналы задания и реального значения модуля потокосцепления ротора.

Сигналы задания $I_{1x\zeta}$ и $I_{1y\zeta}$ сравниваются с текущими составляющими токов статора I_{1x} и I_{1y} на входах соответствующих регуляторов токов РТ_x и РТ_y, выходные сигналы которых определяют задания составляющих напряжений статора u_{1x} и u_{1y} в системе координат x, y .

Система дифференциальных уравнений, характеризующих динамические процессы в асинхронном двигателе при его векторном управлении в системе координат x, y , имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d|\psi_2|}{dt} + \frac{R_2'}{L_2}|\psi_2| = k_r R_2' I_{1X}; \\ (\omega_{0эл} - p\omega)|\psi_2| = k_r R_2' I_{1Y}; \\ \frac{dI_{1X}}{dt} + \frac{R_1 + k_r^2 R_2'}{\sigma L_1} I_{1X} = \omega_{0эл} I_{1Y} + \frac{k_r R_2'}{\sigma L_1 L_2} |\psi_2| + \frac{1}{\sigma L_1} u_{1X}; \\ \frac{dI_{1Y}}{dt} + \frac{R_1 + k_r^2 R_2'}{\sigma L_2} I_{1Y} = -\omega_{0эл} I_{1X} + p\omega \frac{k_r}{\sigma L_1} |\psi_2| + \frac{1}{\sigma L_1} u_{1Y}; \\ J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p k_r |\psi_2| I_{1Y} - M_c, \end{array} \right. \quad (11.6)$$

где R_1, L_1 – активное сопротивление и собственная индуктивность фазы обмотки статора;

R_2' – активное сопротивление фазы обмотки ротора, приведенное к статорной цепи;

$$k_s = L_\mu / L_1; \sigma = 1 - k_r k_s.$$

При компенсации следующих составляющих в правых частях уравнений за счет их умножения на σL_1 :

$$\sigma L_1 \omega_{0эл} I_{1Y}; \quad \frac{k_r R_2'}{L_2} |\psi_2|; \quad -\sigma L_1 \omega_{0эл} I_{1X} \quad (11.7)$$

и без учета внутренней обратной связи по ЭДС двигателя (составляющей $p\omega k_r |\psi_2|$), подобно электроприводам постоянного тока, уравнение (11.6) может быть преобразовано к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d|\psi_2|}{dt} + \frac{R_2'}{L_2} |\psi_2| = k_r R_2' I_{1X}; \\ \frac{dI_{1X}}{dt} + \frac{R_1 + k_r^2 R_2'}{\sigma L_1} I_{1X} = \frac{1}{\sigma L_1} u_{1X}; \\ \frac{dI_{1Y}}{dt} + \frac{R_1 + k_r^2 R_2'}{\sigma L_1} I_{1Y} = \frac{1}{\sigma L_1} u_{1Y}. \end{array} \right. \quad (11.8)$$

На рисунке 40 роль подобной компенсации выполняет блок БК, в который вводятся переменные $I_{1X}, I_{1Y}, |\psi_2|, \omega$ и где производятся соответствующие функциональные преобразования.

Преобразование составляющих напряжения статора u_{1X}, u_{1Y} с выхода БК в составляющие $u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ в осях α, β осуществляется блоком координатных преобразований КПП в соответствии с соотношениями:

$$u_{1\alpha} = u_{1X} \cos \varphi_{0y\ddot{e}} - u_{1Y} \sin \varphi_{0y\ddot{e}}; u_{1\beta} = u_{1X} \sin \varphi_{0y\ddot{e}} - u_{1Y} \cos \varphi_{0y\ddot{e}}. \quad (11.9)$$

В преобразователе фаз ПФ по соотношениям

$$u_{1a} = \sqrt{\frac{3}{2}} u_{1\alpha}; u_{1b} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} u_{1\alpha} + u_{1\beta} \right); u_{1c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} u_{1\alpha} - u_{1\beta} \right) \quad (11.10)$$

формируются трехфазные синусоидальные сигналы u_{1a}, u_{1b}, u_{1c} , определяющие на выходе преобразователя частоты UZF амплитуду и частоту напряжений U_A, U_B, U_C питания обмоток статора двигателя.

Представив передаточную функцию преобразователя частоты по напряжению совместно с блоками преобразования координат в виде инерционного звена

$$W_{ix}(p) = \frac{U_{1X}(p)}{u_{1X}(p)} = \frac{U_{1Y}(p)}{u_{1Y}(p)} = \frac{k_n}{T_n(p) + 1}, \quad (11.11)$$

где k_n – эквивалентный статический коэффициент передачи между составляющими напряжений u_{1X}, u_{1Y} управления преобразователем и составляющими в осях x, y выходных напряжений преобразователя U_{1X}, U_{1Y} ;

T_n – эквивалентная постоянная времени цепи управления преобразователем,

уравнения (11.8) можем привести к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{|\psi_2|(p)}{I_{1X}(p)} = \frac{k_r L_2}{T_{2y} p + 1}, \\ \frac{I_{1X}(p)}{u_{1X}(p)} = \frac{k_n}{T_n p + 1} \frac{1}{R_\Sigma (T_{1y} p + 1)}, \\ \frac{I_{1Y}(p)}{u_{1Y}(p)} = \frac{k_n}{T_n p + 1} \frac{1}{R_\Sigma (T_{1y} p + 1)}, \\ M(p) = \frac{3}{2} p k_r |\psi_2|(p) I_{1Y}(p), \\ \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{J_\Sigma p} \end{array} \right. \quad (11.12)$$

где $R_\Sigma = R_1 + k_r^2 R_2'$ – результирующее сопротивление обмотки статора двигателя;

$T_{1y} = \sigma L_1 / R_\Sigma$ – электромагнитная постоянная статорной цепи двигателя;

$T_{2y} = L_2 / R_2$ – электромагнитная постоянная роторной цепи двигателя.

Упрощенная структурная схема системы векторного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода в соответствии с формулами (11.12) приведена на рисунке 41.

Схема содержит два одинаковых по параметрам внутренних контура регулирования составляющих I_{1X}, I_{1Y} тока статора с коэффициентом обратной связи по току $K_{f.\dot{\theta}}$, внешний контур регулирования потокосцепления ротора с коэффициентом обратной связи по потокосцеплению $K_{f.\dot{I}}$ и внешний контур регулирования скорости двигателя с коэффициентом обратной связи по скорости $K_{f.\dot{N}}$. Структурная схема подобна структурной системе двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока.

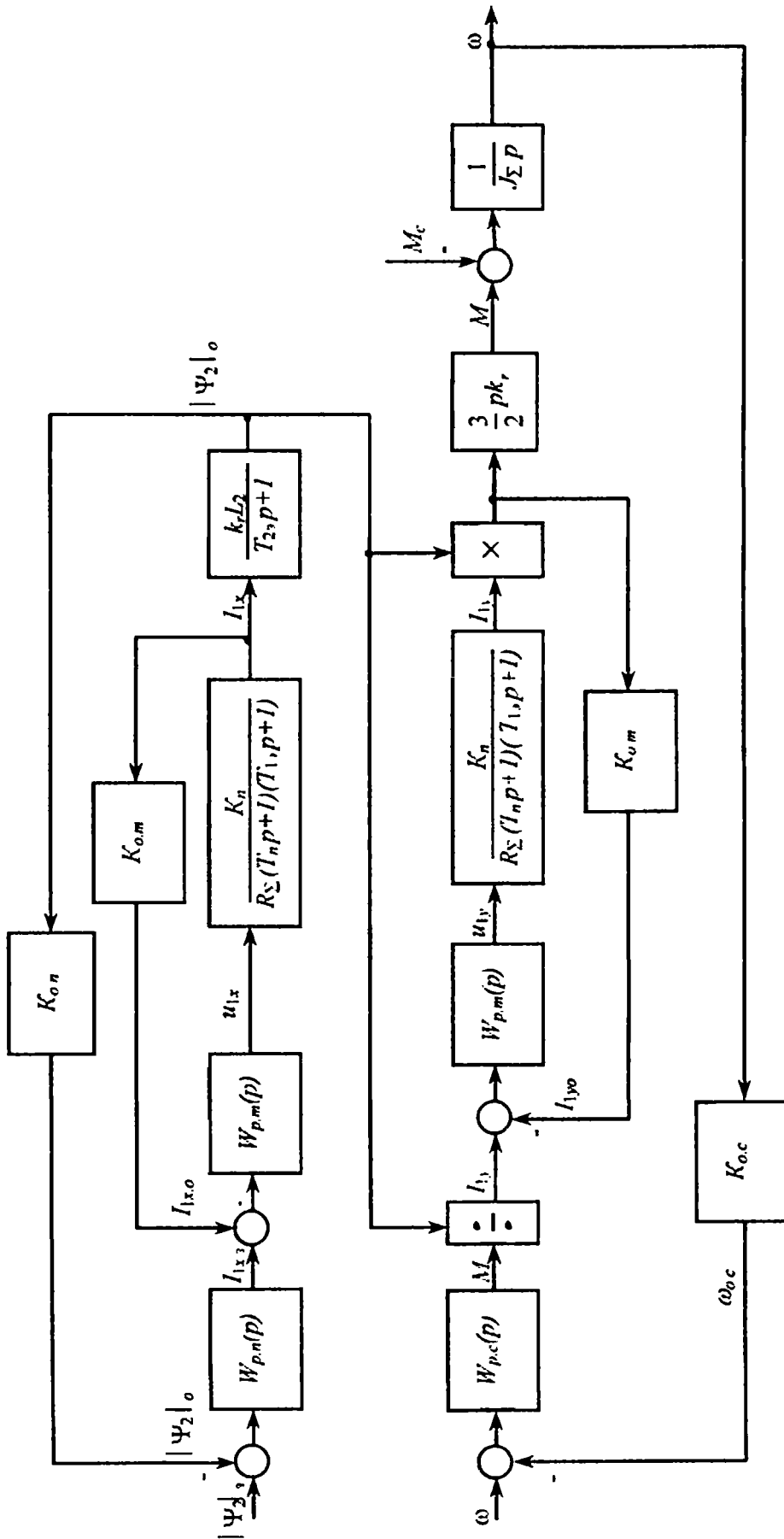


Рисунок 41 – Структурная схема системы управления с прямой ориентацией по вектору потока сцепления ротора АД

Поэтому при настройке контуров регулирования на модульный оптимум определение параметров передаточных функций регуляторов тока $W_{p.T}(p)$, потокосцепления $W_{p.i}(p)$ и скорости $W_{p.N}(p)$ выполняется аналогично:

$$W_{p.T}(p) = K_{p.T} + \frac{1}{T_{u1}p}, W_{p.i}(p) = K_{p.i} + \frac{1}{\dot{O}_{u.i}p}, W_{p.C}(p) = K_{p.C}, \quad (11.13)$$

где $T_{u1} = \frac{K_{i.\dot{o}}k_n}{R_\Sigma} \alpha_1 T_n$ – постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора тока;

$K_{p.T} = \frac{T_{1y}}{\dot{O}_{u.i}}$ – коэффициент передачи пропорциональной части регулятора тока; $\alpha_1 = 2..4$;

$T_{u.i} = \frac{K_{i.i}k_r L_2}{K_{o.T}} \alpha_n \alpha_1 T_n$ – постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора потокосцепления ротора;

$K_{p.i} = \frac{T_{2y}}{\dot{O}_{u.i}}$ – коэффициент передачи пропорциональной части регулятора потокосцепления ротора; $\alpha_n = 2..4$;

$K_{p.C} = \frac{2J_\Sigma K_{o.T}}{3p_i k_r K_{o.C} \alpha_\omega \alpha_1 T_n}$ – коэффициент передачи пропорционального регулятора скорости; $\alpha_n = 2..4$.

