

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.В. Корзин

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Электронное учебное пособие



Волжский
2019

УДК 621.3(07)
ББК 31.291я73
К 666

Рецензенты:

доктор тех. наук, профессор кафедры прикладной математики,
информатики и естественных наук Волжского филиала
ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»
Мирецкий И.Ю.,

канд. тех. наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных про-
цессов» филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет
(МЭИ)» в г. Волжском
Капля Е.В.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Корзин, В.В.

Автоматизированный электропривод технологического оборудова-
ния [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.В. Корзин ; ВПИ (фили-
ал) ВолгГТУ, – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 4,85 Мб). – Волжский,
2019. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9948-3346-9

Учебное пособие содержит сведения об особенностях автоматизированного электропривода технологического оборудования.

Рассмотрены особенности различного технологического оборудования, функции управления электроприводом, вычислительные средства управления электроприводами агрегатов, алгоритмы управления электроприводом. Приведены сведения об автоматизированных электроприводах нагнетателей, дробильно-размольных механизмов, смесителей, центрифуг и металлообрабатывающих станков.

Учебное пособие предназначено для студентов магистратуры дневной и заочной форм обучения направления 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Ил. 37, табл. 4, библиограф. 8 назв.

ISBN 978-5-9948-3346-9

© Волгоградский государственный
технический университет, 2019
© Волжский политехнический
институт, 2019
© Корзин В.В.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1. Классификация технологического оборудования.....	8
2. Функции управления электроприводом.....	9
3. Координированное управление исполнительными механизмами в составе технологического агрегата.....	11
4. Вычислительные средства управления электроприводами агрегатов.....	13
4.1. Состав вычислительных средств управления электроприводами агрегатов.....	13
4.2. Функции вычислительных средств управления электроприводами агрегатов.....	14
4.3. Технологические контроллеры для управления электроприводами агрегатов.....	15
4.4. Промышленные компьютеры для управления электроприводами агрегатов.....	16
5. Алгоритмы управления электроприводом.....	19
5.1. Управление электроприводом по времени.....	19
5.2. Управление электроприводом по состоянию объекта.....	20
5.3. Жёсткое последовательное управление электроприводом по состоянию.....	21
5.4. Алгоритм гибкого управления по состоянию объекта.....	21
6. Автоматизированный электропривод нагнетателей.....	23
6.1. Общие сведения о нагнетателях.....	23
6.2. Особенности насосов.....	23
6.3. Особенности вентиляторов.....	24
6.4. Особенности компрессоров.....	25
6.5. Характеристика сети нагнетания.....	26

6.6. Характеристики насосов, вентиляторов, компрессоров.....	27
6.7. Расчёт мощности центробежных нагнетателей.....	30
6.8. Расчёт мощности электродвигателя поршневого механизма.....	32
6.9. Особенности применения нерегулируемого электропривода для нагнетателей.....	35
6.10. Причины применения регулируемого электропривода для нагнетателей.....	35
6.11. Ступенчатое регулирование нагнетателей и регулирование с помощью двигателей постоянного тока.....	36
6.12. Причины применения частотно-управляемого электропривода для нагнетателей.....	36
6.13. Применение для регулирования нагнетателей асинхронных каскадов и вентильных приводов.....	37
6.14. Классификация регулирующих устройств нагнетателей.....	37
6.15. Регулирование нагнетателей дросселированием.....	38
6.16. Регулирование одного нагнетателя изменением частоты вращения...	41
6.17. Регулирование нескольких нагнетателей изменением частоты вращения.....	43
6.18. Причины совместной работы нагнетателей.....	44
6.19. Параллельное включение нагнетателей.....	45
6.20. Суммарная характеристика нагнетателей при параллельном включении.....	47
6.21. Последовательное включение нагнетателей.....	49
6.22. Система управления насосом с преобразователем частоты.....	50
6.23. Система управления насосом с использованием нечёткой логики.....	52
7. Автоматизированный электропривод дробильно-размольных механизмов.....	56
7.1. Особенности дробильно-размольных механизмов.....	56
7.2. Управление дробильным и мельничным оборудованием.....	58

8. Автоматизированный электропривод смесителей.....	64
8.1. Особенности смесителей.....	64
8.2. Управление смесителями.....	65
9. Автоматизированный электропривод центрифуг.....	68
9.1. Особенности центрифуг и сепараторов.....	68
9.2. Управление центрифугами и сепараторами.....	68
10. Автоматизированный электропривод металлообрабатывающих станков.....	70
10.1. Особенности токарной обработки металла.....	70
10.2. Особенности скоростного точения.....	75
10.3. Особенности фрезерования.....	76
10.4. Особенности сверления.....	79
10.5. Особенности строгания.....	82
10.6. Особенности круглого шлифования.....	84
10.7. Особенности плоского шлифования.....	87
10.8. Определение мощности электроприводов для типовых механизмов станка.....	92
10.9. Построение нагрузочной диаграммы и определение мощности электропривода токарного станка.....	96
10.10. Расчёт мощности электродвигателя методом средних потерь.....	100
10.11. Особенности работы электродвигателей с перегрузкой.....	102
10.12. Определение мощности электропривода механизма подачи.....	103
10.13. Определение мощности привода типовых вспомогательных механизмов станков.....	107
10.14. Методика расчёта мощности электропривода для зажима колонны радиально-сверлильного станка.....	108
10.15. Выбор конструкции и типа двигателей для станков.....	112
Литература.....	116

ВВЕДЕНИЕ

Анализ мирового опыта создания и модернизации технологического оборудования показывает высокую динамику развития систем управления этим оборудованием, в частности систем автоматизированного электропривода. Можно выделить общие тенденции развития электроприводов, такие как:

- постоянно расширяющееся применение регулируемых электроприводов в технологическом оборудовании, на транспорте, в медицине и бытовой технике;
- замена нерегулируемых электроприводов на регулируемые в энергоёмком оборудовании (насосы, вентиляторы, компрессоры и др.) с целью энергосбережения;
- распространение блочно-модульных принципов построения электроприводов и систем управления в целом;
- динамичная компьютеризация электроприводов;
- дальнейшее развитие методов каскадного (подчинённого) управления, широко распространённых в электроприводах;
- активное развитие и внедрение систем диагностирования, обслуживания и визуализации состояния технологических процессов, оборудования и систем управления.

В настоящее время автоматизация технологических объектов сопровождается применением большого количества электромеханических систем, обеспечивающих решение задач эффективности проведения технологических процессов и повышения качества продукции. Во многих случаях автоматизированные системы управления электроприводами являются взаимосвязанными системами, поскольку для управления технологическим оборудованием могут использоваться десятки электроприводов, объединённых по цепям питания и управления. Необходимо учитывать взаимосвязь выходных переменных электромеханических систем при формировании технологических пока-

зателей обрабатываемых изделий, характеризующих их качество. Эта взаимосвязь осуществляется через систему функциональных устройств технологического объекта. Развязка (декомпозиция) систем может эффективно выполняться как средствами и алгоритмами управления, так и использованием параметров и свойств электрических, механических и функциональных компонентов автоматизированных технологических комплексов.

Современные компьютеризированные электроприводы оснащаются большими библиотеками программных средств, позволяющими решать различные функциональные задачи управления технологическим оборудованием самого разного назначения. Эти средства распространяются на нижний (управление локальным оборудованием) и средний (координированное управление оборудованием) уровни управления и ориентированы на связь с верхним (административным) уровнем.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Всё многообразие технологического оборудования можно разделить на следующие группы:

1. Оборудование, предназначенное для физической и химической переработки вещества и содержащее энергоёмкие однодвигательные электроприводы с продолжительным режимом работы (насосы, компрессоры, вентиляторы, мельницы, смесители, центрифуги и т.д.).
2. Металлообрабатывающие, деревообрабатывающие и камнеобрабатывающие станки.
3. Кузнечное, прессовое, штамповочное и обжимное оборудование.
4. Резательное оборудование (гильотинные, барабанные и летучие ножницы, дисковые и ленточные пилы, резательные станки и т.д.).
5. Горнодобывающее оборудование (роторные и ковшовые экскаваторы, угледобывающие машины, буровое оборудование и т.д.).
6. Оборудование, предназначенное для транспортирования и обработки гибких материалов.
7. Промышленные манипуляторы и роботы.
8. Транспортное и подъёмно-транспортное оборудование (подъёмные краны, транспортёры, конвейеры, рольганги, монорельсы, лифты, электротранспорт и т.д.).
9. Контрольно-испытательное оборудование (измерительные машины, испытательные стенды, имитаторы и т.д.).
10. Мониторинговое оборудование (телевизионные системы наблюдения за технологическим процессом, телескопы, радиотелескопы и т.д.).

2. ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Существуют следующие типовые функции управления электроприводом, представленные на рис. 1.

- 1) Управление скоростью вращения электродвигателя (рис.1, а).
- 2) Управление соотношением (синхронизацией) двух (и более) скоростей (рис.1, б).
- 3) Управление положением рабочего органа электропривода (рис.1, в).
- 4) Управление соотношением положений рабочих органов (рис.1, г).
- 5) Управление моментом электродвигателя (рис.1, д).
- 6) Управление соотношением моментов нескольких электродвигателей (рис.1, е).
- 7) Одновременное управление скоростью и положением (рис.1, ж).
- 8) Одновременное управление соотношением скоростей и соотношением положений (рис.1, з).
- 9) Управление натяжением ленточного материала (рис.1, и).

На рис.1 использованы следующие обозначения:

М – электродвигатель

ДС – датчик скорости;

ДП – датчик положения;

ДМ – датчик момента;

ДН – датчик натяжения;

РС – регулятор скорости;

РСС – регулятор соотношения (синхронизации) скоростей;

РП – регулятор положения;

РСП – регулятор соотношения положений;

РМ – регулятор момента;

РСМ – регулятор соотношения моментов;

РН – регулятор натяжения.

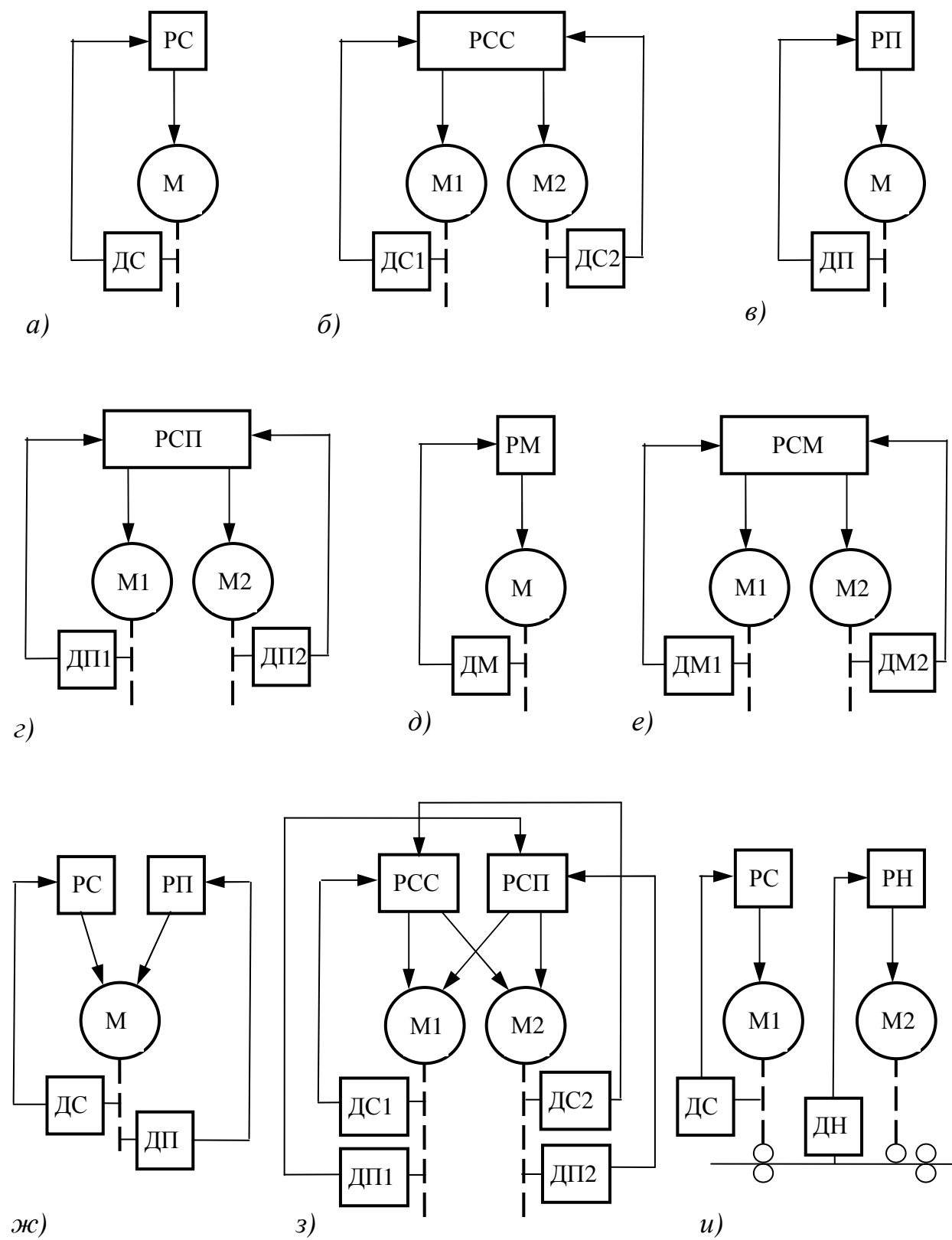


Рис. 2.1. Функции управления электроприводом

3. КООРДИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ В СОСТАВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АГРЕГАТА

Для координированного управления исполнительными механизмами применяются различные алгоритмы управления:

- управление по времени;
- управление по состоянию объекта;
- управление по готовности;
- управление по определённой последовательности работы;
- управление по шаблону.

Управление по времени

В этом случае на выполнение технологического процесса отводится определённый промежуток времени, устанавливаемый и распределяемый между отдельными участками процесса в соответствии с предварительным расчётом. При этом формируется временная диаграмма работы механизма в составе агрегата. Временная диаграмма в виде таблицы граничных значений заносится в управляющую программу технологического контроллера, который в заданное время выдаёт управляющие воздействия на изменение режима работы соответствующего электропривода. Время работы электропривода фиксируется таймером или счётчиком.

Управление по состоянию объекта

В этом случае движение исполнительных механизмов осуществляется в зависимости от выходных координат электроприводов.

Примером может служить система поддержания заданной подачи на оборот шпинделя в токарных, сверлильных фрезерных станках. Такие технологические агрегаты содержат электроприводы главного движения и электроприводы подачи.

Управляющие воздействия для электроприводов формируются по определённым законам управления, зависящим от режима их работы.

Системы управления электроприводами манипулятора обеспечивают движение исполнительного органа (ИО) – схвата – по заданной пространственной траектории посредством управления движением отдельных звеньев манипулятора. Каждое звено оснащается электроприводом и датчиками для контроля перемещений.

Управление по готовности

Управляющие воздействия на включение, отключение электропривода или на изменение режима его работы могут подаваться в моменты достижения технологической готовности.

Технологическая готовность определяется, например, перемещением исполнительного органа в заданное положение или достижением заданного значения технологического параметра (давления, уровня, массы, состава смеси веществ и т.д.) благодаря действию исполнительного органа.

Технологическая готовность контролируется при помощи датчиков. Например, в системе управления лифтом вначале работает электропривод лебёдки, а после срабатывания датчика этажности, управление передаётся на привод открытия дверей лифта.

Управление по определённой последовательности работы

Электроприводы технологических агрегатов также могут включаться и отключаться в определённой последовательности, выполняя на каждом участке технологического процесса движение исполнительных органов машин с требуемыми скоростями в нужном направлении.