Системы управления с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора АД. Установка датчиков магнитного поля в воздушном зазоре АД в системах прямого управления векторами его потокосцеплений требует дополнительных изменений в конструктивных решениях серийно выпускаемых АД и сопровождается снижением надежности электропривода. Поэтому в современных и наиболее совершенных частотно-регулируемых электроприводах, где системы программного управления реализованы на основе микропроцессорной техники, информация о векторах потокосцеплений электрической машины получается косвенным путем на основе ее математических моделей.

Так, в электроприводах серии Simovert Masterdrives VC фирмы Siemens наиболее развиты системы управления скоростью АД с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления его ротора [4]. Модульный принцип построения их систем управления создает возможность комбинаций различных структур управления моментом и скоростью АД, включая как прямое (с помощью тахогенератора), так и косвенное (по модели) определение реальной скорости двигателя. Выбор структур управления

определяется технологическими требованиями к электроприводу и его эксплуатационными особенностями.

Системы управления скоростью АД. На рисунке 42 представлена функциональная схема системы управления электроприводом серии Simovert Masterdrives VC с отрицательной обратной связью по реальной скорости АД. Система имеет два основных канала управления – угловой скоростью и модулем потокосцепления ротора $|\psi_2|$ АД, а также два подчиненных им внутренних контура регулирования составляющих тока статора I_{1x} и I_{1y} в осях x и y ортогональной системы координат, вращающейся с синхронной скоростью $\omega_{0y\dot{z}}$ магнитного поля двигателя.

Сигнал задания скорости АД u_ζ предварительно поступает на вход задатчика интенсивности ЗИ, формирующего на выходе два сигнала управления. Основной сигнал ω_ζ определяет задание скорости АД с темпом, обеспечивающим ограничение рывков и ускорений в соответствии с технологическими требованиями к электроприводу и максимально допустимыми динамическими перегрузками по току и электромагнитному моменту АД. Дополнительный сигнал $d\omega/dt$ определяет, с учетом коэффициента передачи K_I , пропорционального приведенному к валу АД результирующему его моменту инерции, задание динамической составляющей электромагнитного момента $\dot{I}_{\dot{a}\dot{e}t}$. Результат его суммирования на Σ_3 с сигналом M_c , пропорциональным статическому моменту сил сопротивления на валу АД, формирует задание электромагнитного момента АД $\dot{I}_{\zeta d}$. При этом определение реального сигнала M_c и, соответственно, практическая реализация задания электромагнитного момента требуют наличия датчика статического момента на валу АД. Однако техническая сложность, заметные метрологические погрешности существующих датчиков статического момента на вращающихся валах электрических машин и отсутствие серийного их выпуска, как правило, ограничивают их применение в системах электропривода.

Сигнал рассогласования s_a на выходе сумматора Σ_1 основного сигнала управления ω_ζ и сигнала ω реальной скорости АД с выхода тахогенератора ВВ, пропорциональный абсолютному скольжению АД, поступает на вход пропорционально-интегрального регулятора скорости РС. Его выходной сигнал u_{pc} формирует сигнал задания M_ζ электромагнитного момента, необходимого для полной компенсации скольжения АД. На выходе сумматора Σ_2 результирующий сигнал $M_{\zeta c}$ определяет полное задание электромагнитного момента с учетом возможных изменений статической и динамической составляющих нагрузок на валу АД.

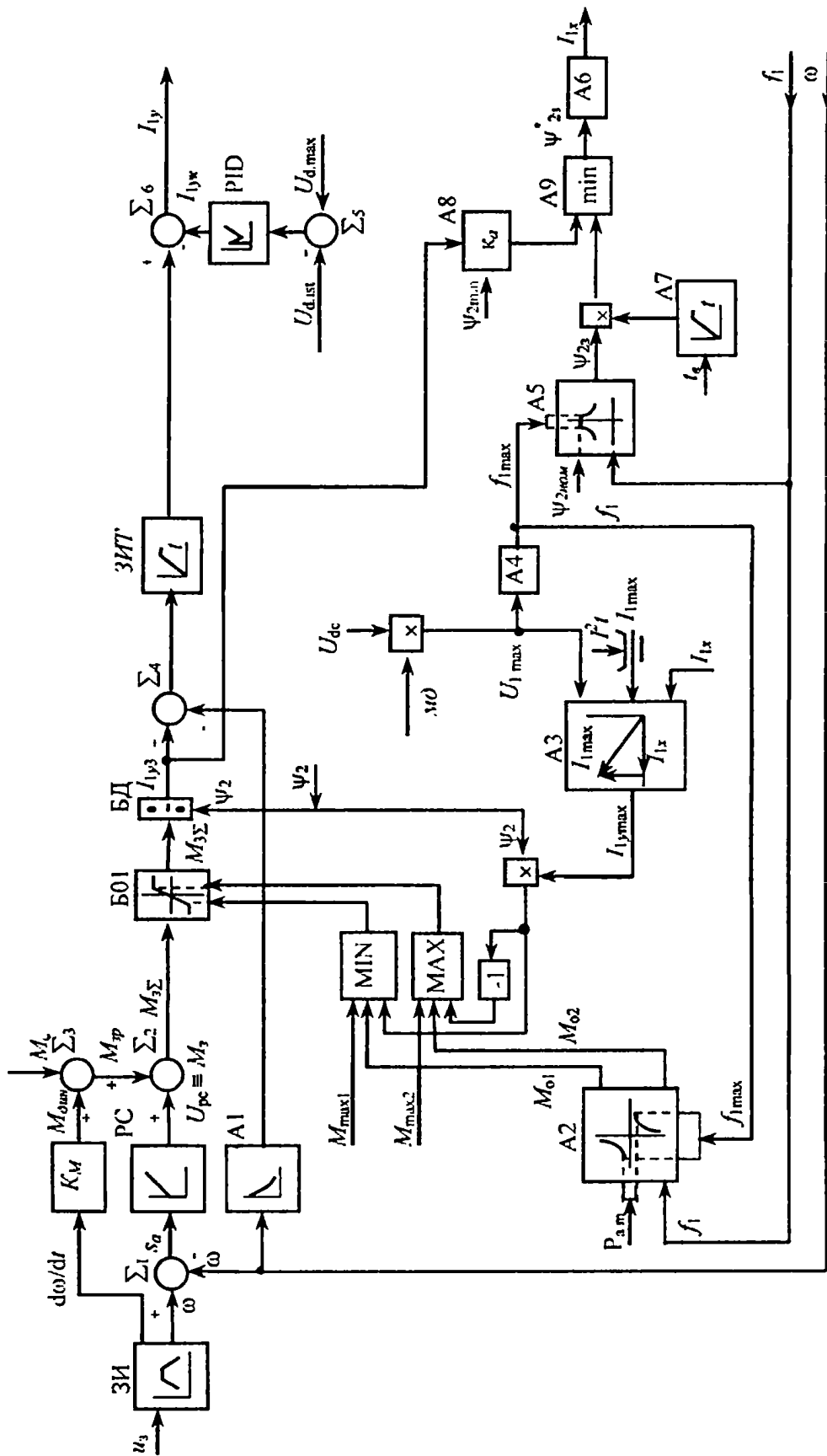


Рисунок 42 – Функциональная схема системы управления с косвенной ориентацией по вектору потокоцепления ротора АД

Подобная комбинированная система задания момента (по возмущению и отклонению) применяется, в основном, для электроприводов, где требуются повышенные динамические показатели качества регулирования. В наиболее распространенных электроприводах канал управления по возмущению, как правило, используется редко, поскольку требует дополнительной и не всегда точно известной информации о реальных значениях статической нагрузки и моментов инерции на валу двигателя. К тому же, два параллельно действующих канала управления – по отклонению и возмущению – требуют более тщательной их настройки и взаимного согласования. С учетом этого в структуре управления электроприводом серии Simovert Masterdrives VC предусмотрена возможность либо отключения всего дополнительного канала по возмущению, либо сохранения канала коррекции лишь по динамической составляющей момента.

Результирующий сигнал $M_{\varphi\Sigma}$ ограничивается блоком Б01 на уровне задания, соответствующего выбранному максимальному значению электромагнитного момента АД. Задание этого значения определяется внешними сигналами управления $M_{\max 1}$ и $M_{\max 2}$. В зависимости от энергетических режимов работы электропривода предусмотрена коррекция по ограничению максимально допустимых моментов АД (блоки MIN и MAX).

Так, при отсутствии дополнительного блока рекуперативного торможения в силовой цепи выпрямителя на входе автономного инвертора напряжения UZF для ограничения максимально допустимой рекуперированной активной мощности $P_{a\delta}$ и, соответственно, ограничения перенапряжения на емкостном фильтре выпрямителя в режиме рекуперативного торможения АД в блоке А2 в функции от скорости АД или частоты его питания f_l формируются сигналы M_{o1} и M_{o2} , уменьшающие уровень задания электромагнитного момента АД. Функциональная связь между $P_{a\delta}$, частотой f_l с учетом ее максимального значения $f_{l\max}$, качественно отраженная в блоке А2, в электроприводах серии Simovert Masterdrives VC определена их математической моделью и корректируется при автоматической идентификации параметров электропривода.

Ограничение электромагнитного момента АД связано и с выбором максимально допустимого тока статора $I_{1\max}$. С этой целью в блоке А3 с учетом максимального значения напряжения питания АД $U_{1\max}$ и реального значения составляющей тока статора I_{1x} по оси x определяется вектор максимально допустимой составляющей тока статора $I_{1y\max}$. Выходной сигнал блока произведения $I_{1y\max}$ на потокосцепление ротора ψ_2 , пропорциональный реальному максимально допустимому электромагнитному моменту АД и контролирует ограничение выходного сигнала $M_{\varphi\Sigma}$.

Для постоянства задания электромагнитного момента при изменении потокосцепления ротора в соответствии с определением момента исполь-

зуется блок деления БД сигнала $M_{\epsilon\Sigma}^*$ на выходе БОИ на сигнал, пропорциональный ψ_2 . Выход БД формирует сигнал задания I_{1Y} составляющей тока статора по оси y .

Для коррекции по динамической составляющей момента на валу АД в структуре управления электроприводом предусмотрена возможность подключения на вход сумматора Σ_4 сигнала отрицательной обратной связи, пропорционального производной по скорости АД (устройство А1). Ограничение рывков по моменту АД за счет ограничения темпа изменения составляющей тока статора I_{1Y} обеспечивается задатчиком интенсивности ЗИТ. Его выходной сигнал, суммирующий на Σ_6 с сигналом отрицательной обратной связи с выхода пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора PID определяет задание на составляющую тока статора I_{1Y} .

Входом PID является выходной сигнал сумматора Σ_5 , где сравниваются сигналы, пропорциональные текущему $U_{d.ist}$ и установленному максимально допустимому $U_{d.max}$ напряжениям на выходе выпрямителя UZF. Рассматриваемый узел способствует управлению моментом АД во время кратковременных отключений или возможных уменьшений напряжения питающей сети преобразователя частоты. При кратковременных отключениях сети управление может быть продолжено за счет рекуперации кинетической энергии вращающегося вала АД в цепь выпрямителя UZF. При нагрузках с большим моментом инерции и высокой рабочей скоростью могут быть весьма заметные периоды поддержки рабочего состояния преобразователя.

Сигнал задания потокосцепления ротора $\psi_{2\zeta}$ формируется в блоке А5. Функциональная связь между реальной частотой f_1 выходного напряжения преобразователя и потокосцеплением ротора АД определяет постоянство $\psi_{2\zeta}$ на уровне задания номинального потокосцепления ротора $\psi_{2\hat{m}}$ при $f_1 \leq f_{1max} \cong f_{1.\hat{m}}$ и уменьшение ψ_2 при $f_1 > f_{1max}$. Последний вариант обеспечивает работу АД в зоне регулирования скорости выше номинальной при постоянстве номинального напряжения питания статора.

Сигнал f_{1max} , корректирующий допустимую максимальную частоту выходного напряжения преобразователя UZF, формируется расчетным путем по модели АД в блоке А4 в зависимости от заданного максимально допустимого напряжения питания статора U_{1max} . Значение U_{1max} определяется напряжением U_{dc} на выходе силового фильтра выпрямителя UZF с коррекцией по сигналу m_d , пропорционального максимально возможной глубине модуляции выходного напряжения UZF.

Сигнал $\psi_{2\zeta}$ задания потокосцепления ротора с выхода блока А5 в результате перемножения на выходной сигнал блока А7 преобразуется в сиг-

нал ψ_{2c} , изменяющийся во времени с темпом, определяющим время возбуждения АД. Лишь по истечении этого времени, когда возбуждение АД достигнет установившегося значения, в системе управления преобразователем частоты появляется логический сигнал на разрешение управления преобразователем со стороны сигнала u_{ω} управления электроприводом. Отметим здесь полное подобие условию подключения к питающему напряжению якорной цепи двигателя постоянного тока независимого возбуждения лишь при наличии его магнитного потока. Значение времени возбуждения АД может быть как задано внешним сигналом t_a блока А7, так и определено при автоматической идентификации параметров АД.

В структуре управления предусмотрена возможность адаптации потока ротора к нагрузке АД, способствующая снижению суммарных магнитных потерь в машине при уменьшении нагрузки. С этой целью сигнал I_{1Yc} задания составляющей тока статора по оси у поступает на блок А8, где при заданном минимально допустимом значении потока ротора ψ_{2min} и заданном коэффициенте адаптации k_a формируется сигнал, определяющий поток ротора в зависимости от нагрузки АД. При включенном контуре адаптации потока ротора блок А9 выделяет минимальное значение сигнала задания ψ_{2y}

В соответствии с заданием потокосцепления ротора в блоке А6 по математической модели АД определяется сигнал задания составляющей тока статора I_{1X} . Каждая из составляющих I_{1X} и I_{1Y} тока статора сравнивается на Σ_7 и Σ_8 со своими текущими значениями $I_{1Y.ist}$ и $I_{1X.ist}$, которые выделяются в блоке UVF векторного преобразования токов I_{1A} и I_{1C} в цепи обмоток фаз А и С статора АД. Угол $\varphi_{0,yz}$ поворота осей координат х и у, вращающихся со скоростью электромагнитного поля АД, формируется в блоке А11 согласно частоте f_1 .

Сигналы рассогласования задающих и реальных значений составляющих тока статора поступают на входы их соответствующих регуляторов РТ_х и РТ_у. Выходные сигналы регуляторов после суммирования на Σ_9 и Σ_{10} с сигналами компенсации составляющих по (58) и учета внутренней обратной связи по ЭДС двигателя, сформированными в блоке А12, поступают на координатный преобразователь К/Р. В зависимости от его входных сигналов, пропорциональных заданию составляющих выходного напряжения преобразователя в осях х, у, на выходе К/Р формируются сигналы u_{1c} и φ , определяющие, соответственно, амплитуду и фазу вектора напряжения в двухфазной системе координат α, β , неподвижной относительно статора АД. Регулятор напряжения РН, на входе которого сравниваются сигналы задания u_{1c} и реального значения напряжения $u_{1.ist}$ на выходе выпрямителя UZF, обеспечивает стабилизацию его выходных напря-

жений. Сигналы задания выходного напряжения преобразователя u_1 и совместно с сигналом f_1 , определяющим частоту выходного напряжения преобразователя частоты, трансформируются в преобразователе координат ПК в эквивалентные сигналы u_{1a}, u_{1b}, u_{1c} трехфазной системы координат, определяющие выходные напряжения UZF.

Формирование сигнала f_1 задания частоты выходных напряжений UZF обеспечивается суммированием на Σ_{11} и Σ_{12} сигнала ω реального значения скорости АД, поступающего с тахогенератора BV, и сигналов f_{s1} , $f_{s\Delta}$, определяющих частоту скольжения АД, соответственно, в функции тока и ЭДС двигателя. Вычисление f_{s1} осуществляется в блоке 1M математической модели двигателя по току, на вход которого совместно с текущими значениями $I_{1Y.ist}$ и $I_{1X.ist}$ составляющих тока статора в осях x, y подается сигнал R_2 , пропорциональный сопротивлению ротора АД.

В блоке ЭФМ математической модели АД, на вход которого, кроме текущих значений $I_{1Y.ist}$ и $I_{1X.ist}$ составляющих тока статора, поступает сигнал R_1 , пропорциональный результирующему сопротивлению цепи статора, формируются два выходных сигнала: ψ_2 – определяющий потокосцепление ротора и E_1 – пропорциональный ЭДС двигателя.

В серии Simovert Masterdrives VC реализована логика управления, обеспечивающая отдельное подключение сигналов f_{s1} и $f_{s\Delta}$ на вход Σ_{11} и Σ_{12} в зависимости от заданной частоты выходного напряжения UZF. При малых частотах действует контур коррекции по току, обеспечивая компенсацию падения напряжения на сопротивлении статора; при больших частотах – по ЭДС двигателя, обеспечивая коррекцию скорости АД. Выбор частоты, при которой переключаются контуры коррекции, определяется экспериментально по аналогии с настройкой соотношений U_1/f_1 в разомкнутых структурах скалярного управления АД.

Максимально допустимая частота выходного напряжения UZF ограничивается сигналом $f_{i\Delta\delta}$ блока Б02. Значения сигналов R_1 и R_2 формируются в блоке А10 тепловой модели АД, куда поступает совокупность сигналов δ_Σ , включающих в себя информацию о сопротивлениях цепи статора и ротора, определенных при автоматической идентификации параметров двигателя, степени влияния на них температуры собственно двигателя и окружающей среды, условий охлаждения двигателя, наличия выходных фильтров преобразователя.

В соответствии с принципом работы рассматриваемой системы управления на рисунке 43 приведены качественные зависимости ее основных переменных в функции от момента АД при постоянном сигнале задания скорости (рис. 43, а) и в функции от сигнала управления скоростью при постоянном статическом моменте $\dot{I}_c \neq 0$ (рис. 43, б).