Управление по шаблону

В некоторых технологических агрегатах используются системы управления по шаблону (копировальные системы). Программа перемещения исполнительного органа машины задаётся при помощи копиров (плоских шаблонов), очертания которых точно соответствуют требуемым траекториям движения исполнительного органа. Исполнительный орган перемещается по двум взаимно-перпендикулярным направлениям с помощью следящего элек-

тропривода с двумя двигателями (по одному на каждое направление). На вход системы управления следящего привода подаётся сигнал, пропорциональный отклонению щупа от контура шаблона (сигнал ошибки). Один двигатель при этом создаёт движение щупа и исполнительного органа вдоль контура шаблона, а второй двигатель обрабатывает сигнал ошибки.

4. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ АГРЕГАТОВ

4.1. Состав вычислительных средств управления электроприводами агрегатов

В состав современных систем автоматизации технологического оборудования входят вычислительные устройства, к которым относятся:

- промышленные компьютеры;
- технологические контроллеры;
- однокристальные микроконтроллеры;
- встраиваемые одноплатные компьютеры.

Схемы построения систем автоматизации могут быть с централизованным и с децентрализованным (распределёнными) управлением.

В системах с централизованным управлением управление всеми технологическими агрегатами осуществляется от одного вычислительного устройства. Процессор обслуживает отдельные каналы управления по очереди. Очередность обслуживания может задаваться жёсткой программой или выполняться по мере поступления заявок от отдельных каналов с возможностью использования приоритетного обслуживания. Центральное вычислительное устройство выполняет функции диспетчера (супервизора), координирующего работу системы управления.

В системах с децентрализованным управлением каждый электропривод комплектуется своим вычислительным устройством.

В состав программного обеспечения вычислительных устройств входят следующие компоненты:

- программа диспетчера;
- программа обслуживания пульта оператора;
- диагностическая программа.

4.2. Функции вычислительных средств управления электроприводами агрегатов

Вычислительные средства в системе управления технологическим агрегатом выполняют информационные и управляющие функции.

К *информационным функциям* вычислительных средств относятся:

- сбор и хранение информации о состоянии процесса и о состоянии устройств системы управления;
- непрерывный контроль за соответствием параметров процесса допустимым значениям;
- периодическая регистрация значений контролируемых параметров (архивирование и печать данных);
- выдача информации оператору о несоответствии параметров допустимым значениям;
- сигнализация о приближении процесса и системы к аварийному состоянию;
- блокировка включения и отключения технологических устройств;
- диагностика состояния системы управления;
- оперативная связь с вычислительными средствами других уровней.

Управляющими функциями вычислительной системы являются:

- пуск и останов технологического агрегата или отдельных электроприводов;
- формирование управляющих воздействий, обеспечивающих ведение заданного режима;

- выполнение расчётов для определения параметров объекта (решение задач параметрической идентификации);
- автоматическая оптимизация процесса в соответствии с принятым критерием качества.

4.3. Технологические контроллеры для управления электроприводами агрегатов

Применение контроллеров предполагает выбор их типа и конфигурации, а также разработку управляющих программ, реализующих требуемые функции управления. При этом должны обеспечиваться как требования для непосредственного управления объектом, так и требования, позволяющие всем средствам управления работать в едином управляющем комплексе, обеспечивающем также и отображение состояния объекта в реальном времени для оператора-технолога.

Программируемые контроллеры имеют большой набор функциональных модулей, сетевые средства, средства отображения информации о ходе технологического процесса, средства программирования и дистанционного управления (переносные пульты).

Модули ввода и вывода аналоговой и дискретной информации содержат узлы гальванического разделения сигналов, узел мультиплексирования аналоговых входных сигналов, а также аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), дискретно-цифровой преобразователь (ДЦП) и цифро-дискретный преобразователь (ЦДП).

Для контроля исправности электрических цепей подключения датчиков и исполнительных устройств и для контроля работоспособности самого технологического контроллера он имеет светодиодную индикацию состояний входов и выходов, индикацию режимов контроллера и его отдельных модулей. Также для контроля исправности в составе периферийных устройств технологического контроллера имеются ручные отладочные пульты и консо-

ли, с которых можно осуществлять полный контроль за состоянием контроллера и за значениями всех обрабатываемых данных.

При управлении технологическими агрегатами обычно применяются контроллеры с небольшим количеством интеллектуальных модулей. В некоторых случаях (для управления насосами, компрессорами, небольшими прессами, эскалаторами, дверями, воротами и т.д.) применяются логические модули (например, LOGO фирмы «Siemens»). В состав логического модуля входят:

- встроенная клавиатура;
- дисплей;
- часы;
- цифровые входы и выходы и релейные выходы.

Логические модули реализуют основные логические функции (И, ИЛИ, НЕ) и специальные функции:

- задержка включения;
- задержка выключения;
- задержка включения с запоминанием;
- импульсное реле;
- реле с самоудержанием;
- триггер;
- тактовый генератор;
- аналоговый компаратор.

Программирование логических модулей осуществляется нажатием кнопок, расположенных на передней панели.

4.4. Промышленные компьютеры для управления электроприводами агрегатов

Для управления электроприводами технологических агрегатов применяются промышленные компьютеры, которые могут быть одноплатными

встраиваемыми либо собранными из нескольких плат и интеллектуальных модулей в одном большом корпусе. Корпусные компьютеры могут находиться как в шкафу с электрооборудованием, так и на некотором расстоянии от него.

В настоящее время промышленные контроллеры имеют такую же архитектуру, что и персональные: поддерживают шины ISA и PCI. Основой компьютера является материнская плата с процессором, имеется динамическое ОЗУ, накопитель на жёстком диске HDD, встроенная флэш-память и несколько последовательных и параллельных портов. Компьютеры функционируют под управлением операционных систем реального времени, в частности, Windows.

В состав промышленных компьютеров входят:

- цифровые и аналоговые модули ввода и вывода;
- коммуникационные платы, (контроллер локальной сети Ethernet, высокоскоростной модем, платы последовательного и параллельного интерфейсов):
- платы расширения (многофункциональный счётчик-таймер; видеоплата SVGA; контроллер жёсткого диска и т.д.);
- комплектующие (плата ввода и вывода высоких напряжений; аналоговый мультиплексор; преобразователи интерфейса RS-232 и RS-485, клеммная плата для оптической развязки и т.д.)

Для гибкости и эффективности монтажа промышленных контроллеров существует широкий диапазон корпусов (монтажных каркасов) и блоков питания. Монтажные каркасы рассчитаны на различное количество слотов разных типов шин с различной разрядностью (8,16,32, 64). Блоки питания выполняются на разные мощности и на разные выходные напряжения.

Кроме вычислительных средств, в системах управления ряда технологических агрегатов применяются устройства сопряжения с объектом (УСО),

которые предназначены для согласования информационных сигналов, поступающих от объекта и системы управления по уровню и форме.

В системах управления применяются промышленные компьютеры фирм: «Advantech» (IPC-602P3-26P, IPC-602DP4-B, PCM-5864/BARE, MIC-3376-A, MIC-3376S-A, PPC-150T, IPPC-920T, IPPC-950T); «Octagon» (серия одноплатных компьютеров Micro PC, контроллер MIL-STD-1553B); «Dataforth» (DCP485-P, LDM485-P, LDM80-P, LDM85-S); «Ampro», «PEP».

В металлорежущих станках широко применяются устройства числового программного управления (ЧПУ). Современные системы ЧПУ имеют в своей структуре микроЭВМ. По виду рабочих движений станка системы ЧПУ могут быть позиционными, контурными и комбинированными.

Для построения систем человеко-машинного интерфейса, решения задач оперативного управления и отображения информации, поступающей от контроллера или компьютера, могут использоваться программируемые терминалы или сенсорные панели. Отображаемая информация формируется в виде экранов и выводится на жидкокристаллический дисплей терминала. Количество отображаемых экранов определяется ёмкостью блока памяти, установленного в терминал.

Для создания прикладных программ для контроллеров используется стандарт ИЕС-1131 для систем автоматизации технологических процессов Международной электротехнической комиссии (МЭК). Стандарт специфицирует 5 языков программирования:

- язык последовательных функциональных блоков (Sequential Function Chart (SFC));
- язык функциональных блоковых диаграмм (Function Block Diagram (FBD));
- язык релейных диаграмм (Ladder Diagrams (LD));
- язык структурированного текста (Structured Text (ST));
- язык инструкций (Instruction List (IL)).

5. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

5.1. Управление электроприводом по времени

Автоматическое управление в функции времени является одним из наиболее распространённых способов управления в дискретной автоматике.

Алгоритм такого управления можно представить в виде двух частей:

- алгоритма формирования последовательности интервалов времени;
- алгоритма управления исполнительными устройствами в соответствии с интервалами времени.

Формирование последовательности интервалов времени выполняется с использованием устройств создания выдержек времени (реле времени или таймеров) или счётчика последовательности импульсов заданной длительности.

При программировании контроллеров удобнее использовать таймеры, так как возможно использование большого количества программных таймеров, а также их применение удобнее при отладке системы управления и коррекции значений интервалов времени.

Последовательность задания интервалов времени таймерами, которые составляют генератор интервалов времени (ГИВ). Программная реализация генератора интервалов времени представлена на рис. 5.1.

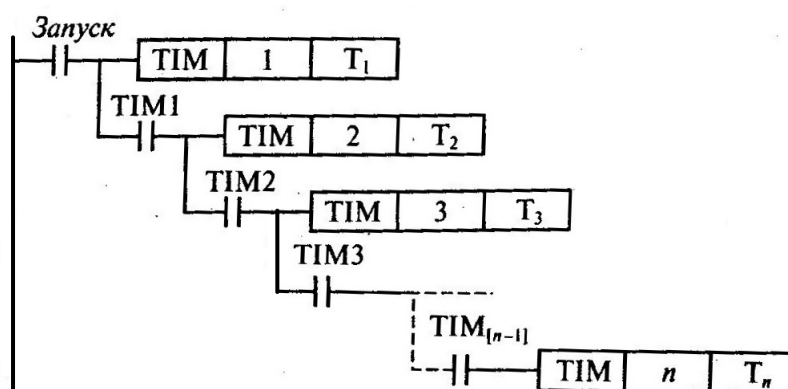


Рис. 5.1 Генератор интервалов времени

В рассматриваемой программе используются таймеры с задержкой на включение. Управляющий бит «Запуск», в общем случае, может представлять собой достаточно сложную логическую функцию, зависящую от разных сигналов управления, в том числе и от флагов таймеров, составляющих генератор интервалов времени.

При установке бита «Запуск» в единичное состояние (ON) таймеры последовательно формируют интервалы времени, а при установке бита «Запуск» в нулевое состояние (OFF) все таймеры сбрасываются в течение одного цикла сканирования программы. Бит «Запуск» имеет нулевой интервал времени от начала запуска генератора интервалов времени.

Управляющие сигналы на исполнительные устройства формируются в функции состояния бита «Запуск» и флагов таймеров генератора интервалов времени. Например, в программе, приведённой на рис. 5.2, бит ИО (исполнительный орган) включается при установке бита «Запуск» в состояние ON и выключается после отработки таймера TIM2, а также включается после отработки таймера TIM_i и выключается после отработки таймера TIM_j.

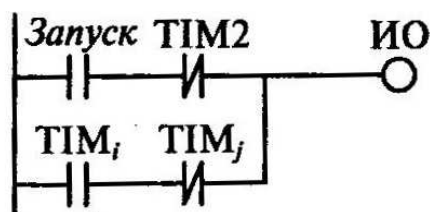


Рис. 5.2. Подача управляющего сигнала на исполнительное устройство

5.2. Управление электроприводом по состоянию объекта

При управлении объектом по его состоянию необходимо иметь информацию об этом состоянии. Поэтому при разработке таких систем необходимо выбирать датчики. Количество датчиков и объём предоставляемой ими информации должны быть достаточными для получения полных сведений о состоянии объекта в каждый момент времени.

При управлении по состоянию объекта информация от датчиков позволяет контролировать окончание действия или переход объекта в новое состояние. Каждое новое действие начинается после того, как выполняются необходимые для этого условия (например, после окончания предыдущего действия).

5.3. Жёсткое последовательное управление электроприводом по состоянию

Одним из распространённых способов управления в дискретной автоматике является автоматическое управление по состоянию объекта при жёсткой последовательности операций. Последовательность операций может выполняться однократно или повторяться многократно в повторяющихся циклах.

Алгоритм такого управления можно представить в виде двух частей:

- алгоритм формирования последовательности действий (тактов) управления, то есть отдельных операций, выполняемых в объекте управления);
- алгоритм управления исполнительными устройствами в соответствии с тактом управления.

Последовательность тактов формируется с применением датчиков состояния объекта, которые информируют систему управления об окончании текущей операции. Факт окончания предыдущей операции является необходимым условием начала следующей.

5.4. Алгоритм гибкого управления по состоянию объекта

Для систем дискретного автоматического управления объектами с конечным количеством состояний, у которых алгоритм перехода из одного состояния в другое определяется значениями параметров объекта и не имеет

жёсткой последовательности, могут применяться алгоритмы цифровых автоматов, например, цифрового автомата Мура.

Блок-схема автомата Мура приведена на рис. 5.3.

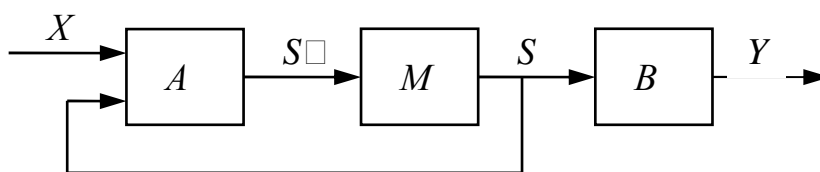


Рис. 5.3. Блок-схема автомата Мура

На рис. 5.3 приведены следующие обозначения:

- X – вектор входа;
- A – функция перехода;
- $S\square$ – вектор нового состояния;
- M – память;
- S – вектор текущего состояния;
- B – функция выхода;
- Y – вектор выхода.

Вектор входа X соответствует совокупности состояния текущих параметров объекта управления, влияния на объект возмущающих воздействий, а также внешних сигналов управления.

Вектор выхода Y определяет совокупность сигналов управления, поступающих на исполнительные устройства.

Векторы текущего S и нового $S\square$ состояний характеризуют режимы работы объекта и его отдельных частей.

6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НАГНЕТАТЕЛЕЙ

6.1. Общие сведения о нагнетателях

Нагнетателем называется машина, в которой происходит преобразование механической работы в механическую энергию жидкости или газа.

К нагнетателям относятся насосы и воздуходувные машины. Воздуходувные машины предназначены для повышения давления и подачи воздуха или другого газа. В зависимости от степени сжатия воздуха воздуходувные машины подразделяются на вентиляторы и компрессоры. Мощности электродвигателей этих механизмов составляют от нескольких ватт до десятков тысяч киловатт.

По принципу действия нагнетатели разделяются на объёмные и динамические.

Объёмные нагнетатели работают по принципу вытеснения, то есть когда давление перемещаемой среды повышается в результате сжатия, к ним относятся возвратно-поступательные насосы (поршневые и диафрагменные), а также роторные насосы (аксиально-поршневые, радиально-поршневые, шиберные, зубчатые, винтовые).

Динамические нагнетатели работают по принципу силового воздействия на перемещаемую среду. К этой группе относятся лопастные нагнетатели (центробежные, осевые, радиальные) и нагнетатели трения (вихревые, струйные, дисковые).

6.2. Особенности насосов

Насос – это устройство, предназначенное для напорного перемещения жидкости (всасывания, нагнетания) в результате сообщения ей энергии. Насос преобразует механическую энергию двигателя в энергию перемещаемой жидкости, повышая её давление.

Насосы классифицируются по назначению на следующие группы:

- насосы промышленного и коммунального водоснабжения;
- погружные насосы для подачи воды или нефти из скважин;
- циркуляционные насосы;
- питательные насосы;
- для транспортировки нефти и других продуктов.

Насосы работают в режиме длительной нагрузки, наработывая за год большое количество часов. Нагрузка на валу приводного двигателя насоса нормальная, перегрузок не возникает.

Наиболее совершенным способом регулирования подачи насосов является изменение частоты вращения их двигателей. Диапазон регулирования частоты обычно небольшой, широкое регулирование требуется лишь в отдельных случаях.