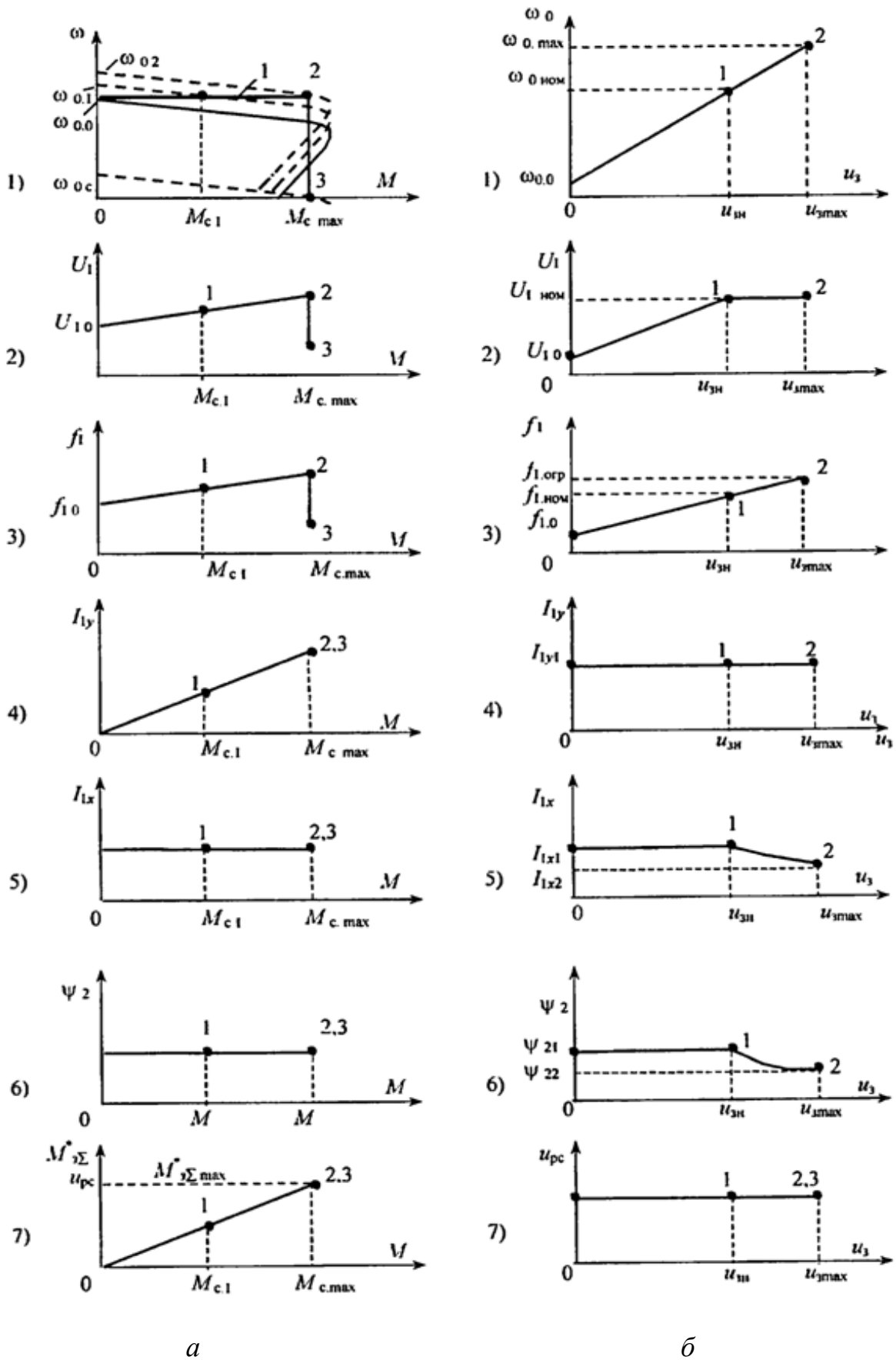


Рисунок 43 – Зависимости переменных системы электропривода при $u_3 = const, M = var$ (а) и при $u_3 = var, M_c \leq M_{c.max} \neq 0 = const$ (б)

Как результат действия ПИ-регулятора скорости механическая характеристика АД имеет в области нагрузок $\dot{I}_c < M_{c.\max}$ абсолютную статическую жесткость (линия 1 на рис. 43, а, 1), а при $\dot{I}_c \geq M_{c.\max}$ механическая характеристика за счет ограничения выходного сигнала регулятора скорости и ПИ-регуляторов составляющих тока статора в осях x, y абсолютно мягкая (линия 2-3 на рис. 43, а, 1). Стабилизация скорости связана с увеличением выходного сигнала регулятора скорости $u_{\delta\bar{n}}$ и соответствующим увеличением сигнала задания $\dot{I}_{\zeta\Sigma}^*$ электромагнитного момента АД (рис. 43, а, 7). Последнее приводит к увеличению напряжения U_1 и частоты f_1 на выходе UZF по мере увеличения статической нагрузки \dot{I}_{c1} (рис. 43, а, 2, 3) и, соответственно, увеличению по сравнению с исходной ω_{00} скорости идеального холостого хода ω_{01} (при M_{c1}) двигателя. Штриховые линии механических характеристик АД на рис. 43, а, 1 отражают перемещение исходной характеристики \dot{I}_0 при увеличении нагрузки.

При $\dot{I}_c = M_{c.\max}$, когда произойдет ограничение выходного сигнала $u_{\delta\bar{n}}$ на уровне максимального значения $\dot{I}_{\zeta\Sigma}^*$ блока БО1, и при абсолютной скорости АД, равной нулю, напряжение U_1 и частота f_1 будут соответствовать значениям (точки 3 на рис. 43, а, 2, 3), при которых скорость идеального холостого хода АД будет равной $\omega_{0\bar{N}}$ (рис. 43, а, 1).

По мере увеличения нагрузки составляющая I_{1Y} тока статора, определяющая момент АД, также увеличивается (рис. 43, а, 4), а составляющая I_{1X} , как и определяемое ею потокосцепление ротора ψ_2 , сохраняются постоянными (рис. 43, а, 5, 6).

При отсутствии сигнала задания скорости АД ($u_\zeta = 0$) и наличии на его валу постоянного реактивного момента сил сопротивления $\dot{I}_c \neq 0$ начальные выходные напряжение U_{10} и частота f_{10} преобразователя равны нулю. Если же момент сил сопротивления активен, то выходные напряжение $U_{1.0}$ и частота $f_{1.0}$ преобразователя соответствуют значениям, при которых начальная скорость идеального хода АД $\omega_{00} \neq 0$ и механическая характеристика двигателя обеспечивает при $\omega = 0$ момент M_c (рис. 43, б, 2, 3). Соответственно этому моменту определяются и начальные сигналы $u_{\delta\bar{n}}, M_{\zeta\Sigma 1}^*, I_{1Y.1}$ (рис. 43, б, 6, 7). При этом сигналы $I_{1X.1}$ и $\varphi_{2.1}$ определяют номинальное потокосцепление ротора (рис. 43, б, 5, 6).

По мере увеличения сигнала u_ζ напряжение U_1 и частота f_1 на выходе преобразователя UZF также увеличиваются. При $u_\zeta = u_{\zeta i}$ выходные напряжение UZF и его частота достигают номинальных значений $U_{1\bar{m}}$ и $f_{1\bar{m}}$. В соответствии с ними устанавливается номинальное значение ско-

рости идеального холостого хода АД $\omega_{0\dot{m}}$. Дальнейшее увеличение u_ζ и частоты f_1 сопровождается постоянством напряжения $U_1 = U_{1\dot{m}}$ на выходе UZF и переходом работы АД в зону уменьшения потокосцепления ротора за счет снижения составляющей I_{1X} тока статора (рис. 43, б, 5, 6). Максимальный момент АД при этом также уменьшается.

При $u_\zeta = u_{\zeta\max}$ скорость идеального холостого хода АД устанавливается на максимально заданном уровне $\omega_{0\max}$ соответствующем $f_{1\dot{a}\dot{o}}$ (точка 2 на рис. 43, б). Составляющая тока статора и соответствующее ей потокосцепление ротора устанавливаются при этом на минимальном уровне I_{1X2} и ψ_{22} (рис. 43, б, 5, 6).

В приведенной системе управления диапазон регулирования скорости АД при номинальной нагрузке и точности регулирования скорости на уровне 5 % с учетом двухзонного регулирования практически достигает 1:50 при использовании аналогового тахогенератора и 1:200 – при применении цифрового датчика скорости.

Возможность избежать применения тахогенератора как элемента, требующего дополнительной, точной и надежной его установки на валу АД, реализуется в системах, где обратная связь по скорости заменяется обратной связью по ЭДС двигателя. В серии Simovert Masterdrives VC сигнал обратной связи по ЭДС двигателя ω_0 поступает на сумматор Σ_1 с выхода блока ЭФМ математической модели АД, а формирование частоты f_1 выходного напряжения UZF осуществляется суммированием на Σ_{11} и Σ_{12} сигнала задания скорости ω_ζ и сигналов f_{s1} и $f_{s\dot{y}}$ с выхода блока ИМ математической модели двигателя по току и регулятора ЭДС двигателя (рис. 44). Все остальные блоки схемы управления электроприводом (сгруппированы в блоке СУЭ) и функциональные связи между ними остаются при этом без изменения.

Качество регулирования скорости в подобных системах управления зависит от степени соответствия математической модели ЭФМ и установленных в ней параметров реальной электрической машине и, как правило, заметно уступает системам с датчиками скорости.

Система управления моментом АД. Ряд технологических объектов (натяжные, намоточно-размоточные механизмы и т. п.) требуют регулирования и стабилизации момента на валу двигателя при постоянстве его заданной скорости. В электроприводах серии Simovert Masterdrive VC решение подобной задачи реализуется в структуре управления с датчиком скорости на валу АД за счет включения между сигналом управления скоростью u_ζ и сигналом управления моментом $u_{\zeta i}$ блока РБ с релейной характеристикой (рис. 45). Остальные блоки и их функциональные связи остаются в структуре управления электроприводом СУЭ неизменными.

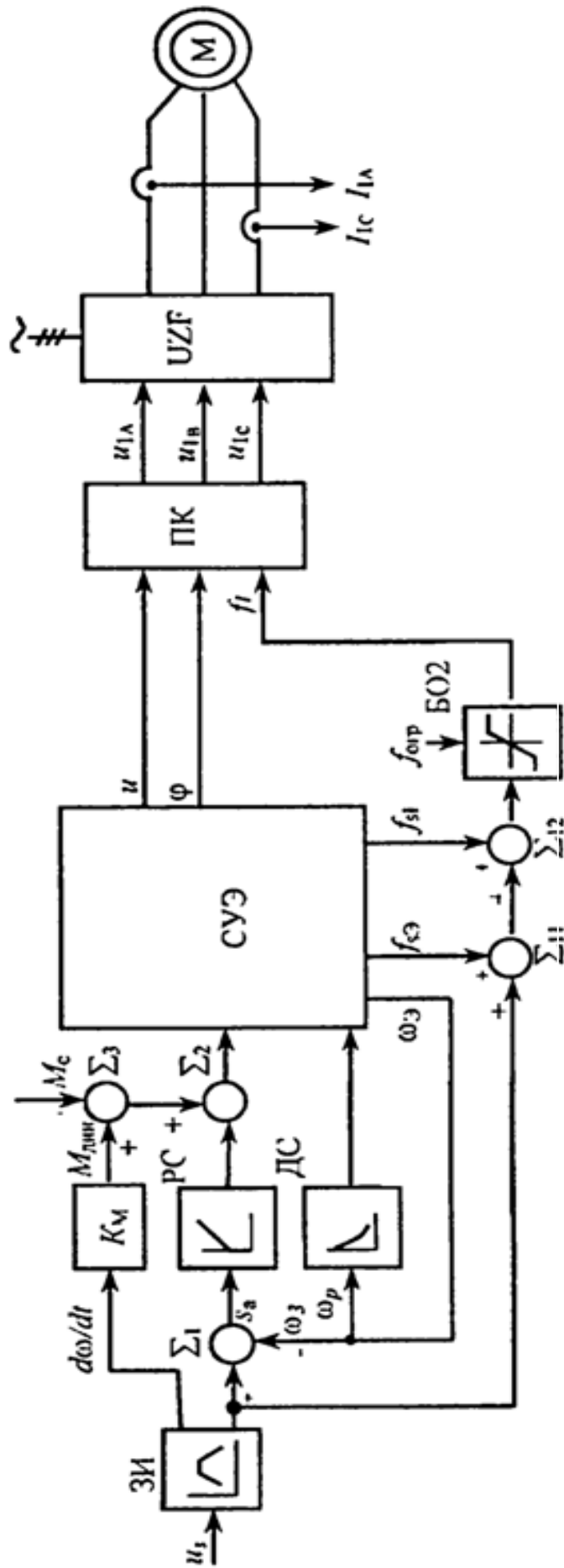


Рисунок 44 – Система управления электроприводом без датчика скорости

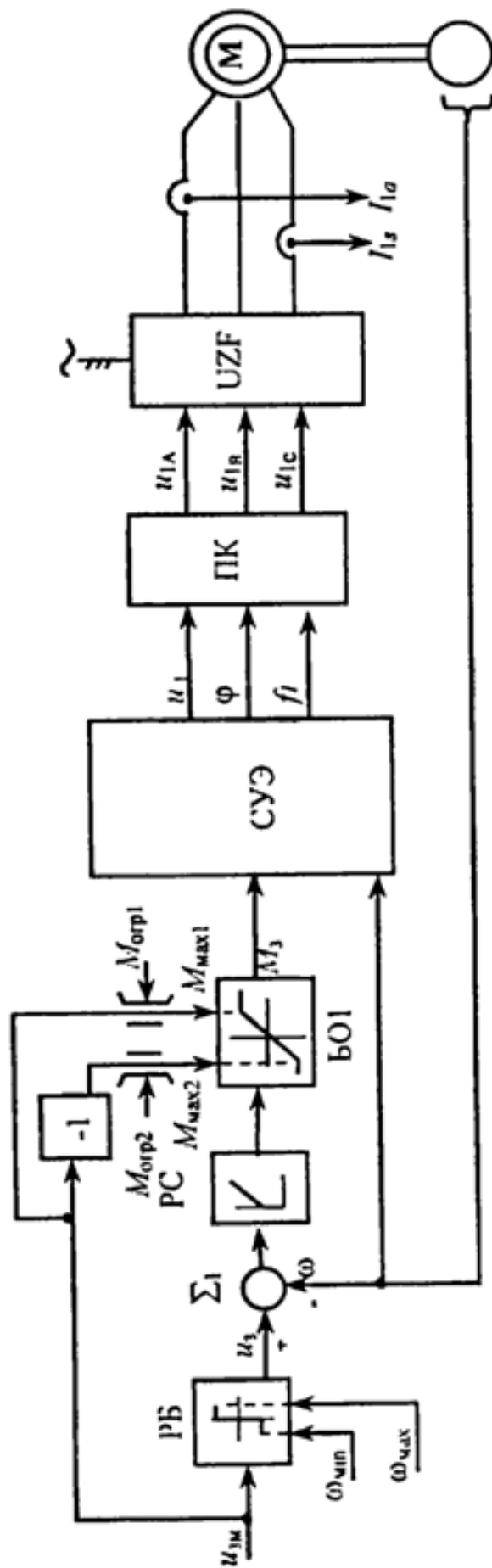


Рисунок 45 – Система управления моментом АД

Задание постоянной максимальной или минимальной скорости АД обеспечивается внешними сигналами ω_{\max} и ω_{\min} , ограничивающими уровень сигнала u_{ζ} , на входе регулятора скорости. Сигнал $u_{\zeta i}$ определяет направление скорости и ограничение сигнала задания момента $M_{y\Sigma}^*$ на уровне $M_{\max 1}$ и $M_{\max 2}$. Предельно допустимые моменты АД ограничиваются при этом сигналами $M_{i\bar{a}1}$ и $M_{i\bar{a}2}$.

Механическая характеристика электропривода в подобной системе при $\dot{I}_C < M_{\max}$ имеет абсолютную статическую жесткость при скорости, соответствующей заданию сигналами ω_{\max} или ω_{\min} . При $\dot{I}_C = M_{\max}$ механическая характеристика имеет абсолютно мягкий характер, стабилизируя заданный сигналом $u_{\zeta i}$ электромагнитный момент АД.

11.5 Комплектные электроприводы ЭКТ2

Электроприводы ЭКТ2 предназначены для управления трехфазными электрическими двигателями переменного тока мощностью от 16,5 до 263 кВт и обеспечивают:

- регулирование выходной частоты от 5 Гц до номинальной (50 или 200 Гц);
- точность поддержания частоты $\pm 0,5$ %;
- регулирование выходного напряжения в диапазоне 38...380 В;
- точность поддержания напряжения $\pm 2,5$ %;
- стабилизацию соотношения U/f в диапазоне 1,7...7,6;
- плавный пуск, торможение и реверс двигателя.

Электропривод построен на базе двухступенчатого преобразователя частоты с звеном постоянного тока (рис. 46). Преобразователь состоит из управляемого выпрямителя КВ и автономного инвертора напряжения АИН на однооперационных тиристорах с принудительной фазной коммутацией и продолжительностью открытого положения ключей 180° . Питание от сети 0,4 кВ бестрансформаторное, через коммутационные реакторы КР.

Промышленность выпускает две модификации электропривода: с рекуперацией энергии торможения в сеть (ЭКТ2-Р) и динамическим торможением (ЭКТ2-Д). В электроприводе ЭКТ2-Р для обеспечения рекуперации встречно-параллельно к управляемому выпрямителю подключен инвертор. В электроприводе ЭКТ2-Д вместо него используются разрядные ключи, с помощью которых накопленная на конденсаторе фильтра энергия торможения рассеивается в тормозных резисторах.

Системой автоматического регулирования обеспечивается двухзонное регулирование выходной частоты. В первой зоне она изменяется про-

порционально ЭДС статора (т.е. реализуется закон частотного регулирования), а во второй – возрастает при неизменной ЭДС.

Структура САР подобна структуре двухзонного электропривода постоянного тока. ЭДС регулируется ПИ-регулятором (РЕ) с подчиненным контуром выпрямленного тока (ПИ-регулятор тока РТ и датчик тока ДТ), которые управляют выпрямителем УВ. Информацию об ЭДС получает датчик ЭДС ДЕ по измеренному напряжению (ДН) и току (ДТ). Благодаря задатчику интенсивности ЗИ происходит плавный пуск и торможение.

В канал управления АИН входят ПИ-регулятор напряжения РН, задающий генератор ЗГ и распределитель импульсов РИ. К задающему входу РН подается напряжение, пропорциональное номинальному напряжению двигателя. Задающий генератор является преобразователем «напряжение-частота» с двумя управляемыми входами. Его выходная частота увеличивается с возрастанием управляющего напряжения $u_{\text{эсд}}$ и с уменьшением опорного напряжения $u_{\text{н}}$. Распределитель импульсов распределяет выходные импульсы ЗГ между тиристорами АИН, формируя на выходе АИН знакопеременное напряжение.

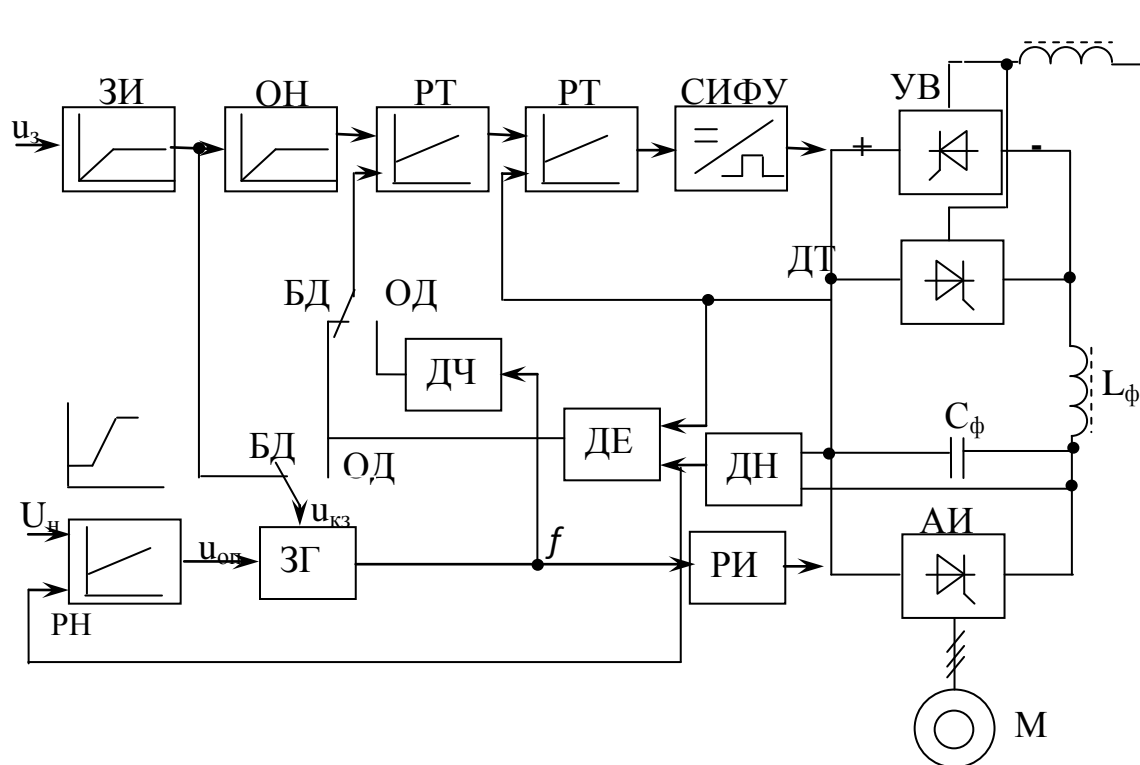


Рисунок 46 – Функциональная схема комплектного электропривода ЭКТ2

При помощи двух переключателей можно изменять структуру САР для работы с одним двигателем (положение переключателя ОД) либо для одновременного питания от АИН нескольких двигателей (положение БД).