6.3. Особенности вентиляторов

Вентилятор – воздуходувная машина, предназначенная для подачи воздуха или другого газа под давлением до 15 кПа при организации воздухообмена.

Вентиляторы разделяются на центробежные и осевые. Характеристики центробежных вентиляторов аналогичны характеристикам центробежных насосов.

Мощные вентиляторы имеют большой момент инерции, что затрудняет их пуск. В некоторых случаях для быстрой остановки рабочего колеса в вентиляторах используется электрическое торможение.

Вентиляторы, в отличие от других нагнетателей, всегда работают на сеть без противодействия, поэтому зависимость момента статического сопротивления на валу приводного двигателя от частоты вращения – квадратична, а подводимая к вентилятору мощность (без учёта потерь на трение в подшипниках) пропорциональна скорости в третьей степени.

Воздуходувки работают в режиме длительной нагрузки, поэтому их электроприводы должны быть рассчитаны на длительную работу с большой наработкой часов за год.

6.4. Особенности компрессоров

Компрессором называется воздуходувная машина, предназначенная для сжатия и подачи воздуха или другого газа под давлением не ниже 0,2 МПа. Компрессоры являются наиболее мощными нагнетателями. Компрессоры могут иметь мощность до 18 000 кВт.

По принципу действия компрессоры бывают поршневыми, центробежными и ротационными. Поршневые компрессоры чаще всего работают на низких скоростях, а центробежные и ротационные – на средних и высоких скоростях. Особенностью поршневых компрессоров является наличие в их кинематической схеме кривошипно-шатунного механизма.

Характеристики центробежных компрессоров отличаются от характеристик других центробежных машин тем, что при изменении частоты вращения изменяется наклон характеристик. Это связано с тем, что при более высоких частотах вращения увеличиваются степень сжатия газа и его плотность.

Области применения компрессоров:

- генерирование пневматической энергии (энергетические компрессоры);
- транспортировка газа по магистральным трубопроводам;
- компрессирование воздуха для получения кислорода методом разделения;
- подача воздуха и кислорода в доменную печь;
- холодильная техника.

Все компрессоры являются быстроходными. Частота вращения рабочего колеса составляет от 3000 до 20 000 об/мин, поэтому для компрессоров

применяются быстроходные электродвигатели с номинальной частотой вращения не менее 3000 об/мин. В тех случаях, когда требуется бо́льшая частота вращения колеса, между электродвигателем и компрессором устанавливается повышающий редуктор или применяется высокооборотный электродвигатель.

Компрессоры также работают в режиме длительной нагрузки, поэтому их электроприводы тоже должны быть рассчитаны на длительную работу с большой наработкой часов за год.

Все компрессоры работают на сеть с сопротивлением, поэтому момент сопротивления на валу существенно зависит от частоты вращения электродвигателя.

Пуск компрессоров обычно производится при разгруженной машине соединением полости нагнетания с атмосферой или с полостью всасывания, поэтому максимальный момент при пуске не превышает 0,4 номинального момента.

6.5. Характеристика сети нагнетания

При работе насосов, вентиляторов и компрессоров на сеть зависимость статического момента сопротивления от частоты вращения $M_c = f(n)$ соответствует виду характеристики гидро- или пневмосети, на которую работает нагнетатель.

Сетью называется система трубопроводов и отдельных агрегатов, присоединённых к нагнетателю. Каждая сеть характеризуется потерями давления, которые подразделяются на внутренние и внешние. Внутренними потерями являются потери на трение и потери в местных сопротивлениях. Внешними являются потери в выходном сечении сети.

Суммарные потери в сети $\sum \Delta p_c$ складываются из местных потерь и потерь по длине во всех её элементах:

- для вентиляционной сети

$$\sum \Delta p_c = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{1}{s_i^2} + \sum_{j=1}^m \frac{\xi_j}{s_i^2} \right) \rho L^2 = k L^2, \quad (6.1)$$

- для насосной установки

$$\sum \Delta p_c = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{1}{2gs_i^2} + \sum_{j=1}^m \frac{\xi_j}{2gs_i^2} \right) Q^2, \quad (6.2)$$

где λ_i – коэффициент сопротивления по i -той длине участка сети;

l_i – длина i -того участка сети;

d_i – диаметр i -того трубопровода;

ρ – плотность среды;

ξ_j – j -тый коэффициент местного сопротивления;

s_i – i -тое живое сечение потока;

k – коэффициент, являющийся константой для рассматриваемой сети;

L – количество воздуха, проходящего в сети;

g – ускорение свободного падения;

Q – подача насоса.

Уравнения (6.1) и (6.2) называются характеристическими уравнениями (характеристиками) сетей.

Характеристика сети при наличии противодействия $H_{ст}$ определяется выражением $H = H_{ст} + RQ^2$ (кривая 6 на рис. 6.1).

В случае идеальной магистрали, то есть при отсутствии противодействия, это уравнение будет иметь вид $H = RQ^2$ при различных сопротивлениях сети (кривые 5, 5□, 5□□ на рис. 6.1).

6.6. Характеристики насосов, вентиляторов, компрессоров

На рис. 6.1 приведены характеристики нагнетателя (насоса) при различных значениях частоты вращения (кривые 1, 2, 3, 4).

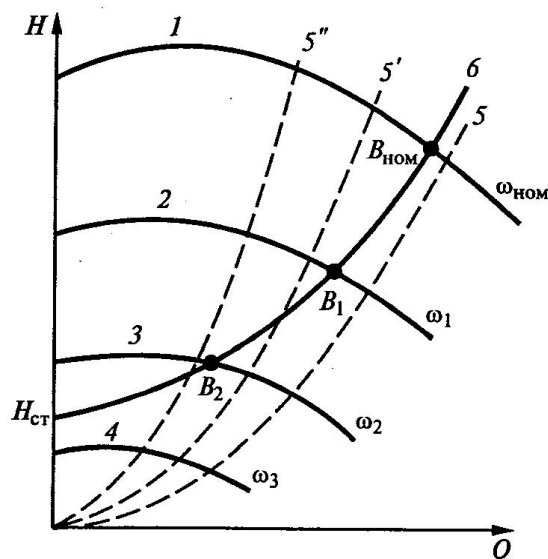


Рис. 6.1. Характеристики сети нагнетания и насоса

Основными характеристиками насосов, вентиляторов и компрессоров являются:

- подача нагнетателя при работе на сеть без статической составляющей напора, пропорциональная частоте вращения нагнетателя:

$$\frac{Q_1}{Q_i} = \frac{\omega_1}{\omega_i} \quad (6.3)$$

или

$$Q = k_Q \omega; \quad (6.4)$$

- напор, развиваемый нагнетателем, пропорциональный квадрату частоты вращения:

$$\frac{H_1}{H_i} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_i} \right)^2 \quad (6.5)$$

или

$$H = k_H \omega^2; \quad (6.6)$$

- полезная мощность, развиваемая нагнетателем и пропорциональная кубу частоты вращения:

$$\frac{N_{п1}}{N_{пи}} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_i} \right)^3 \quad (6.7)$$

или

$$N_{п} = k_p \omega^3; \quad (6.8)$$

- характеристики пропорциональности:

$$H_i = \frac{H_1}{Q_1^2} Q_i^2 \quad (6.9)$$

или

$$H_i = R Q_i^2, \quad (6.10)$$

где H_i и Q_i – напор и подача для данной сети при номинальной частоте вращения нагнетателя;

R – сопротивление сети.

Формулы приведения (6.3), (6.5), (6.7), (6.9) действительны только для случая, когда нагнетатель работает на сеть, не имеющую статической составляющей напора.

Характеристики пропорциональности совпадают с характеристиками сети, и они являются также кривыми равными КПД, поэтому используются для определения КПД и мощности на валу нагнетателя при его работе с частотой вращения отличной от номинальной. Этот метод определения КПД нагнетателя можно использовать во всех случаях, независимо от вида характеристики сети, так как КПД механизма определяется только соотношением $H = f(Q)$ и частотой вращения.

Рабочие точки $B_{ном}$, B_1 , B_2 находятся как точки пересечения характеристики сети с характеристиками механизма, соответствующими различным частотам вращения. Рабочая область регулирования частоты вращения нагнетателя находится в диапазоне от ω_3 до $\omega_{ном}$. Подача Q с уменьшением частоты вращения снижается более интенсивно. В этом случае КПД нагнета-

теля не остаётся постоянным, а снижается по мере уменьшения частоты вращения.

Приближённая аналитическая зависимость момента сопротивления на валу нагнетателя от частоты вращения, соответствующая физическим принципам его работы, получается с использованием характеристик нагнетателя $H = f(Q)$.

6.7. Расчёт мощности центробежных нагнетателей

Полезную мощность потока жидкости или воздуха, выходящего из центробежного насоса или вентилятора, можно определить, используя понятия напор H насоса и давление p вентилятора.

Если каждой единице веса капельной жидкости сообщается энергия напора H , то при весовой подаче насоса, равной γQ , жидкость выходит из насоса, обладая полезной мощностью

$$N_{\pi} = \gamma Q H. \quad (6.11)$$

Аналогично, если каждой единице объёма воздуха, прошедшего через вентилятор, сообщается давление Δp , то воздух выходит из вентилятора, обладая полезной мощностью

$$N_{\pi} = \Delta p L, \quad (6.12)$$

где L – подача вентилятора.

В любой насосной или вентиляционной установке мощность в различных её узлах неодинакова. Нагнетатель приводится в действие электродвигателем, который потребляет электрическую мощность $N_{\text{э}}$, преобразуя её в механическую мощность на валу $N_{\text{в}}$. Мощность на валу меньше, чем электрическая мощность, так как часть мощности теряется при работе электродвигателя. Потери мощности в электродвигателе учитываются коэффициентом полезного действия электродвигателя $\eta_{\text{э}}$:

$$N_{\text{в}} = N_{\text{э}} \eta_{\text{э}} \quad (6.13)$$

Таким образом нагнетателю передаётся мощность на валу (мощность, потребляемая нагнетателем). Часть мощности на валу передаётся потоку жидкости (или воздуха), проходящему через нагнетатель, и из нагнетателя жидкость (или воздух) выходит обладая запасом мощности, которая называется полезной мощностью $N_{\text{п}}$. Если насос создаёт напор H и через него движется жидкость с расходом Q , то полезная мощность определяется уравнением (6.11).

Необходимая мощность приводного электродвигателя центробежного вентилятора определяется по заданной производительности L и суммарному напору H . Расчётная формула выводится исходя из энергии W (Дж/с или Вт), которую нужно сообщить движущемуся воздуху для получения заданных значений производительности L и суммарному напору H :

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{Sv^3\gamma}{2g}, \quad (6.14)$$

где $m = Sv\gamma$ - масса перекачиваемого газа за 1 с, кг/с;

S – сечение трубопровода, м^2 ;

v – скорость движения газа, м/с;

γ – удельный вес газа, Н/м^3 ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Используя это уравнение и учитывая, что производительность определяется как $L = Sv$, а напор как $P = \frac{v^2\gamma}{2g}$, то с учётом КПД механизма $\eta_{\text{м}}$ и КПД передачи $\eta_{\text{п}}$, необходимая мощность (кВт) на валу приводного двигателя:

$$N_{\text{дв}} = \frac{Sv^3\gamma \cdot 10^{-3}}{2g\eta_{\text{м}}\eta_{\text{п}}} = \frac{Lp \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{м}}\eta_{\text{п}}}. \quad (6.15)$$

Для центробежных насосов это уравнение записывается в следующем виде:

$$N_{\text{дв}} = \frac{Q(H + \Delta H) \gamma_{\text{ж}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{м}} \eta_{\text{н}}}, \quad (6.16)$$

где $H = H_{\text{г}} + \frac{p_2 - p_1}{\gamma_{\text{ж}}}$ - суммарный напор, м;

$H_{\text{г}}$ – геодезический напор, равный сумме высот всасывания и нагнетания, м;

p_1 – давления в резервуаре из которого перекачивается жидкость, Па;

p_2 - давления в резервуаре в который перекачивается жидкость, Па;

ΔH – потеря напора в магистрали (она зависит от сечения труб, качества их обработки, профиля трубопровода и т.д.), м;

$\gamma_{\text{ж}}$ – удельный вес жидкости.

Основными характеристиками центробежных механизмов являются зависимости развиваемого напора H (p) от подачи Q (L). Эти зависимости обычно даются заводами-изготовителями в виде графиков $H = f(Q)$ или $p = f(L)$ для различных частот вращения механизмов (кривые 1, 2, 3, 4 на рис. 6.1).

6.8. Расчёт мощности электродвигателя поршневого механизма

Расчёт мощности электродвигателя для поршневых механизмов можно выполнить по индикаторной диаграмме сжатия (рис. 6.2).

Индикаторная диаграмма строится в координатах $p - V$, где p – давление рабочего тела (жидкости или газа), Па, а V – удельный объём рабочего тела, м³/кг.

Всасывание вещества происходит при постоянном давлении p_1 и изображается на диаграмме горизонтальной прямой 1 – 2. Если всасывается атмосферный воздух, то p_1 равно атмосферному давлению. В зависимости от конструкции нагнетателя процесс сжатия может быть адиабатным (линия 2 –

3), политропным (линия 2 – 3□□) или изотермическим (линия 2 – 3□□□). Нагнетание рабочего тела изображается горизонтальной прямой 3 – 4, что соответствует постоянному давлению p_2 . После удаления рабочего тела из рабочего цилиндра давление в нём мгновенно падает от p_2 до p_1 (линия 4 – 1) и цикл повторяется.

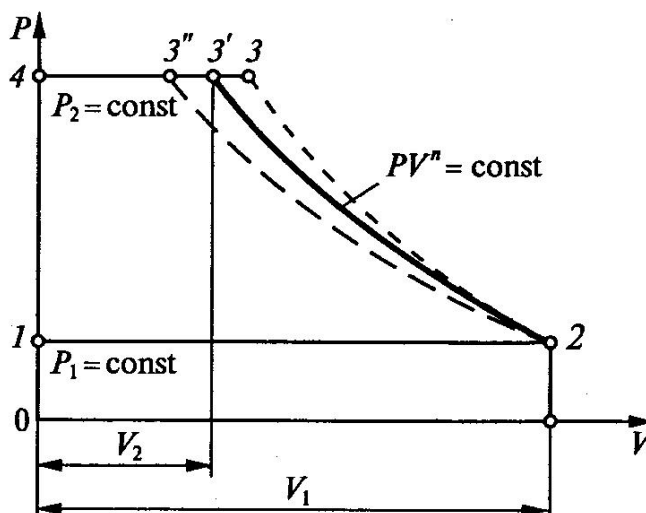


Рис. 6.2. Индикаторная диаграмма сжатия

Удельная работа, затрачиваемая на сжатие вещества, в диаграмме $p - V$ отображается площадью, ограниченной линиями цикла. Наименьшей площади 1 – 2 – 3□□ – 4 соответствует цикл с изотермическим сжатием по линии 2 – 3□□. Наибольшая работа (площадь 1 – 2 – 3 – 4) совершается при адиабатном сжатии по линии 2 – 3.

Работа A (Дж/кг) при сжатии для политропного процесса:

$$A = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right], \quad (6.17)$$

где n – показатель политропы, определяемый уравнением $pV^n = const$;

p_1 и p_2 – соответственно начальное и конечное давления, Н/м²;

V_1 – начальный удельный объём газа (или объём 1 кг газа) при всасывании, м³.

Необходимую мощность N (κBm) приводного двигателя можно определить по формуле

$$N_{\text{д}} = \frac{AQ \cdot 10^{-3}}{\eta_k \eta}, \quad (6.18)$$

где Q – производительность компрессора, $\text{м}^3/\text{с}$;

η_k – индикаторный КПД компрессора при реальном рабочем процессе;

η – КПД механической передачи.

Теоретические индикаторные диаграммы существенно отличаются от действительных, а получение их не всегда возможно, поэтому при определении мощности на валу компрессора пользуются приближённой формулой, в которой исходными данными являются производительность компрессора, работа адиабатического и изотермического сжатия и КПД компрессора, значения которых приводятся в справочной литературе.

В этом случае необходимая мощность

$$N_{\text{д}} = \frac{Q}{\eta_k \eta} \frac{A_a + A_u}{2}, \quad (6.19)$$

где A_a , A_u – соответственно работы адиабатического и изотермического сжатия 1 м^3 атмосферного воздуха до давления p_2 .

Для поршневых механизмов, работающих при постоянном напоре H , мощность на валу и скорость вращения находятся в прямой зависимости, так как поршень при каждом ходе преодолевает постоянное среднее усилие независимо от скорости вращения. Поэтому при заданном графике нагрузки на валу механизма и его номинальной скорости можно предварительно выбрать двигатель по среднему моменту.

6.9. Особенности применения нерегулируемого электропривода для нагнетателей

Для привода насосов, вентиляторов и компрессоров применяются нерегулируемые электроприводы. Нерегулируемый электропривод остаётся основным в тех случаях, когда режим работы нагнетателя по технологическим условиям постоянен или его мощность невелика и регулирование его производительности может быть выполнено без больших потерь энергии воздействием на нагнетатель или на его гидравлическую сеть.

Наиболее распространённым приводом (вследствие простоты и минимальной стоимости) является привод с короткозамкнутым асинхронным двигателем, который применяется для нагнетателей мощностью от десятков ватт до нескольких тысяч киловатт. При мощностях свыше 300 кВт наряду с короткозамкнутыми асинхронными также применяются синхронные двигатели. Когда по условиям пуска необходимо ограничение ускорений или пусковых токов, используются также асинхронные двигатели с фазным ротором.

6.10. Причины применения регулируемого электропривода для нагнетателей

Регулируемый электропривод применяется в следующих случаях:

- когда по условиям работы производительность нагнетателя необходимо часто изменять в широких пределах (например, для насосов систем водоснабжения, для энергетических и газовых компрессоров);
- когда механизм длительно работает с производительностью, существенно меньшей номинальной (например, шахтные вентиляторы);
- когда нагнетатели нуждаются в автоматическом регулировании производительности с повышенными требованиями к качеству регулирования (например, холодильные компрессоры, некоторые циркуляционные и питательные насосы);

- когда электропривод используется для приведения в действие испытательных и экспериментальных установок (например, аэродинамических труб).

6.11. Ступенчатое регулирование нагнетателей и регулирование с помощью двигателей постоянного тока

Простейшие системы регулируемого электропривода обеспечивают ступенчатое регулирование частоты вращения. Для нагнетателей малой мощности применяют многоскоростные асинхронные двигатели. Для нагнетателей большой мощности применяют асинхронные или синхронные двигатели с питанием от преобразователей частоты.

Системы ступенчатого регулирования частоты вращения привода, а следовательно, и подачи не обеспечивают автоматического регулирования и применяются в сочетании с гидродинамическими или аэродинамическими средствами регулирования. Такие системы применяются ограниченно.

Системы приводов с двигателем постоянного тока, несмотря на отличные регулировочные качества, в большинстве случаев для нагнетателей нерациональны.

6.12. Причины применения частотно-управляемого электропривода для нагнетателей

Частотно-управляемые приводы используются в следующих случаях:

- для нагнетателей, расположенных во взрывоопасных цехах;
- когда по конструктивным особенностям нагнетателя или по условиям окружающей среды приводной двигатель должен быть асинхронным короткозамкнутым и требуется регулирование его частоты вращения (например, для погружных насосов);
- для безредукторного электропривода быстроходных нагнетателей с частотой вращения свыше 3000 об/мин;

- для электроприводов мощностью свыше 20 МВт, для которых машины постоянного тока или асинхронные двигатели с фазным ротором не могут быть построены.

6.13. Применение для регулирования нагнетателей асинхронных каскадов и вентильных приводов

В качестве приводов нагнетателей применяются также асинхронные каскады. Достоинством этих приводов применительно к нагнетателям определяется тем, что технико-экономические показатели каскадов зависят от глубины регулирования, так как в этих приводах преобразованию подвергается не полная энергия, потребляемая приводом, а лишь часть её, пропорциональная диапазону регулирования. Нагнетатели в большинстве случаев нуждаются в неглубоком регулировании, поэтому применение каскадных схем асинхронных приводов средней и большой мощности для регулирования частоты вращения нагнетателей является рациональным.

Вентильные приводы и каскады применяются для нагнетателей мощностью от нескольких десятков до нескольких тысяч киловатт. Каскадные приводы, а также машины двойного питания являются рациональной системой регулируемого электропривода для нагнетателей большой и средней мощности при ограниченном изменении скорости от номинального значения.

9.14. Классификация регулирующих устройств нагнетателей

Все регулирующие устройства в зависимости от их влияния на характеристику сети или нагнетателя можно разделить на три группы.

1. Устройства, дросселирующие сеть, то есть изменяющие характеристику сети, но не изменяющие характеристику нагнетателя. Такими устройствами являются клапаны, задвижки, шиберы, диафрагмы и т.п. При дросселировании параметры рабочей точки (подача, давление, мощность и КПД)

определяются на характеристике нагнетателя при неизменной частоте вращения рабочего колеса.

2. Устройства, изменяющие частоту вращения рабочего колеса (характеристику нагнетателя). При этом характеристика сети не изменяется. Частоту вращения рабочего колеса может изменяться с помощью следующих устройств:

- электродвигатели постоянного и переменного тока;
- фрикционные передачи;
- гидромукты;
- индукторные муфты скольжения и др.

3. Устройства, одновременно изменяющие характеристики нагнетателя и сети. Например, входной направляющий аппарат, устанавливаемый в вентиляционном агрегате. При снятии характеристики вентиляционного агрегата необходимо учитывать сопротивление этого направляющего аппарата.

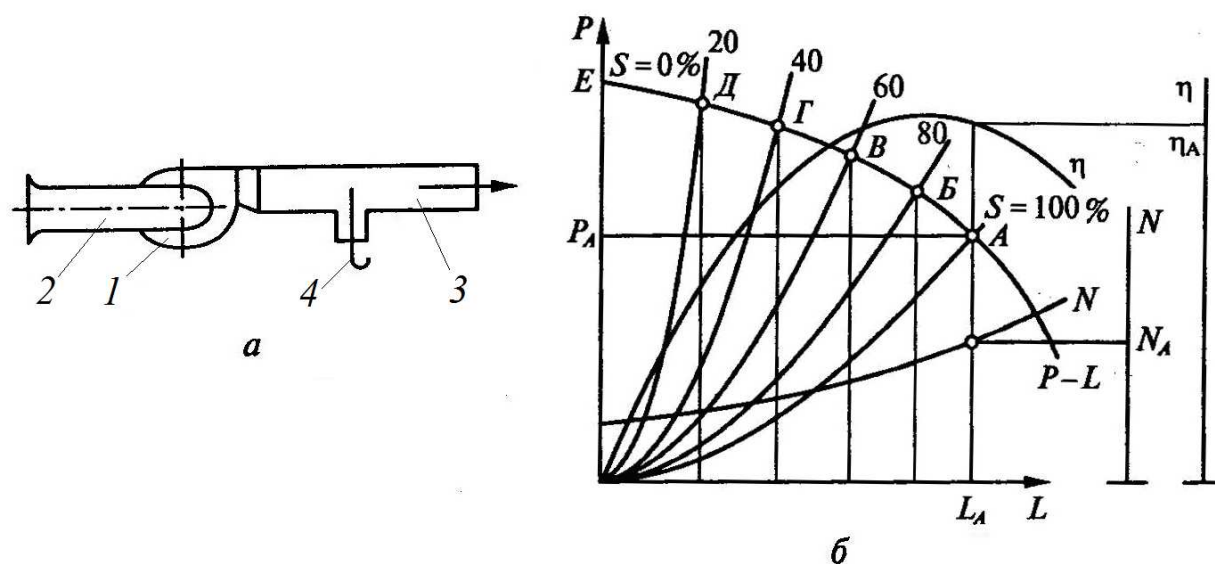
Глубина регулирования насоса $\square_n$ и воздуходувной машины $\square_v$ характеризуется изменением подачи насоса или изменением давления воздуходувной машины, отнесённым к подаче или давлению при исходном режиме (H_1, p_1) .

$$\theta_n = \frac{H_1 - H_2}{H_1}; \quad \theta_v = \frac{p_1 - p_2}{p_1}. \quad (6.20)$$

6.15. Регулирование нагнетателей дросселированием

Дросселирование при постоянной частоте вращения – самый неэкономичный, но самый распространённый способ регулирования. Дросселирование заключается в искусственном введении в сеть дополнительного сопротивления, например в виде шибера I (рис. 6.3 *а*). При этом увеличивается сопротивление сети и её характеристика становится более крутой, рабочая точка передвигается из положения A (рис. 6.3 *б*) по характеристике вентилятора влево вверх, занимая последовательно положения B , B' и т.д., и определяя

новые значения параметров работы. Так как наибольшая подача достигается при полностью открытом шибере, то такой способ регулирования применяется только с целью уменьшения подачи.



1 – вентилятор; 2 – всасывающий трубопровод; 3 – напорный трубопровод;
4 – шиберная заслонка

Рис. 6.3. Регулирование подачи воздуха дросселированием

Аналогично выполняется изменение результирующего сопротивления напорной магистрали и для насосов (рис. 6.4).

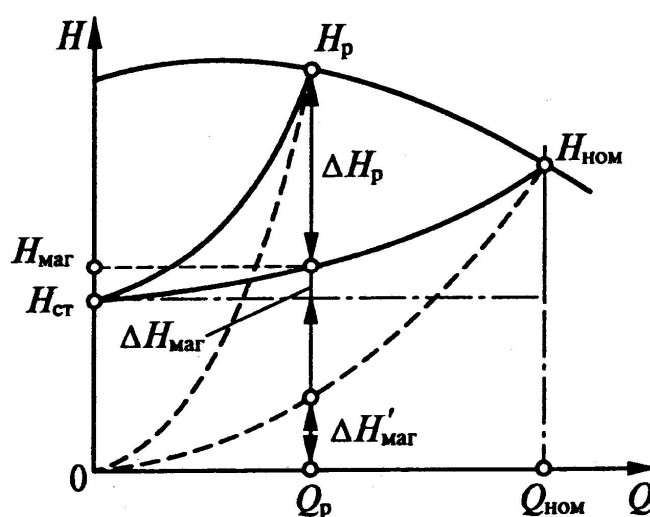


Рис. 6.4. Регулирование подачи жидкости дросселированием

При неизменной скорости рабочая точка механизма перемещается по характеристике $Q = f(H)$ в сторону снижения подачи до точки пересечения с новой характеристикой напорной магистрали. При этом часть напора ΔH_p теряется на регулирующем устройстве.

Для оценки КПД $\eta_{дс}$ дросселирующего способа регулирования примем, что КПД механизма и двигателя остаются неизменными при изменении подачи. Тогда

$$\eta_{дс} = \frac{H_{\text{маг}} Q_p}{(H_{\text{маг}} + \Delta H_p) Q_p} = \frac{H_{\text{сп}}}{H_p} + \frac{H_{\text{маг}}}{H_p}, \quad (6.21)$$

где $H_{\text{маг}}$ – напор в магистрали после регулирующего органа;

Q_p – подача нагнетателя совместно с регулирующим органом;

H_p – напор, создаваемый нагнетателем перед регулирующим органом;

$\Delta H_{\text{маг}}$ – потери напора в магистрали.

Из выражения (6.21) и рис. 6.4 следует, что КПД данного способа регулирования уменьшается с уменьшением статического напора $H_{\text{ст}}$. При $H_{\text{ст}} = 0$ КПД дросселирования:

$$\eta_{дс} = \frac{H'_{\text{маг}}}{H_p} = \frac{H_{\text{ном}}}{H_p} \left(\frac{Q_p}{Q_{\text{ном}}} \right)^2 < \left(\frac{Q_p}{Q_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (6.22)$$

где $H_{\text{ном}}$ и $Q_{\text{ном}}$ – номинальные значения напора и подачи нагнетателя.

Из выражения (6.22) следует, что снижение КПД имеет примерно квадратичную зависимость от диапазона регулирования подачи $D = \frac{Q_{\text{ном}}}{Q_p}$. При малом

статическом напоре и требуемых больших диапазонах изменения подачи способ регулирования дросселированием очень неэкономичен.

Регулирование дросселированием может применяться только в маломощных установках с небольшим диапазоном регулирования.

На рис. 6.5 приведены зависимости КПД насоса от расхода при регулировании задвижкой (1) и изменением частоты вращения (2).

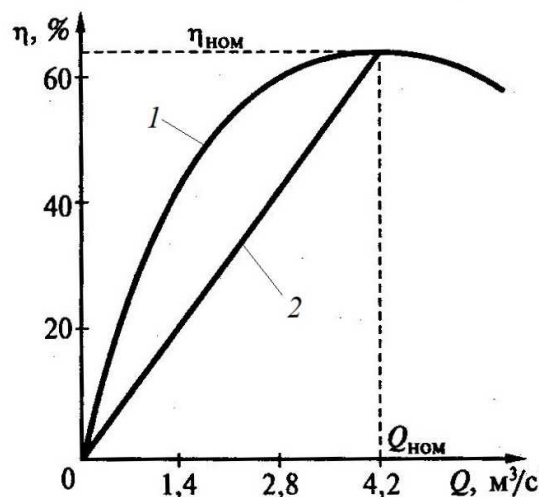


Рис. 6.5. КПД насоса в зависимости от расхода

При регулировании центробежных насосов, подающих воду, дросселирующее устройство должно располагаться на напорном трубопроводе, так как если установить его на напорном трубопроводе, то при регулировании в потоке могут возникать кавитационные явления, вызывающие нарушение нормальной работы насоса, вплоть до его разрушения.

6.16. Регулирование одного нагнетателя изменением частоты вращения

График регулирования напора и подачи насоса при изменении характеристик сети приведён на рис. 6.6.

Если характеристики сети изменяются произвольно (от кривой 1 до кривой 3 на рис. 6.6, а), и требуется обеспечить стабилизацию напора в соответствии с заданным значением $H_з$, то измеряется давление в выходной магистрали, и регулятор автоматически изменяет частоту вращения насоса от значения ω_1 до значения ω_3 . При этом характеристики насоса изменяются от кривой 1 до кривой 3, и значение напора остаётся постоянным. Расход насоса меняется от Q_A до Q_C . Точки A, B, C на характеристиках насоса 1,

2□, 3□ являются рабочими точками при разных сопротивлениях магистрали, соответствующих характеристикам сети 1, 2, 3.

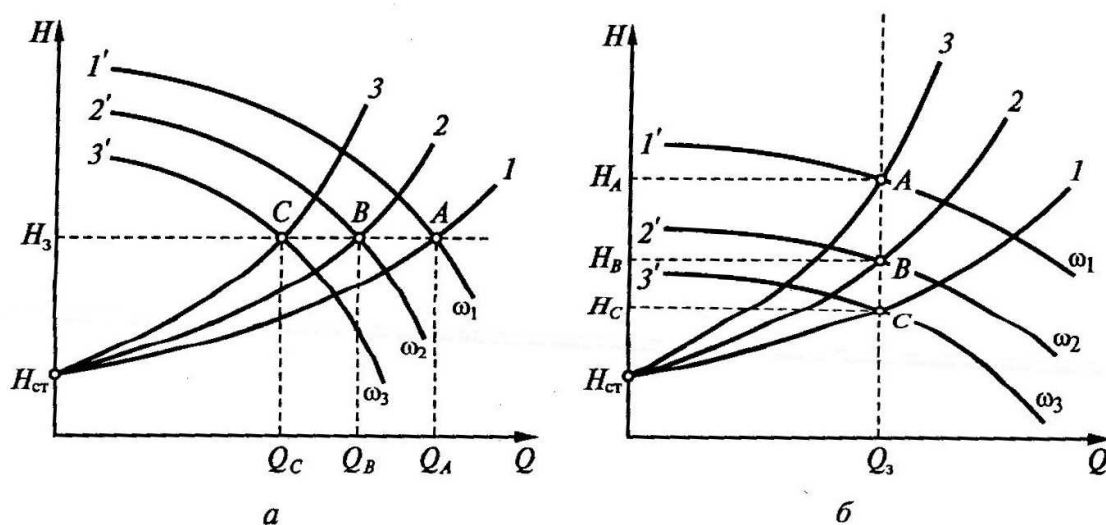


Рис. 6.6. График стабилизации напора и подачи насоса при изменении характеристик сети

При изменении заданного значения напора H_3 будут, соответственно, изменяться характеристики насоса.