Для варианта с одним двигателем к управляющему входу ЗГ подают напряжение датчика ЭДС, а к входу регулятора ЭДС – напряжение, пропорциональное заданной частоте (с помощью датчика частоты ДЧ, т. е.

преобразователем «частота-напряжение»). Ограничитель напряжения ОН в этом режиме передает сигнал задания к входу РЕ без изменений.

В первой зоне, когда задаваемое напряжение u_{ζ} не высоко, сигнал датчика напряжения меньше, чем сигнал на задаваемом входе. Опорное напряжение на его выходе неизменное, и частота импульсов на выходе ЗГ задается выходным сигналом ДЕ, поэтому частота и ЭДС изменяются пропорционально.

При переходе в другую зону напряжение статора благодаря регулятору ЭДС вначале немного превышает номинальное, регулятор напряжения выходит из режима насыщения, уменьшая опорное напряжение и увеличивая заданную частоту. Это производит к увеличению выходного напряжения ДЧ, уменьшая ошибки РЕ и возвращая напряжение статора к номинальному уровню. Дальнейшее увеличение задаваемого напряжения u_{ζ} вызывает относительное уменьшения опорного напряжения и частоты при неизменной ЭДС. Таким образом, обеспечивается зависимость от ЭДС ослабление потока.

При групповом питании нескольких двигателей к входу регулятора ЭДС приходит сигнал от датчика ЭДС, а к управляющему входу ЗГ – напряжение от датчика интенсивности. Кроме того, ограничитель напряжения ОН разблокированный и способен ограничивать максимальное напряжение на задающем входе РЕ на уровне номинальной.

В первой зоне РН насыщений, а заданная частота пропорциональна выходному сигналу ЗИ и заданию на ЭДС статора.

При переходе во вторую зону ограничитель напряжения поддерживает задание на ЭДС на номинальном уровне, РН работает на грани насыщения, формируя неизменное опорное напряжение, а заданная частота изменяется пропорционально выходному напряжению датчика интенсивности. Таким образом, регулятор напряжения в этой структуре практически не используют.

Комплектные электроприводы ЭКТ2 нашли широкое применение в отечественной промышленности для механизмов с невысокими требованиями к диапазону регулирования скорости, точности и быстродействия (вспомогательные механизмы). Начат выпуск нового поколения электроприводов (ЭКТ3) с подобной структурой, но на двухоперационных тиристорах.

11.6 Частотно-регулируемые преобразователи Micromaster440

Преобразователи MICROMASTER 440 являются серийными преобразователями для регулирования трехфазных электродвигателей. Отдельные поставляемые модели имеют диапазон мощностей 120 Вт при однофазном входе и до 75 кВт при трехфазном входе и обеспечивают:

- векторное регулирование без датчика скорости;

- регулирование потока (FCC) для улучшения динамических характеристик и повышения качества регулирования электродвигателя;
- мгновенное ограничение тока (FCL) для работы без отключения двигателя;
- встроенное динамическое торможение постоянным током;
- комбинированное торможение для улучшения возможностей торможения;
- времена ускорения и торможения с программируемым сглаживанием;
- использование замкнутого PID-регулятора с автоподстройкой.

Электропривод построен на базе двухступенчатого преобразователя частоты с звеном постоянного тока. Преобразователи оснащены микропроцессорной системой управления и используют самые современные технологии с IGBT-модулями – транзисторами (Insulated Gate Bipolar Transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором). Вследствие этого преобразователи надежны и разнообразны. Оригинальный способ широтно-импульсной модуляции с выбором частоты коммутации дает возможность бесшумной работы электродвигателя. Обширные функции защиты обеспечивают эффективную защиту преобразователя и электродвигателя.

С предустановленными заводскими настройками преобразователи могут использоваться в широком спектре областей применения для простейшего управления скоростью двигателей. Благодаря расширенной функциональности преобразователи дополнительно могут использоваться для приводов, где требуется управление моментом двигателя.

Преобразователи частоты имеют сложную микропроцессорную систему управления, обеспечивающую оптимальную работу электропривода в технологическом процессе, а также многофункциональную связь с внешними элементами и системами управления. Система управления преобразователем включает несколько контуров регулирования параметров привода, которые связаны между собой. Такое построение системы приводит к необходимости точной настройки внутренних параметров этих контуров регулирования, и любые их отклонения от оптимальных значений может привести к неустойчивой или некорректной работе привода в технологическом процессе.

В преобразователях частоты Micromaster 440 с векторным управлением без датчика скорости программно реализованы задатчик интенсивности *ЗИ*, регулятор скорости *РС* с обратной связью по вычисляемой угловой скорости вращения двигателя; также вычисляется задание динамической составляющей момента, кроме того, возможен ввод задания момента холостого хода привода.

Предусмотрено ограничение задания полного момента двигателя M_{aiv}^* , соответствующее максимально допустимому по механооборудованию.

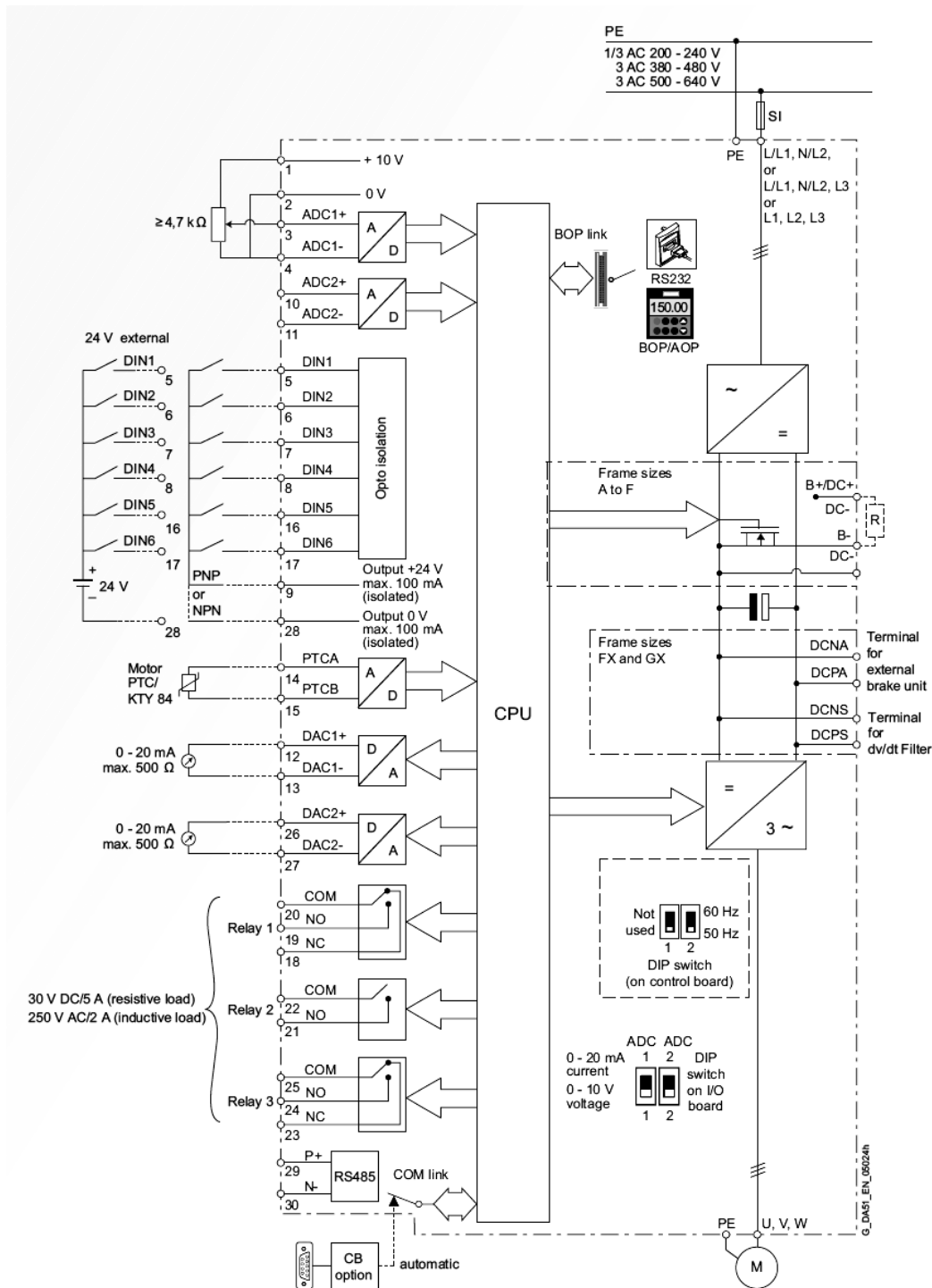


Рисунок 47 – Схема подключения преобразователя Micromaster 440

При векторном управлении формируются компоненты тока статора: ток намагничивания I_d , определяющий поток двигателя, и активный ток I_q для необходимого момента. Скольжение и угловая скорость вращения двигателя вычисляются с использованием модели наблюдателя и других адаптационных устройств. На рис. 48 переменные с индексом «*» означают задание соответствующего параметра.

Необходимое для работы оборудования значение любого из множества программируемых параметров, собранных в логичную структуру меню и подменю, может быть легко введено в память прибора при помощи клавиатуры и алфавитно-цифрового дисплея.