Аналогично обеспечивается стабилизация расхода в соответствии с заданным значением Q_3 при произвольном изменении характеристик сети (рис. 6.6, б). Такой случай возникает в технологических агрегатах химической промышленности, когда по значению заданного расхода насоса выполняют расчёт объёма (массы) жидкости, поступающей в агрегат за известный интервал времени. Для стабилизации расхода измеряется его значение в напорном (выходном) трубопроводе, и регулятор изменяет частоту вращения насоса от ω_1 до ω_3 . Стабилизация расхода при изменении характеристики сети сопровождается изменением напора от H_A до H_C ,

6.17. Регулирование нескольких нагнетателей изменением частоты вращения

Насосные агрегаты обычно объединяются в насосные станции, при этом несколько насосов работают параллельно на одну сеть.

На рис. 6.7 приведены характеристики регулирования подачи насосной станции изменением частоты вращения насосов, имеющих различные характеристики.

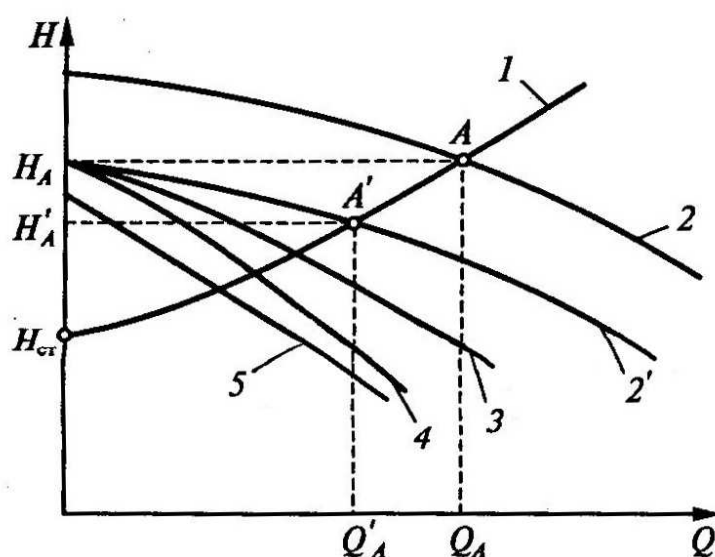


Рис. 6.7. Характеристики регулирования подачи изменением частоты вращения насосов, имеющих различные характеристики

Если два насоса с суммарной характеристикой 2 работают на сеть с характеристикой 1 в точке A с производительностью Q_A и необходимо уменьшить их производительность $Q_A \square$, то это можно сделать двумя способами: либо уменьшить частоту вращения обоих насосов (до их новых характеристик 3 и 4 и новой суммарной характеристики 2 $\square$), либо снизить более значительно частоту вращения одного из насосов (характеристика 5 при сниженной частоте вращения). Регулирование производительности изменением частоты вращения одновременно двух насосов по своим показателям равноценно регулированию частоты вращения насоса при его одиночной работе.

Одновременное изменение частоты вращения всех параллельно работающих насосов более выгодно с точки зрения экономичности регулирования. Однако это связано с увеличением капитальных затрат на оснащение всех агрегатов регулируемым электроприводом. Поэтому для большинства насосных станций достаточно иметь только один регулируемый агрегат и осуществлять более глубокое регулирование отключением отдельных насосов.

Ряд применяемых насосов, вентиляторов, компрессоров не требует регулирования скорости – это вентиляционные установки цеховых помещений, пожарные насосы, насосы некоторых водопроводных магистралей, большинство заводских компрессорных установок и т.д. Поэтому для них применяют асинхронные или синхронные (при мощностях выше 300 кВт) двигатели переменного тока, управление которыми осуществляется магнитными или бесконтактными пускателями (при малых мощностях), стандартными или специализированными пусковыми станциями. Для асинхронных и синхронных электродвигателей пусковые станции предусматривают следующие способы пуска:

- прямой;
- реакторный;
- автотрансформаторный.

6.18. Причины совместной работы нагнетателей

В состав технологических схем подачи воздуха в производственные помещения или подачи воды на определённых технологических стадиях входят обычно несколько нагнетателей. Существуют следующие причины для совместной работы нагнетателей:

- один нагнетатель не может обеспечить требуемую подачу или давление, а замена его другим, более мощным, невозможна;

- в процессе эксплуатации в соответствии с требованиями технологического процесса возникают режимы, связанные с продолжительным изменением расхода и сопротивления сети (изменения режима осуществляются отключением одного из нагнетателей);

- требуется дублирование для обеспечения надёжности функционирования всей системы в целом;

- архитектурно-планировочные решения зданий приводят к созданию сложных разветвлённых сетей, для регулирования которых с наибольшей эффективностью требуется установка нескольких нагнетателей.

Включение нагнетателей в совместную работу может быть параллельным, последовательным и комбинированным (смешанным).

6.19. Параллельное включение нагнетателей

Параллельное включение нескольких нагнетателей следует применять в тех случаях, когда требуется увеличение подачи, а соответствующее увеличение частоты вращения рабочего колеса или размеров нагнетателя невозможно из-за чрезмерного усиления шума, из-за конструктивных или архитектурно-планировочных причин.

Рассмотрим параллельную работу вентиляторов. Всё ниже изложенное справедливо и для насосов, но, в этом случае, вместо давления P следует иметь в виду напор H , а вместо подачи вентилятора L – расход жидкости Q .

Существуют три основные схемы параллельного включения нагнетателей в сеть:

- полное параллельное включение (рис. 6.8, *а*);
- полупараллельное включение с двумя выходами (рис. 6.8, *б*);
- полупараллельное включение с двумя входами (рис. 6.8, *в*).

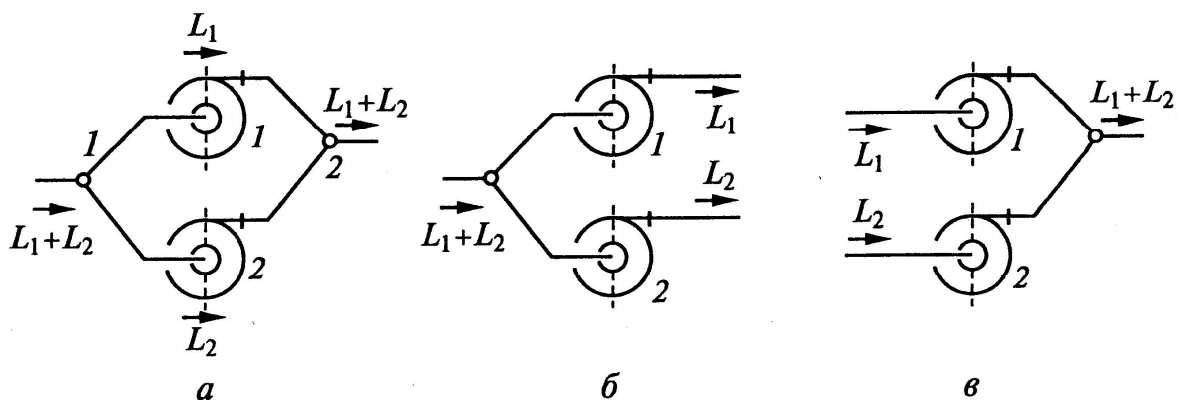


Рис. 6.8. Параллельное включение нагнетателей

При полном параллельном включении нагнетатели имеют один общий вход и один общий выход (рис. 6.8, а). Характеристики нагнетателей одинаковые.

Для упрощения анализа пренебрегаем сопротивлениями индивидуальных участков сети 1 и 2. При любом совместном включении необходимо определить режим работы как всей системы в целом, так и каждого нагнетателя.

Аналитическая зависимость давления нагнетателя от его подачи сложна и чаще всего задаётся графически в виде характеристики $P = f(L)$, поэтому самый простой способ анализа – графический. Обычно применяется метод суммарной характеристики нагнетателей.

Давления, создаваемые каждым нагнетателем в точках 1 и 2, одинаковы, а общая подача равна сумме подач отдельных нагнетателей. Поэтому правило построения суммарной характеристики параллельно включенных нагнетателей следующее: надо сложить подачи при одинаковом давлении.

6.20. Суммарная характеристика нагнетателей при параллельном включении

На рис. 6.9 показано построение суммарной характеристики нагнетателя при полном параллельном включении нагнетателей с одинаковыми характеристиками.

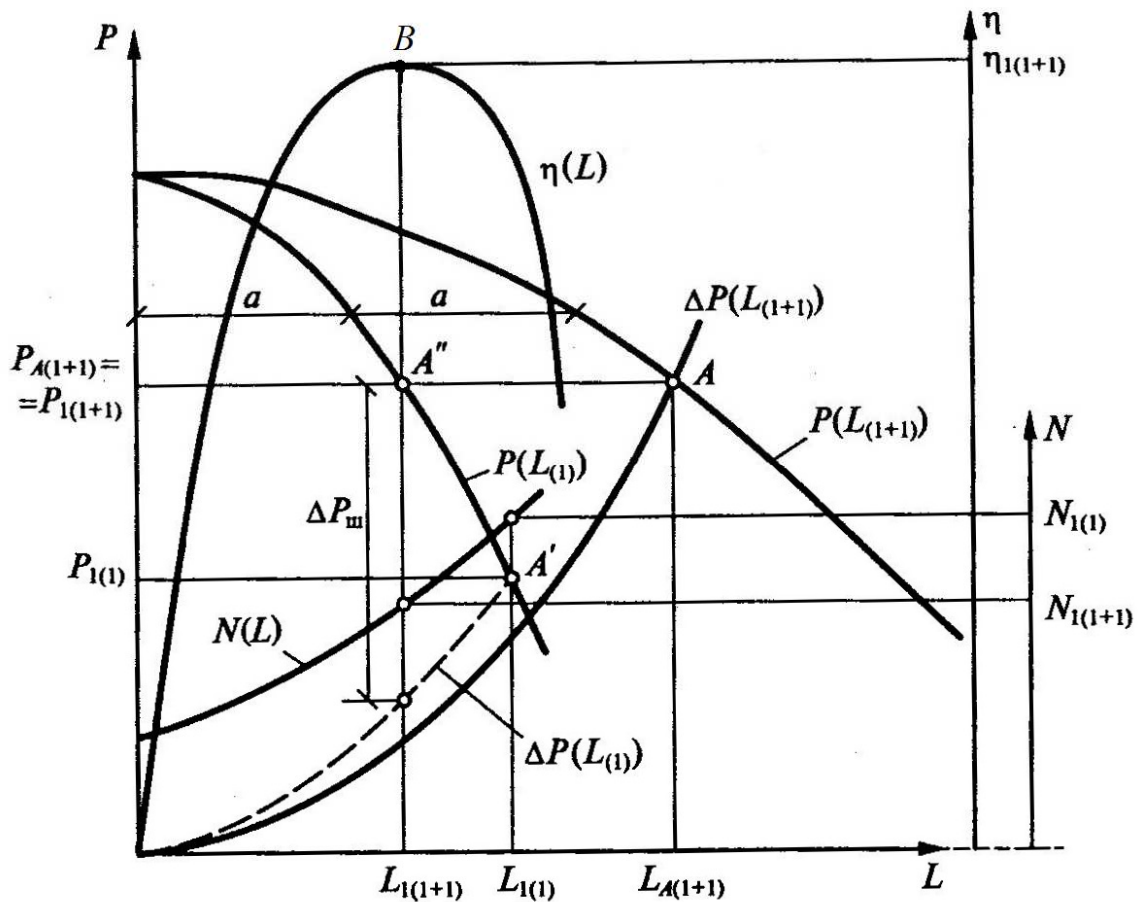


Рис. 6.9. Суммарная характеристика давления

Абсциссы a , представляющие собой подачу одного нагнетателя, суммируются при каждом значении давления, и получается характеристика суммарной подачи (1+1). При включении нагнетателей в сеть с характеристикой (1+1) режим работы определяется точкой A . При этом суммарная подача нагнетателей определяется величиной $L_{A(1+1)}$, а суммарное давление – величиной $P_{A(1+1)}$, при этом $P_{A(1+1)} = P_{1(1+1)}$, то есть суммарное давление равно давлению, создаваемому каждым нагнетателем. Подача каждого нагнетателя со-

ставляет половину общей и может быть определена графически по положению точки $A_{\square}$, то есть $L_{1(1+1)} = L_{A^*} = 0,5L_{A(1+1)}$. Суммарный КПД обоих нагнетателей равен КПД каждого из них в отдельности и определяется точкой B пересечения ординаты, проходящей через точку $A_{\square}$, с характеристикой КПД нагнетателя. Точка пересечения этой ординаты с характеристикой мощности определяет затраты мощности каждым нагнетателем. Суммарные затраты мощности равны сумме мощностей отдельных нагнетателей: $N_{A(1+1)} = 2N_{1(1+1)}$.

При отключении одного из нагнетателей характеристика сети $\Delta P(L_{(1)})$ становится круче вследствие уменьшения площади поперечного сечения для прохода воздуха между точками 1 и 2 (рис. 6.8, а). Рабочая точка переходит из положения A в положение $A_{\square}$ (рис. 6.9). При этом параметры работы нагнетателя изменяются: подача увеличивается $L_{1(1)} > L_{1(1+1)}$, давление уменьшается $P_{1(1)} > P_{1(1+1)}$ и затраты мощности увеличиваются $N_{1(1)} > N_{1(1+1)}$. Это может вызвать перегрев обмоток электродвигателя. Поэтому при выключении одного из нагнетателей его индивидуальный участок должен быть перекрыт клапаном (чтобы исключить бесполезное перетекание по нему воздуха из-за разности давлений в точках 2 и 1 ($P_2 > P_1$)), а в сеть оставшегося в работе нагнетателя надо ввести дополнительное давление $\Delta P_{\text{ш}}$ так, чтобы рабочая точка переместилась на ординату, пересекающую точку $A_{\square}$. При этом затраты мощности составят $N_{1(1+1)}$ и перегревания электродвигателя не произойдёт.

Рассмотренный метод построения суммарной характеристики нагнетателей можно использовать при любом количестве нагнетателей.

Построение суммарной характеристики *нагнетателей с разными характеристиками* аналогично.

Если несколько нагнетателей, имеющих разные характеристики, подключить к одной проточной камере, то в ней можно создать настолько значительное давление, что один из нагнетателей не сможет ему противодействовать, и поток воздуха пойдёт через этот нагнетатель в обратную сторону. При этом разность полных давлений с обеих сторон нагнетателя останется положительной, а поток изменит направление и, следовательно, нагнетатель будет работать при отрицательных подачах ($L < 0$). Направление вращения рабочего колеса при этом не изменяется, поэтому нагнетатель по-прежнему потребляет мощность (если бы направление вращения изменилось, то нагнетатель стал бы работать как турбина, отдавая мощность на вал).

При параллельной работе нагнетателей с разными характеристиками целесообразно определять средний КПД нагнетателей:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\frac{P_1 L_1 + P_2 L_2}{\eta_1 + \eta_2}}{\eta_1 + \eta_2} \quad (6.23)$$

Более мощные нагнетатели должны работать с максимальным КПД, а регулировать расход в системе целесообразно менее мощным нагнетателем.

6.21. Последовательное включение нагнетателей

Последовательное включение нескольких нагнетателей применяется в тех случаях, когда давление, создаваемое одним нагнетателем, недостаточно для преодоления сопротивления сети.

При последовательном включении одно и то же количество воздуха последовательно перемещается всеми нагнетателями, а давление, необходимое для преодоления сопротивления всей сети, равно сумме давлений, создаваемых каждым нагнетателем. Кинетическая энергия, сообщённая потоку первым нагнетателем, не теряется на удар, поэтому общее статическое давление больше суммы статических давлений отдельных нагнетателей. Напри-

мер, три одинаковых последовательно включенных нагнетателя создают полное давление $3P_{1(1+1+1)}$.

Если нагнетатель включить последовательно с более мощным, то его подача может увеличиться до значений, гораздо больших, чем его собственная максимальная подача. При этом он станет сопротивлением для более мощного нагнетателя, то есть при сохранении направления подачи ($L > 0$) разность давлений с обеих сторон нагнетателя изменит знак (станет $P_2 > P_1$).

Работа нагнетателя возможна при $L > 0$ и $P > 0$ (I квадрант), при $L < 0$ и $P > 0$ (II квадрант), при $L > 0$ и $P < 0$ (IV квадрант). Работа нагнетателя в III квадранте ($L < 0$ и $P < 0$) невозможна, так как поток не может пойти в обратном направлении через нагнетатель при давлении перед нагнетателем большим, чем после него. Обычно характеристика снимается только в I квадранте, то есть при нормальной работе нагнетателя, тем более что для снятия характеристики во II и IV квадрантах требуется специальное оборудование.

6.22. Система управления насосом с преобразователем частоты

Управление насосом с помощью преобразователя частоты позволяет плавно регулировать частоту вращения электродвигателя насоса и поддерживать давление в гидросистеме при разных расходах перекачиваемой жидкости. При малых расходах жидкости двигатель насоса вращается с малой скоростью, достаточной для поддержания номинального давления, и не расходует лишней энергии. В случае увеличения расхода жидкости преобразователь увеличивает частоту вращения электродвигателя, увеличивая производительность насоса при сохранении заданного давления.

На рис. 6.10 приведена функциональная схема регулирования электродвигателя насоса с применением преобразователя частоты FR-A500 фирмы «Mitsubishi electric».

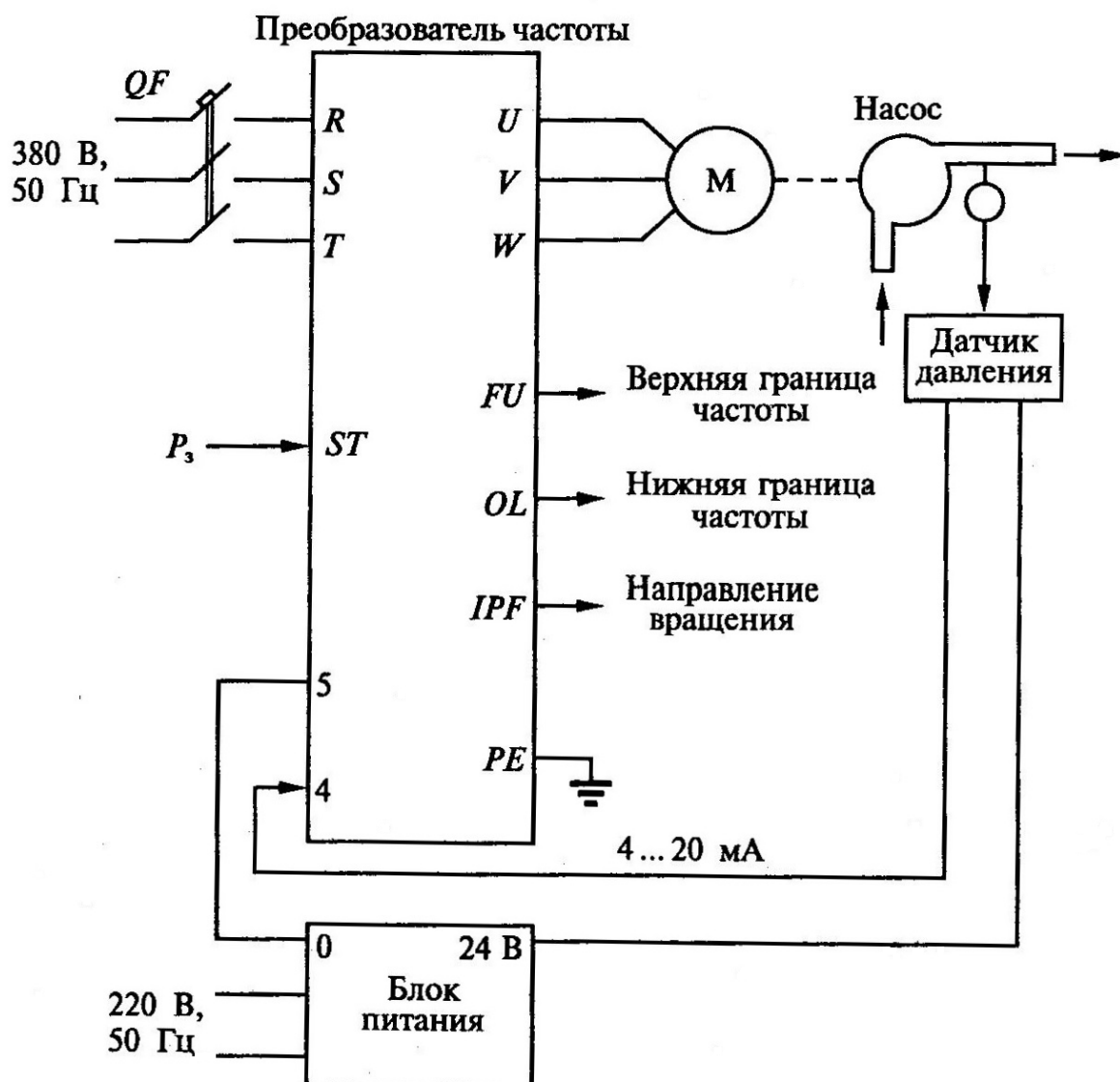


Рис. 6.10. Функциональная схема регулирования электродвигателя насоса

На вход *ST* преобразователя частоты подаётся сигнал задания давления, на вход *4* – сигнал реального давления, получаемый с выхода датчика давления, установленного в цепи обратной связи. Рассогласование между заданным и реальным значениями давления преобразуется ПИД-регулятором преобразователя в сигнал задания частоты переменного тока. Под воздействием выходного сигнала частоты переменного тока изменяется частота вращения электродвигателя насоса и разность между заданным и реальным

значениями приводится к нулю. Таким образом, давление в гидросистеме поддерживается равным заданному и не изменяется при изменении расхода.

Современные преобразователи частоты позволяют создавать системы управления без дополнительных аппаратных средств, так как имеют встроенные программные функции, позволяющие реализовывать компаратор и ПИД-регулятор. Для создания системы управления требуется только внешний датчик давления.

6.23. Система управления насосом с использованием нечёткой логики

На рис. 6.11 показана система управления асинхронным электроприводом центробежного насоса для стабилизации давления в системе водоснабжения.

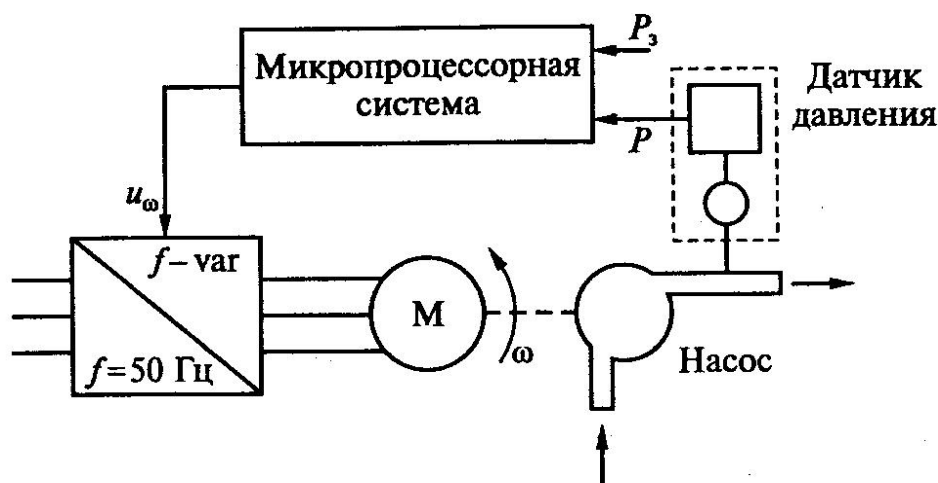


Рис. 6.11. Система управления насосом с использованием нечёткой логики

Система управления включает в себя микропроцессорную систему, реализующую управление по правилам нечёткой логики, и преобразователь частоты, позволяющий регулировать подачу насоса изменением частоты его вращения. Функции принадлежности входных и выходных сигналов, а также правила принятия решений формируются на основе знаний эксперта о ходе технологического процесса.

Значение давления p определяется датчиком давления, сигнал с которого после двенадцатирядного аналого-цифрового преобразования поступает в микропроцессорную систему управления в виде целого числа (от 0 до 4000). Допустим, что требуемое значение давления находится в середине диапазона измерения датчика. Заданное давление p_z примем равным 2000. Тогда отклонение текущего давления (ошибка регулирования) d_p от заданного значения находится в диапазоне от -2000 до $+2000$. Для перехода к нечётким переменным по отклонению давления примем стандартную форму функций принадлежности трёх термов: уменьшить (М), норма (Н), увеличить (В) (рис. 6.12).

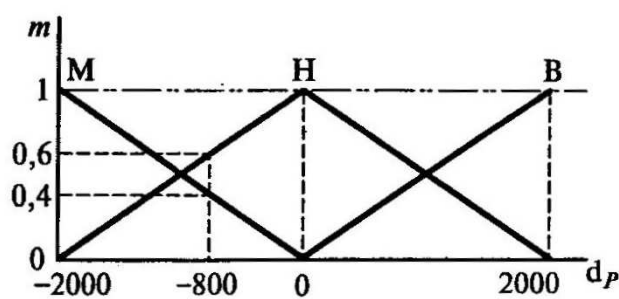


Рис. 6.12. Вычисление ошибки регулирования d_p

Чтобы более качественно управлять процессом, вычисляется также скорость изменения давления v_p , которая может принимать значения от -2000 до $+2000$. Для перехода к нечётким переменным скорости изменения давления принимается стандартная форма функций принадлежности трёх термов: уменьшить (М), норма (Н), увеличить (В) (рис. 6.13).

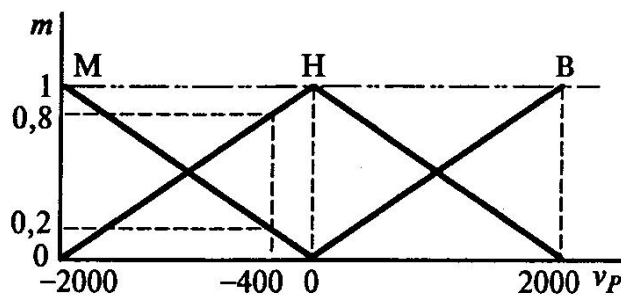


Рис. 6.13. Вычисление скорости изменения давления v_p

Для регулирования скорости электропривода насоса с помощью преобразователя частоты используется сигнал задания скорости u_ω , который поступает с выхода цифроаналогового преобразователя микропроцессорной системы управления. Формированием управляющего сигнала обеспечивается изменение частоты вращения ω , которое определяется целым числом в диапазоне от 0 до 4000. В лингвистических переменных нечёткой логики управление изменением частоты вращения может быть представлено пятью термами: сильно уменьшить (СМ), уменьшить (М), норма (Н), увеличить (В), сильно увеличить (СВ) (рис. 6.14).

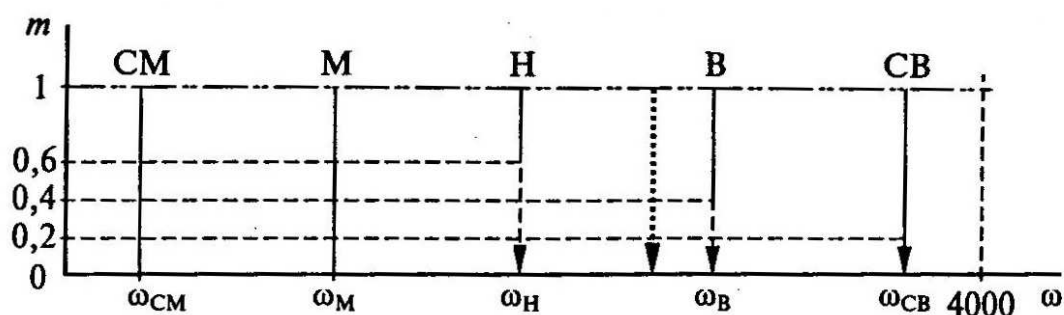


Рис. 6.14. Формирование управляющего сигнала изменением частоты вращения ω ,

Если давление меньше и его значение не изменяется, то частоту вращения насоса увеличиваем. С помощью нечётких переменных это правило можно записать так: если $d_p = \text{М}$ и $v_p = \text{Н}$, то $\omega = \text{В}$.

Если давление меньше и его значение уменьшается, то частоту вращения насоса сильно увеличиваем. С помощью нечётких переменных это записывается так: если $d_p = \text{М}$ и $v_p = \text{М}$, то $\omega = \text{СВ}$.

Аналогично составляются остальные правила. Если анализировать все возможные состояния условий, то для данного случая можно составить 9 правил. Совокупность всех правил удобно представить в виде таблицы, в которой столбцы соответствуют условиям одного параметра, строки – условиям

другого параметра, а на их пересечениях записываются выводы, соответствующие этим условиям (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Совокупность правил нечёткой логики для управления насосом

Отклонение давления, d_p	Скорость изменения давления, v_p		
	М	Н	В
М	СВ	В	Н
Н	В	Н	М
В	Н	М	СМ

В качестве метода дефазификации примем метод центра тяжести. Рассмотрим, как определяется управление в некоторой точке движения системы. Предположим, что имеется отклонение давления, равное минус 800, и давление продолжает уменьшаться со скоростью минус 400. Тогда термы М и Н отклонения давления имеют степени принадлежности соответственно 0,4 и 0,6 (рис. 6.12), а термы М и Н скорости изменения давления равны соответственно 0,2 и 0,8 (рис. 6.13). Остальные термы имеют степень принадлежности равную 0. Для принятой формы записи правил степень принадлежности antecedента каждого правила определяется по минимуму всех условий, то есть для вывода имеют значение только правила, содержащие условия с ненулевыми степенями принадлежности:

1. Если $d_p = \text{М}$ и $v_p = \text{М}$, то $\omega = \text{СВ}$;
2. Если $d_p = \text{М}$ и $v_p = \text{Н}$, то $\omega = \text{В}$;
3. Если $d_p = \text{Н}$ и $v_p = \text{М}$, то $\omega = \text{В}$;
4. Если $d_p = \text{Н}$ и $v_p = \text{Н}$, то $\omega = \text{Н}$.

Каждое из этих правил даёт степень принадлежности выводу по минимуму:

1. $m_{\text{СВ}}(\omega) = \min \{m_{\text{М}}(d_p); m_{\text{М}}(v_p)\} = \min \{0,4; 0,2\} = 0,2$;
2. $m_{\text{В}}(\omega) = \min \{m_{\text{М}}(d_p); m_{\text{Н}}(v_p)\} = \min \{0,4; 0,8\} = 0,4$;
3. $m_{\text{В}}(\omega) = \min \{m_{\text{Н}}(d_p); m_{\text{М}}(v_p)\} = \min \{0,6; 0,2\} = 0,2$;

$$4. m_H(\omega) = \min \{m_H(d_p); m_H(v_p)\} = \min \{0,6; 0,8\} = 0,6.$$

На втором шаге формирования нечёткого вывода определяется степень принадлежности термов выходной переменной по максимуму. Например, выражения п.п. 2 и 3 дают разные значения степени принадлежности для терма В, но берётся максимальное:

$$m_B(\omega) = \max \{m_B(\omega)_2; m_B(\omega)_3\} = \max \{0,4; 0,2\} = 0,4.$$

Таким образом, при данном состоянии входных сигналов степени принадлежности термов выходной переменной имеют значения (рис. 6.14):

$$\{m_{CM}, m_M, m_H, m_B, m_{CB}\} = \{0; 0; 0,6; 0,4; 0,2\}. \quad (6.24)$$

Для перехода от нечётких выводов к управляющему воздействию используется формула дефазификации по методу центра тяжести:

$$\omega = \frac{\omega_{CM} m_{CM} + \omega_M m_M + \omega_H m_H + \omega_B m_B + \omega_{CB} m_{CB}}{m_{CM} + m_M + m_H + m_B + m_{CB}}. \quad (6.25)$$

Подставив в выражение (6.25) числовые значения, получим

$$\omega = \frac{200 \cdot 0 + 1100 \cdot 0 + 2000 \cdot 0,6 + 2900 \cdot 0,4 + 3800 \cdot 0,2}{0 + 0 + 0,6 + 0,4 + 0,2} = 2600.$$

Таким образом, получено значение сигнала управления электроприводом насоса.

7. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДРОБИЛЬНО-РАЗМОЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

7.1. Особенности дробильно-размольных механизмов

Дробильно-размольные механизмы применяются для дробления и измельчения горных пород, продуктов химической промышленности, отходов металлургического производства и др. К ним относятся роторные, конусные, валковые и щёковые дробилки, а также шаровые мельницы.

Режимы работы дробильно-размольных механизмов существенно отличаются друг от друга. Для многих из них по условиям технологического

процесса требуется обеспечение регулирования скорости исполнительного органа в широком диапазоне.

Приводы дробильно-размольных механизмов работают в тяжёлых условиях: при непрерывных ударных нагрузках, при вибрациях и неравномерной нагрузке, при большом количестве пыли и микрочастиц, при повышенной влажности. В этих условиях предпочтительно использовать приводы с асинхронными двигателями, как наиболее простыми и надёжными. Электроприводы с асинхронными двигателями обеспечивают широкий диапазон регулирования скорости и позволяют агрегату работать в широком диапазоне нагрузок и дробимых материалов.

Мощность электропривода дробилки определяется требуемой производительностью, коэффициентом дробления, свойствами материала и потерями в электрической и механической частях дробильных агрегатов и вспомогательных механизмов.

Режим работы дробилок длительный, нагрузка изменяющаяся. Возмущающими воздействиями, оказывающими влияние на процесс дробления в случайном сочетании, являются:

- твёрдость и вязкость дробимого материала;
- изменение сил трения в процессе дробления;
- неравномерность прохождения дробимого материала.

Исходя из этого, машины для дробления относятся к группе установок с резко изменяющейся нагрузкой в процессе работы.

Важными особенностями режима работы дробилок являются:

- нелинейность параметров и характеристик их электроприводов (наличие упругостей, зазоров и т.д.);
- стохастический характер нагрузок, действующих в их элементах, который определяется стохастическим характером сопротивляемости материалов разрушению.

Производительность дробилки в процессе работы изменяется в широких пределах. На её производительность влияют следующие факторы:

- влажность дробимого материала;
- физические свойства дробимого материала;
- требуемый гранулометрический состав дроблёного материала;
- содержание ценного компонента в горной породе.

Высокая влажность материала, поступившего на дробление, приводит к его «зависанию» в бункерах, забивает разгрузочные отверстия и ухудшает подпрессовку дробилок. Для обеспечения стабилизации производительности дробления и для получения требуемого гранулометрического состава дроблёного материала реализуется плавное регулирование скорости всех механизмов.

7.2. Управление дробильным и мельничным оборудованием

Для дробильного и мельничного оборудования применяются асинхронные реверсивные электроприводы с частотным и частотно-токовым управлением, машины двойного питания, механические вариаторы, управляемые муфты и т.д. Управляемые электроприводы постоянного тока почти не применяются из-за специфических условий работы.

Автоматическое управление режимом работы процесса дробления включает в себя:

- управление загрузкой материала в дробилку;
- регулирование скорости дробления, исходя из минимума затрат электроэнергии;
- регулирование гранулометрического состава продуктов дробления.

Производительность дробилки в зависимости от прочности и крупности дробимого материала ограничивается пропускной способностью или нагрузкой электродвигателя дробилки. При дроблении прочных пород количество материала, подаваемого в дробилку, должно ограничиваться допусти-

мой нагрузкой двигателя электропривода. Если дробимый материал обладает малой прочностью, то его количество ограничивается пропускной способностью дробилки.

Для исключения перегрузки электродвигателя и завала дробилки управление загрузкой материала в дробилку осуществляют в зависимости от нагрузки двигателя и уровня материала в дробилке. Значительное повышение эффективности процесса дробления даёт управление загрузкой материала в зависимости от размеров дробимого материала или на основе измерения косвенных параметров, характеризующих этот показатель (например, виброскорости в конусной дробилке и амплитуды колебаний корпуса щёковой или валковой дробилки).

Управление режимом работы дробилки при регулировании гранулометрического состава продуктов дробления осуществляют изменением размера разгрузочной щели или частоты качаний подвижного органа дробилки в зависимости от размеров продуктов дробления или параметров, косвенно характеризующих прочность и размеры продуктов дробления, таких как удельный расход энергии на дробление, амплитуда колебаний корпуса дробилки.

На обогатительных фабриках, где продукты дробления подвергаются последующему измельчению, наиболее приемлемым критерием управления является получение минимальных размеров продуктов дробления при заданной производительности технологического комплекса дробления. Такое управление процессом дробления позволяет получать продукты дробления наименьших размеров, что снижает затраты на измельчение и, следовательно, на подготовку сырья к обогащению в целом. Системный подход при выборе режима работы каждой дробилки является основой наиболее эффективного управления технологической линией дробления. Каждый агрегат должен быть максимально задействован для достижения цели управления – получения продуктов дробления с минимальными размерами при заданной производительности технологической линии дробления.

В дробильных механизмах системой управления осуществляется:

- контроль минимального уровня вещества в бункере над пластинчатым питателем, установленным перед дробилкой. Чтобы избежать повреждения пластин питателя при загрузке материала, в бункере должна быть каменная «постель»;
- контроль завала дробилки, применяемый для предупреждения вынужденных остановок;
- контроль состояния подшипников дробилок, предусматривающий сигнализацию о перегревании подшипников, измерение температуры масла на сливе из подшипников и сигнализацию о прекращении потока масла с одновременной подачей команд в схему электропривода для необходимых блокировок;
- учёт количества перерабатываемого вещества с помощью конвейерных весов, установленных за дробилками крупного дробления, после промежуточных складов и перед бункерами корпуса обогащения;
- контроль наличия руды на питателях и конвейерах с помощью электродных или других датчиков, необходимых для информации оператора о прохождении материала;
- обнаружение и удаление металлических предметов из потока руды с помощью металлоискателей;
- контроль размеров продуктов дробления.

Регулирование дробилки заключается в стабилизации количества материала в её рабочем пространстве. Если уровень материала превышает заданное значение, подводимый поток уменьшается, если запас меньше заданного значения, поток увеличивается. Схемы автоматизации цикла дробления обеспечивают также пуск и остановку дробилки и вспомогательных механизмов с соблюдением технологической последовательности.

Рассмотрим систему управления на примере роторной дробилки. Электропривод роторной дробилки выполнен на базе асинхронного двигателя.

ля с короткозамкнутым ротором и частотным преобразователем. В систему управления входят датчики, которые контролируют массу на входе дробилки, наличие металлических предметов в общей массе вещества, массу дробимого материала на выходе дробилки. Кроме этого, применяются датчики уровня заполнения, вибраций корпуса установки, температуры опор и переполнения входного бункера.

Общее управление роторной дробилкой осуществляется программируемым контроллером. Задачами контроллера являются: управление работой роторной дробилки, реализация режима технического диагностирования, отображение процесса дробления. В состав контроллера входят: NT-терминал, ручной пульт управления, четыре аналоговых модуля ввода и вывода на восемь входов и восемь выходов, два температурных модуля (для контроля температуры подшипников). Количество модулей обусловлено количеством датчиков, контролирующих различные технологические и технические параметры. В ПЗУ контроллера записаны основные предустановочные параметры для процесса дробления. Вся информация о процессе дробления отображается на NT-терминале.

При дроблении реализуются алгоритмы оптимизации, осуществляющие две задачи:

- для заданной производительности дробильного агрегата обеспечить минимальное электропотребление при произвольном временном варьировании массы, размеров и физических свойств вещества;
- обеспечить максимальную производительность дробильного агрегата с ограничением мощности электропотребления в системах автономного питания при произвольном временном варьировании массы, размеров и физических свойств вещества.

Для решения сформулированных задач оптимизации необходимо иметь математические модели дробильных агрегатов, отражающие физические и энергетические составляющие процесса дробления вещества.

Независимо от типов дробильных агрегатов их математическое описание имеет общую основу, которая в наибольшей степени выражена для роторных дробилок.

Для оптимизации процесса дробления необходимо иметь информацию о следующих переменных:

$m_1(t)$, $m_2(t)$ – соответственно текущих значениях масс вещества на входе и на выходе дробилки;

$\omega_p(t)$, $M_p(t)$, $i_p(t)$ – соответственно частоте вращения, моменте и токе ротора;

$N_c(t)$, $i_c(t)$ – мощности и токе электросети соответственно.

Размеры и физические свойства вещества непосредственно не измеряют, а оценивают косвенно в процессе управления. К ним относятся переменные $d_1(t)$, $\sigma_p(t)$, δ , характеризующие соответственно условный диаметр вещества на входе дробилки (при его представлении в шарообразном виде), предел прочности материала при растяжении, плотность дробимого вещества. Указанные переменные связаны между собой векторным оператором $F_{др}$, представляющим собой математическое описание дробилки как объекта оптимизации (рис. 7.1). Этот оператор использует поисковые методы и решает сформулированные ранее задачи оптимизации с векторным оператором $F_{БАО}$.

Блок оптимизации, реализуемый программным способом на промышленном компьютере, состоит из трёх модулей:

- оценки составляющих баланса энергии агрегата (оператор $F_{БЭЭ}$);
 - выработки оценки функционала качества (оператор $F_{БОК}$);
 - выработки управляющего воздействия (оператор $F_{ув}$)
- для реализации режима оптимизации.

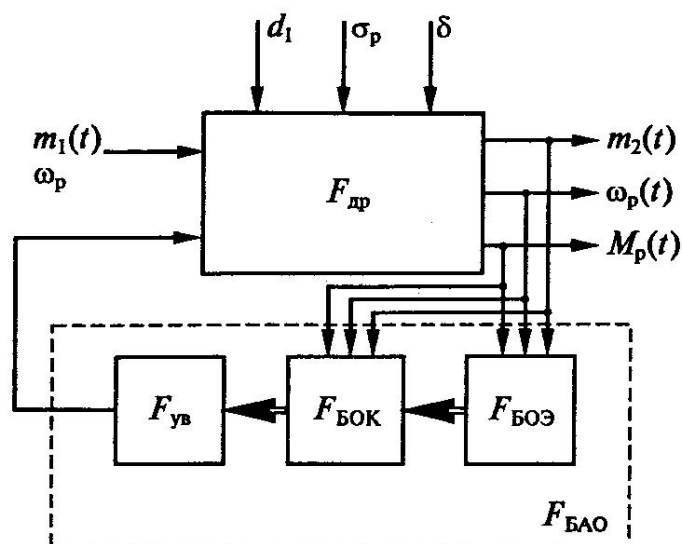


Рис. 7.1. Структурная схема управления дробилкой

В качестве алгоритма автоматической оптимизации используется метод прямого спуска (Хука – Дживса), имеющий по отношению к другим алгоритмам (деформируемого симплекса, градиентного спуска, наискорейшего спуска) преимущества в скорости и точности оптимизации.

В шаровых мельницах измельчение материала осуществляется падающими шарами, имеющими размер $d \leq \frac{D}{20}$, где D – диаметр барабана мельницы, м.

Мощность (кВт) электродвигателя мельницы

$$N = C_m \sqrt{\frac{D}{\eta}}, \quad (7.1)$$

где C – коэффициент, зависящий от заполнения барабана мельницы;

m – общая масса загрузки барабана мельницы ($m=1,1m$ для металлических мелющих тел; $m=2m$ для керамических мелющих тел; m_τ – масса мелющих тел, кг);

η – КПД электропривода.

Для привода крупных шаровых мельниц наиболее широко распространены безредукторные электроприводы с синхронными двигателями частотой вращения 10...12 об/мин и мощностью до 6 МВт.

8. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД СМЕСИТЕЛЕЙ

8.1. Особенности смесителей

Смесители предназначены для смешения различных жидкостей, для обеспечения равномерного распределения твёрдой фазы в жидкости, а также для интенсификации процессов растворения и химических реакций. Электроприводы агрегатов с перемешивающими устройствами часто работают в тяжёлых условиях окружающей среды: при повышенных температуре и влажности; при наличии агрессивных, пожаро- и взрывоопасных газов и пыли.

Для перемешивания порошковых материалов используются лопастные и барабанные смесители периодического действия; шнековые и центробежные смесители непрерывного действия.

Для смешения компонентов резиновых смесей с натуральными и синтетическими каучуками применяются резиносмесители. Требуемый диапазон регулирования скорости резиносмесителя составляет 3:1, точность стабилизации скорости – 5...10%. Резиносмеситель работает с различными смесями. При жёстких смесях требуются большие вращающие моменты, поэтому электродвигатель вращается с более низкими угловыми скоростями. При мягких смесях вращающие моменты небольшие и скорости вращения электродвигателя – более высокие. Поэтому в резиносмесителях часто требуется поддержание постоянного значения мощности во всём диапазоне изменения частоты вращения.

Широко применяются быстроходные резиносмесители с электродвигателями мощностью 800...1200 кВт.

Работа резиносмесителя осуществляется в окружающей среде с наличием тонкодисперсной токопроводящей пыли – сажи, поэтому электрооборудование, находящееся вблизи этого агрегата, должно иметь пыленепроницаемое исполнение.

8.2. Управление смесителями

Электропривод смесителя чаще всего выполняется нерегулируемым с асинхронным короткозамкнутым двигателем. При необходимости регулирования частоты вращения применяются механические вариаторы. Также для смесителей может применяться безредукторный электропривод с частотным управлением. Например, электроприводы резиносмесителей могут быть как нерегулируемыми, так и регулируемыми. Так как максимальные мощности электродвигателей современных резиносмесителей достигают 2500 кВт, то нерегулируемые электроприводы выполняются с синхронными электродвигателями, а регулируемые – с асинхронными.

Рассмотрим работу системы управления смесителем на примере резервуара для смешивания красок. Функциональная схема системы управления смесителем представлена на рис. 8.1.

Подача красок в верхнюю часть резервуара по питающим трубопроводам производится с помощью насосов 1 и 2. Готовая смесь красок вытекает из нижней части резервуара. Система управляет процессом наполнения, контролирует уровень наполнения и управляет циклами смешивания и нагревания.

Алгоритм процесса смешивания красок включает в себя следующие этапы:

- наполнить резервуар первой краской;
- наполнить резервуар второй краской;
- закончить подачу краски, если замкнут переключатель «Резервуар полный»;

- оставить насос включенным, если пусковой переключатель открыт;
- начать цикл нагрева и смешивания; включить электродвигатель смесителя и вентиль пара;
- выпустить готовую краску из резервуара;
- подсчитать циклы включения смесителя.