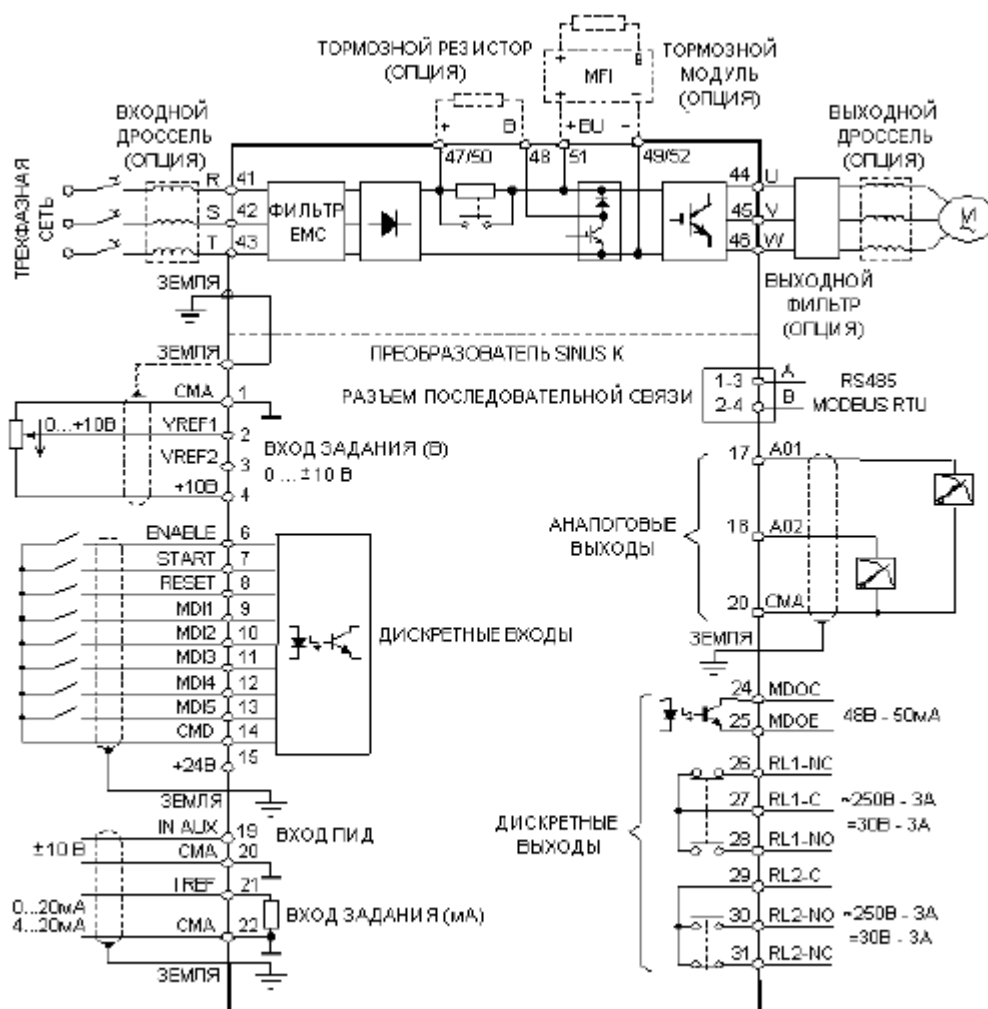


Рисунок 49 – Схема подключения преобразователя SINUS K

Преобразователи серии SINUS K имеют следующие стандартные характеристики:

- питание от трехфазной сети переменного тока 380...500В (–10 %, +5 %) (для моделей SINUS CABINET – до 690 В);
- фильтры EMC для промышленного окружения, встроенные во все модели;
- фильтры EMC для бытового окружения, встроенные в модели размеров S05 и S10;
- возможность питания от сети постоянного тока;
- встроенный тормозной ключ для моделей до S30 включительно;
- последовательный интерфейс RS485 со стандартным протоколом обмена MODBUS RTU;
- исполнение IP20 для моделей до S40 включительно;

- возможность исполнения IP54 для моделей до S30 включительно;
- 3 аналоговых входа $0 \pm 10 \text{ В}$, 0(4).20 мА;
- 8 программируемых дискретных входов (NPN/PNP) с оптоизоляцией;
- 2 программируемых аналоговых выхода $0,10 \text{ В}$, 4,20 мА, 0,20 мА;
- 1 статический дискретный выход с открытым коллектором и оптоизоляцией;
- 2 релейных дискретных выхода с переключающей группой контактов.

Диагностические сообщения позволяют точно настроить преобразователь при наладке и быстро найти решение возникающих проблем при работе оборудования.

12 СИСТЕМЫ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИМИ СТАНКАМИ

Внедрение в технологические процессы вычислительной техники позволило экономически эффективно осуществить идею числового программного управления технологическим оборудованием, которая нашла широкое применение в первую очередь в управлении станками.

Числовое программное управление – это управление обработкой заготовки на станке или роботом по управляющей программе (УП), заданной в цифровой форме. Станки с устройствами числового программного управления (УЧПУ) превратились сегодня в важнейший вид высокоэффективного металлорежущего оборудования. Этому способствовала не только высокая степень автоматизации обработки, но и возможность быстрой переналадки их на обработку любой детали в пределах технологических возможностей станка. Управляющая программа включает в себя геометрическую и технологическую информацию. Геометрическая информация содержит данные о траектории движения инструмента и ее параметрах. Большинство траекторий, воспроизводимых УЧПУ, представляют собой прямые и дуги окружностей, поэтому прямая и дуга окружности — это основные элементы траектории, задаваемые в управляющей программе. Более сложные, аналитически не описываемые кривые обычно аппроксимируются отрезками прямых и дугами окружностей.

Технологическая информация в УП включает в себя данные о технологических режимах станка и режущем инструменте, а также функция дискретно-логического управления вспомогательными системами станка.

Любое устройство ЧПУ имеет четыре основных функции: цифровое управление; обработку УП; связь с оператором; диагностирование УЧПУ, тестирование программного обеспечения и аппаратных средств УЧПУ.

На рисунке 50 отображено содержание этих функций.



Рисунок 50 – Функции УЧПУ

Группа функций цифрового управления определяет преобразование УП в сигналы управления исполнительными механизмами станка. Функция расчета траектории включает в себя: интерпретацию текста УП, коррекцию траектории движения с учетом геометрических параметров реального инструмента, расчет оптимальных режимов разгона и торможения. Функция воспроизведения траектории обеспечивает управление приводами осей геометрии станка и отслеживание правильности воспроизведения траектории. Для реализации заданной траектории необходимо в режиме реального времени вычислять координаты промежуточных точек траектории. Этот процесс называют *интерполяцией*. Функция воспроизведения траектории включает в себя реализацию замкнутого контура регулирования положения осей станка. Функция управления электроавтоматикой (ЭА) также осуществляется в режиме реального времени и обеспечивает выполнение технологических команд управляющей программы.

Другую группу функций составляют функции обработки УП, которые зависят от способа ее подготовки.

Различают следующие способы подготовки:

- *аналитический*, предполагающий введение программы на языке технолога. Этот способ наиболее распространен при программировании станков с ЧПУ;

- *непосредственное обучение*, при котором координаты точек по всем осям заносятся в память после вывода всех исполнительных механизмов в заданную точку. Этот способ используется, как правило, в промышленных роботах;

- *полуаналитический*, при котором координаты опорных точек записываются в память УЧПУ, а участки кривых между ними аппроксимируются элементарными кривыми. Этот способ используется в контурных УЧПУ роботами (когда траектория задается пространственной кривой).

Современные УЧПУ имеют развитые инструментальные среды для интерактивного создания, коррекции и моделирования выполнения УП.

Следующая группа функций отвечает за взаимодействие оператора с УЧПУ. Традиционно, ввод команд оператора в УЧПУ производится при помощи функциональной клавиатуры. Однако функциональные возможности современных УЧПУ значительно расширились, поэтому наряду со стандартной функциональной клавиатурой широко используются так называемые программные клавиши (Soft Key), назначение которых изменяется в зависимости от режима УЧПУ. Текущее назначение программных клавиш отображается на экране панели оператора. На экране также отображаются: текущее состояние и режим работы устройства, сообщения оператору, координаты текущего положения инструмента в различных системах координат, текущие технологические режимы, текст текущей управляющей программы и т. д.

Существует также группа функций диагностирования аппаратных средств, системного программного обеспечения, протекания технологических процессов, а также правильности вводимых УП. Чем точнее указано место неисправности, тем меньше время восстановления работоспособности системы. Для диагностирования в УЧПУ используются различные программно-аппаратные средства (датчики положения, программные счетчики и др.). В зависимости от выполняемого задания УЧПУ работает в различных режимах. Можно выделить несколько основных режимов работы, которые соответствуют функциям УЧПУ:

1) режим *наладки станка*. В этом режиме оператор имеет возможность управлять перемещениями станка вручную при помощи клавиатуры или специальных задающих устройств. Этот режим используется при установке и базировании заготовки на станке;

2) режим *выхода в исходное состояние*. Большинство станков оснащены инкрементальными датчиками положения осей. Следовательно, после включения УЧПУ абсолютные координаты осей станка неизвестны. Режим выхода в исходное состояние позволяет осуществить поиск ноль-меток измерительных датчиков и определить положение осей станка в его системе координат;

3) режим *ввода и вывода информации по каналам связи*. Он используется при подготовке УП и связи с внешними устройствами и модулями УЧПУ;

4) режим *выполнения УП*. Этот режим соответствует функции цифрового управления, а также включает в себя контроль состояния оборудования и работы программного обеспечения. При сбоях в работе УЧПУ нужно связываться с оператором и сообщать об ошибке через интерфейс оператора. При выполнении этого задания одновременно выполняется несколько задач – интерпретация, интерполяция и др. Дискретно-логическое управление, основанное на логическом анализе поступающей с датчиков информации и соответствующей реакции на события, предусматривает

также адаптацию управления к возмущениям, возникающим во время работы.

Управляющие технологические программы. Изготовление продукции на станках с ЧПУ во многом основывается на проверенных практикой надежных типовых технологических решениях, применяющихся на универсальном оборудовании, обслуживаемом рабочим-станочником. Эти решения закладываются в основу технологических УП для станков с ЧПУ.

Основой для составления УП является информация о заготовке и детали, которая представляется на бумаге в виде чертежа или в САПР в виде геометрической модели. Основной задачей подготовки УП для УЧПУ является построение траектории движения расчетной точки инструмента относительно контура детали. Для расчета геометрических перемещений используются три системы координат.

Система координат станка в соответствии с рекомендациями ISO представляет собой правую прямоугольную декартову систему координат, связанную с конструктивными элементами станка. Оси системы координат станка параллельны поступательным перемещениям осей станка. Обозначение осей координат и направления движения устанавливаются так, чтобы программирование операций обработки не зависело от того, что перемещается – инструмент или заготовка.

Ориентация осей системы координат станка связывается с направлением движения при сверлении на сверлильных, расточных, фрезерных и токарных станках. Направление выхода сверла из заготовки принимается за положительное направление оси Z . Ось X перпендикулярна оси Z и параллельна плоскости установки заготовки. Если такому определению соответствуют две оси, то за ось X принимают ось с наибольшим перемещением. При известных осях X и Z однозначно определяется ось Y . Начало системы координат станка выбирается произвольно, но обычно совмещается с базовой точкой узла, несущего заготовку.

Система координат инструмента предназначена для задания положения режущих кромок относительно державки. Оси системы координат инструмента параллельны осям системы координат станка и направлены в ту же сторону, а начало располагается в базовой точке инструментального блока. При установке инструмента в станок его базовая точка, как правило, совмещается с базовой точкой узла станка, несущего инструмент. В УП задается траектория движения базовой точки инструмента. Таким образом, УП не зависит от геометрических параметров используемого инструмента, которые вводятся в УЧПУ независимо от УП. При выполнении программы УЧПУ рассчитывает траекторию движения режущей кромки инструмента, используя его параметры. Этот процесс называют *коррекцией на инструмент*.

Система координат детали служит для расчета координат опорных точек траектории инструмента. Опорными называют точки начала, конца, пересечения или касания геометрических элементов, из которых образова-

ны контуры детали и траектории инструмента. Система координат детали используется при подготовке УП. При выполнении УП система координат станка, как правило, совмещается с системой координат детали с учетом базирования заготовки в рабочем пространстве станка.

В качестве системы координат детали принимается правая прямоугольная система. При выборе начала системы координат детали и ориентации ее осей исходят из простоты расчетов опорных точек траектории.

Формат УП определяется рекомендациями ISO и национальными стандартами, например ГОСТ 20999–83, DIN 66025 и т. д. Язык большинства современных УЧПУ в той или иной степени отличается от стандарта.

Управляющая программа записывается в виде последовательности кадров, представляющих собой законченные по смыслу фразы на языке кодирования геометрической, технологической и вспомогательной информации. Отдельные последовательности кадров для обработки участков заготовки объединяются в главы, каждая из которых начинается с главного кадра. Главный кадр содержит информацию об условиях обработки, с него можно начинать или возобновлять работу станка по УП. Остальные кадры содержат только изменения относительно предыдущих кадров и называются дополнительными.

Кадры состоят из слов, а слова – из символов. Первый символ слова всегда является буквой, называемой адресом слова, а остальные символы образуют число со знаком, или целочисленный код. Кадр содержит последовательность слов, образующих информацию для одной рабочей операции. В УП используются только заглавные буквы латинского алфавита, цифры, а также некоторые служебные символы.

Программа начинается символом «%», за которым следует имя программы. Заканчивается программа символами M02 или M30 (конец программы). Комментарии заключаются в круглые скобки и размещаются после имени программы между кадрами. Каждый кадр программы должен содержать слово с адресом N (номер кадра или признак главного кадра), информационные слова и символ PS (признак конца кадра).

Словосочетание «Номер кадра» является вспомогательной информацией и служит идентификатором, меткой, кадром. Последовательная нумерация кадров рациональна, но допускаются любые изменения номеров, лимитируется только неповторяемость в пределах одной программы. В новых моделях УЧПУ словосочетание «Номер кадра» необязательно.

Подготовительные функции определяют режим работы УЧПУ. Эти слова задаются адресом O и двузначным (а в новых УЧПУ — трехзначным) десятичным числом. Подготовительные функции разделены на группы. В одном кадре можно задать только одну функцию из каждой группы.

Словосочетание «Размерные перемещения» предназначено для задания геометрической информации. Адресом его является обозначение оси станка, например X, Y, Z. Размерные перемещения означают координаты опорных точек траектории инструмента в системе координат детали (абсо-

лютные размеры, активна функция O90) или размеры в приращениях, которые записываются числами с «плавающей» точкой со знаком. Учитывая, что начальная точка каждого из участков траектории, кроме первого, является одновременно конечной точкой предыдущего участка, в кадрах задается информация только о конечных точках.

Словосочетание «Функция подачи» (адрес P) определяет контурную скорость движения инструмента по траектории. Скорость задается числом с «плавающей» точкой в миллиметрах в минуту, если активна функция 094, или **в у** миллиметрах на один оборот шпинделя, если активна 095.

Словосочетание «Скорость главного движения» записывается с адресом 8 и определяет линейную скорость точки приложения инструмента относительно заготовки в метрах в минуту, если активна функция G96 (постоянная скорость резания), или частоту вращения шпинделя в оборотах в минуту, если активна функция G97. Словосочетание «Функция инструмента» используется для указания инструмента и набора геометрических параметров инструмента – корректоров. В слове за адресом T записывается кодовое число с одной или двумя группами цифр. В первом случае слово задает только номер инструмента или его позицию в магазине инструментов, а корректор для этого инструмента определяется другим словом с адресом O. Во втором случае вторая группа цифр определяет номер корректора на длину, положение или радиус инструмента.

Вспомогательные функции определяют команды управления электроавтоматикой станка и задаются словами с адресом M и двузначным десятичным кодовым числом (M00...M99). Часть вспомогательных функций являются стандартными. Например, M3, M4 – включение вращения шпинделя по или против часовой стрелки соответственно; M7, M8 — включение подачи смазочно-охлаждающей жидкости № 1 или № 2 соответственно. Назначение функций, не установленных стандартом, определяется разработчиком конкретного станка.

Пример УП для движения инструмента по контуру, представленному на рис. 51:

```
%1  
N1 T1 81000 M3  
N2 O90 O0 X10 Y10  
N3 01 X30 Y30 P300  
N4 O2O17X50Y10 10 120  
N5 01 X10 Y10  
N6 X0 Y0  
N7 M30
```

Программа имеет имя 1. В кадре N1 устанавливаются инструмент № 1, частота вращения шпинделя 1000 мин^{-1} , и направление вращения – по часовой стрелке. Движения по траектории в этом кадре еще нет.

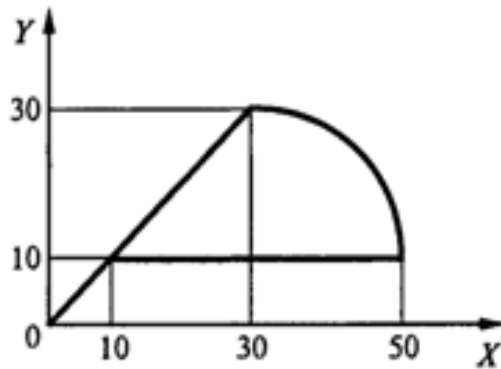


Рисунок 51 – Кривая перемещения инструмента

В кадре N2 устанавливается режим задания размерных перемещений относительно нуля системы координат детали (функция G90). Функция G0 задает режим быстрого позиционирования, т. е. перемещения на максимальной скорости в заданную точку. После выполнения этого кадра инструмент перемещается в точку с координатами 10, 10.

Кадр N3 задает движение по прямой линии (функция G1) в точку с координатами 30, 30 с контурной скоростью 300 мм/мин.

Кадр N4 задает движение по дуге окружности по часовой стрелке (функция G2) в плоскости XOY (функция G17). Конечная точка дуги имеет координаты 50, 10. Адресами I, J заданы координаты центра дуги относительно начальной точки дуги.

Кадр N5 снова переводит УЧПУ в режим линейной интерполяции и задает движение в точку с координатами 10, 10.

Кадр N6 задает движение в точку с координатами 0, 0 на быстром ходу.

Кадр N7 содержит вспомогательную функцию M30, обозначающую конец программы. После выполнения этого кадра УЧПУ возвращается в исходное состояние.

Описанные команды языка УП задают только элементарные действия по обработке заготовки. Использование только элементарных команд при программировании сложных деталей приводит к увеличению размера УП и возрастанию числа ошибок. Стремление уменьшить длину УП, сократить время ее разработки и число ошибок вызывает необходимость расширить язык программирования и вычислительные возможности УЧПУ. Этому способствует применение подпрограмм и стандартных циклов, являющихся своеобразными макроопределениями для обработки целых областей заготовки.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Металлорежущие станки и автоматы : учебник для машиностроительных вузов / под ред. А. С. Проникова. – М. : Машиностроение, 1981. – 479 с.

2 **Казачковський, М. М.** Комплектні електроприводи : навч. посібник / М. М. Казачковський. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 226 с. – ISBN 5-285-00250-7.

3 **Зимин, Е. Н.** Электрооборудование промышленных предприятий и установок : учебник для техникумов / Е. Н. Зимин, В. И. Преображенский, И. И. Чувашев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 552 с.

4 **Игнатов, В. А.** Электрооборудование современных металлорежущих станков и обрабатывающих комплексов / В. А. Игнатов, В. Б. Ровенский, Р. Т. Орлова. – М. : Высшая школа, 1999. – 96 с.

5 **Рябов, В.И.** Электрооборудование : учеб. для сред. спец. учеб. заведений / В. И. Рябов – 5-е изд., перераб. – М. : Экономика, 1990. – 175 с.

6 Автоматизация и привод: Каталог СА01. – Выпуск 10/2003. – ДП Сименс Украина.

7 Частотно-регулируемые приводы: Каталог. – Выпуск 02/2003. – ДП Сименс Украина.

Навчальне видання

**ШУЛЬГА Олексій Анатолійович
ПОЛУПАН Іван Іванович**

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Навчальний посібник

для студентів спеціальності
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривід»
денної форми навчання

(Російською мовою)

Редактор О. О. Дудченко

Комп'ютерна верстка О. С. Орда

138/2010 Підп. до друку . Формат 60 x 84/16.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. . Обл.-вид. арк. .
Тираж прим. Зам. №

Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру
серія ДК №1633 від 24.12.03.