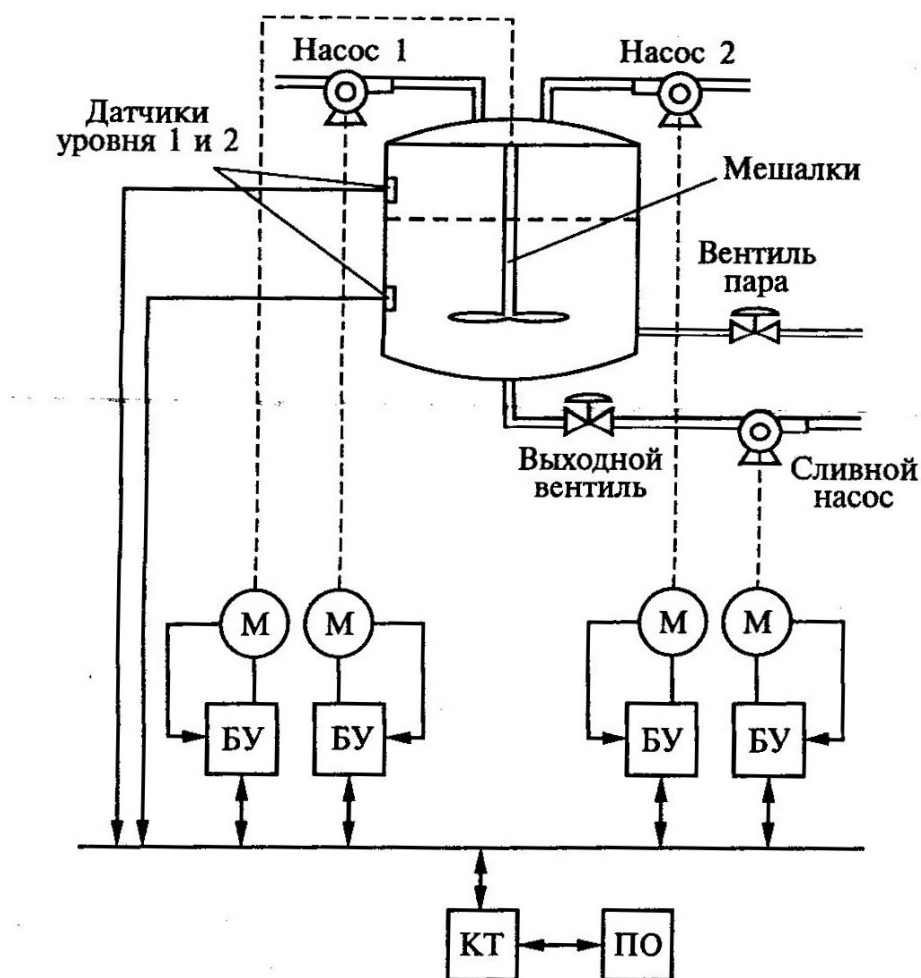


Рис. 8.1. Функциональная схема системы управления смесителем

На рис. 8.2. показана управляющая программа в виде релейных диаграмм (LD) для контроллера S7-200, который реализует вышеописанный алгоритм процесса смешивания.



Рис. 8.2. Программа реализации алгоритма процесса смешивания

9. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЦЕНТРИФУГ

9.1. Особенности центрифуг и сепараторов

Центрифуги применяются для разделения неоднородных взвесей на твёрдую и жидкую фазы под воздействием центробежных сил. По технологическому назначению они подразделяются на фильтрующие и осадительные. По характеру работы центрифуги могут быть периодического и непрерывного действия.

Сепараторы предназначены для центробежного разделения жидких смесей на более густую и более жидкую фазы.

Электрооборудование центрифуг обычно работает в условиях взрывоопасной, химически агрессивной окружающей среды с повышенной влажностью и запылённостью. Аппаратура, установленная на самих центрифугах, подвергается значительным вибрациям и тряске.

9.2. Управление центрифугами и сепараторами

Центрифуги непрерывного действия обычно имеют нерегулируемый электропривод. Для центрифуг с повышенными скоростями требуются преобразователи частоты для питания электродвигателей напряжением повышенной частоты.

Момент инерции центрифуг периодического действия может в 50...100 раз превышать момент инерции электродвигателя, причём в процессе функционирования центрифуги значение момента инерции значительно уменьшается в связи с выделением из обрабатываемого продукта жидкой фазы.

Основными требованиями к электроприводу центрифуг являются:

- обеспечение оптимальных динамических режимов при постоянных ускорении и замедлении центрифуги;

- стабилизация частоты вращения центрифуги при загрузке, выгрузке и фуговке.

Довольно часто по технологическим причинам требуется изменять значения максимальной скорости, а также скоростей загрузки и выгрузки. Мощности электродвигателей современных быстродействующих центрифуг периодического действия достигают 160 кВт .

Статический момент сопротивления центрифуги складывается из момента, затрачиваемого на механическое трение её ротора о воздух $M_{\text{ТВ}}$ ($\text{Н}\cdot\text{м}$), и момента, затрачиваемого на механическое трение вала в подшипниках $M_{\text{ТП}}$ ($\text{Н}\cdot\text{м}$):

$$M_{\text{ТВ}} = 23,5 \cdot 10^{-6} H D n^2 ; \quad (9.1)$$

$$M_{\text{ТП}} = 4.9 k_{\text{тр}} m_{\text{рп}} d , \quad (9.2)$$

где H – высота ротора центрифуги, м ;

D – диаметр ротора центрифуги, м ;

d – диаметр вала, м ;

$m_{\text{рп}}$ – масса ротора центрифуги с продуктом, кг ;

n – частота вращения ротора, мин^{-1} ;

$k_{\text{тр}} = 003 \dots 009$ – коэффициент трения, зависящий от вида подшипника.

Для центрифуг непрерывного действия при выборе мощности электродвигателя необходимо учитывать условия пуска.

Для центрифуг периодического действия при расчёте мощности электродвигателя необходимо учитывать динамические моменты, возникающие при переходных процессах и при больших моментах инерции центрифуг являющиеся довольно значительными.

Для центрифуг периодического действия широко применяются многоскоростные асинхронные двигатели, что позволяет упростить систему регулирования электропривода. Недостатком такого метода является отсут-

ствие плавного изменения скорости в зависимости от обрабатываемого продукта, а также отсутствие постоянного ускорения во время разгона.

Электропривод сепараторов обычно выполняется нерегулируемым с асинхронным короткозамкнутым двигателем. При необходимости регулирования частоты вращения применяется электропривод переменного тока с частотным управлением.

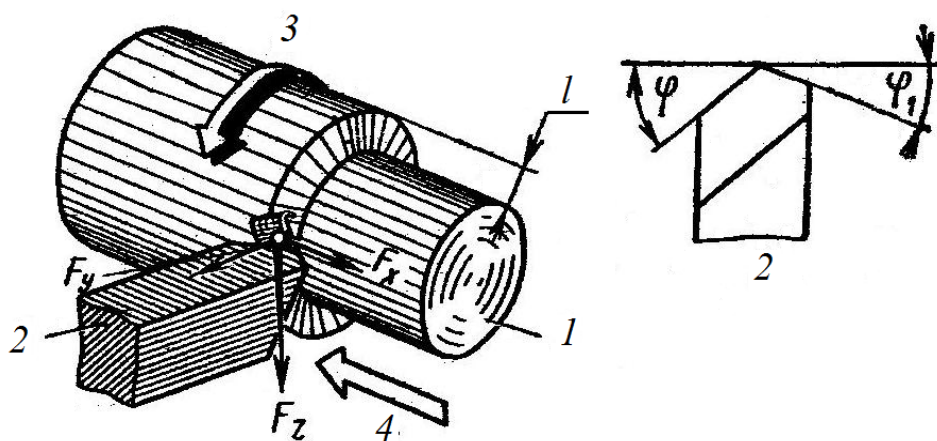
10. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

10.1. Особенности токарной обработки металла

При металлообработке изделий на станках принято выделять главное движение, движение подачи и вспомогательные движения.

При токарной обработке (точении) (рис. 10.1.) *главным движением* является вращение обрабатываемого изделия, *движением подачи* – прямолинейное перемещение резца. К *вспомогательным движениям* относятся:

- быстрый подвод и отведение каретки суппорта с режущими инструментами;
- зажим и отжатие обрабатываемого изделия;
- перемещение задней бабки.



1 – обрабатываемое изделие; 2 – резец; 3 – главное движение; 4 – движение подачи

Рис. 10.1. Схема точения

Скорость резания – скорость, с которой точка соприкосновения резца с обрабатываемым изделием перемещается по отношению к резцу.

Скорость резания зависит от качества обрабатываемого материала, материала резца и его геометрической формы, а также от способа и условий охлаждения резца и обрабатываемого изделия.

Скорость резания (*м/мин*) может быть определена по эмпирической формуле

$$v = \frac{C_v}{t^m l^{x_v} s^{y_v}} \quad (10.1.)$$

где *s* – **подача**, представляющая собой продольное перемещение резца, приходящееся на один оборот изделия, *мм/об*;

l – **глубина резания**, измеряемая расстоянием между обрабатываемой и обработанной поверхностями, *мм*;

t – **стойкость резца** (время его работы между двумя соседними по времени заточками), *мин*;

C_v – коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал и материал резца, а также вид токарной обработки (наружное точение, отрезка и т.д.);

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

Формула (10.1) справедлива при условии, что резец имеет углы в плане: главный $\varphi=45^\circ$, вспомогательный $\varphi_1=10^\circ$. Для резцов с иными углами в плане вводится соответствующий поправочный коэффициент. Кроме того, значение скорости резания, полученное по формуле (10.1), умножается на ряд других поправочных коэффициентов, учитывающих материал резца и изделия, особенности геометрии резца, его износ, термообработку заготовки и состояние её поверхности, условия охлаждения. Значения всех коэффициентов и показателей степеней определяются из справочника по режимам резания.

Подача и глубина резания принимаются:

- для обдирки $s=0,4 \dots 3 \text{ мм/об}$ и выше, $l=3 \dots 30 \text{ мм}$;
- для отделочных работ $s=0,1 \dots 0,4 \text{ мм/об}$, $l=0,1 \dots 2 \text{ мм}$.

Значения коэффициента C_v при обработке стали и чугуна:

- для твёрдосплавных резцов $C_v=39,5 \dots 262$,
- для резцов из быстрорежущей стали $C_v=18,2 \dots 53,7$.

Показатели степени:

$$\begin{aligned} m &= 0,1 \dots 0,2; \\ x_v &= 0,15 \dots 0,2; \\ y_v &= 0,35 \dots 0,84. \end{aligned}$$

В процессе снятия стружки резцом возникает усилие, приложенное под некоторым углом к режущей кромке инструмента (рис. 10.1). Это усилие может быть представлено в виде трёх составляющих:

F_x – осевое усилие (усилие подачи), преодолеваемое механизмом подачи;

F_y – радиальное усилие, создающее давление на суппорт;

F_z – тангенциальное усилие (усилие резания), преодолеваемое шпинделем станка.

Для расчёта усилия резания (H) используется эмпирическая формула

$$F_z = 9,81 C_F t^{x_F} s^{y_F} v^n, \quad (10.2)$$

где C_F – коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал, материал резца и вид токарной обработки;

t – стойкость резца, мин;

s – подача резца, мм/об;

v – скорость резания, м/мин;

Значения коэффициентов и показателей степеней находятся по справочнику. Например.

- При наружном точении или растачивании изделий из углеродистой стали:

- для резцов из быстрорежущей стали: $C_F = 208, n = 0$;

- для твёрдосплавных резцов: $C_F = 300, n = -0,15$;

- При наружном точении или растачивании изделий из серого чугуна:

- для резцов из быстрорежущей стали: $C_F = 118, n = 0$;

- для твёрдосплавных резцов: $C_F = 92, n = 0$.

Показатели степеней в обоих случаях имеют следующие значения:

$$x_F = 1, y_F = 0,75.$$

Также как и при определении скорости резания, в расчётную формулу для расчёта усилия резания (10.2) вводятся соответствующие поправочные коэффициенты, приводимые в справочнике по режимам резания.

Бóльшим скоростям резания соответствуют меньшие подачи и глубины резания и меньшие усилия резания. Меньшим скоростям резания соответствуют бóльшие усилия. Из этого следует, что мощность резания постоянна.

Радиальное усилие F_y , и усилие подачи F_x определяются по формулам, аналогичным формуле (10.2). Эти усилия, особенно осевое, по величине обычно бывают меньше усилия резания.

При расчётах усилий, действующих на механизм подачи, необходимо учесть, что механизм подачи, кроме собственно усилия подачи F_x , преодолевает также усилие трения, возникающее в направляющих суппорта от действий усилий F_x, F_y . Суммарное усилие F_n , необходимое для перемещения суппорта с резцом в направлении подачи:

$$F_n = F_x + \mu(F_x + F_y), \quad (10.3)$$

где μ – коэффициент трения в направляющих суппорта.

Мощность резания (κBm) зависит от скорости и от усилия резания:

$$P_z = \frac{F_z v}{60 \cdot 10^3} \quad (10.4)$$

Мощность подачи (*кВт*):

$$P_{\text{п}} = \frac{F_{\text{п}} v_{\text{п}}}{60 \cdot 10^3} = \frac{F_{\text{п}} \cdot 60 \omega \cdot s \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^3 \cdot 2\pi} = \frac{F_{\text{п}} \omega s \cdot 10^{-6}}{2\pi} \quad (10.5)$$

где $v_{\text{п}} = n \cdot s$ – скорость подачи *мм/мин*;

s – подача, *мм/об*,

$n = \frac{60 \omega}{2\pi}$ – скорость вращения изделия, *об/мин*;

$\omega = \frac{2\pi n}{60}$ – угловая скорость, *рад/с*.

Поскольку скорость подачи во много раз меньше скорости резания, то и мощность подачи по сравнению с мощностью резания очень мала [$P_{\text{п}} \approx (0,001 - 0,01) P_{\text{р}}$].

Технологическое (машинное) время обработки является важным фактором, определяющим работу станка.

Технологическое время (*мин*):

$$t_{\text{т}} = \frac{l_{\text{пр}}}{v_{\text{п}}} = \frac{l_{\text{пр}}}{n s}, \quad (10.6)$$

где $l_{\text{пр}}$ – длина прохода, *мм*;

$v_{\text{п}} = n \cdot s$ – скорость подачи *мм/мин*;

n – частота вращения изделия, *об/мин*;

s – подача, *мм/об*.

Частота вращения изделия пропорциональна скорости резания

$$n = \frac{v}{\pi d}, \quad (10.7)$$

поэтому с увеличением скорости резания уменьшается технологическое время и повышается производительность.

10.2. Особенности скоростного точения

Скоростное точение обусловлено высокими скоростями резания (300 – 400 м/мин и выше) и соответствующими подачами при использовании резцов, оснащённых режущими частями из твёрдых сплавов и минералокерамических пластин.

Скоростное резание металлов, по сравнению с обработкой инструментом из быстрорежущей стали, значительно повышает производительность и снижает себестоимость обработки. Так как минералокерамика обладает хрупкостью и может выкрашиваться, то для скоростного резания угол заострения резца увеличивают или, что, то же самое, уменьшают главный передний угол, а часто даже придают ему отрицательное значение. На рис.10.2 показаны профили резцов, применяемых при скоростном резании.

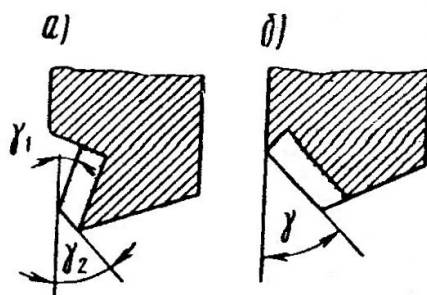


Рис.10.2 Геометрия резцов для скоростного точения

На рис. 10.2, а передний угол режущей части инструмента γ_1 имеет положительное значение при отрицательном угле фаски γ_2 . На рис. 10.2, б передний угол γ имеет отрицательное значение. Такая конфигурация режущей кромки изменяет направление действующих усилий, при этом уменьшаются опасные напряжения вблизи режущей кромки.

Реализации скоростного резания способствует максимальная автоматизация управления станком.

При скоростном точении возрастает мощность по сравнению с обработкой резцами из быстрорежущей стали. Например:

- при обработке углеродистой стали резцами из быстрорежущей стали при подаче $s = 0,25 \text{ мм/об}$, глубине резания $h = 1 \text{ мм}$ и скорости резания $v = 61 \text{ м/мин}$ усилие резания составляет $F_z = 695 \text{ Н}$, мощность резания $P_z = 0,7 \text{ кВт}$;

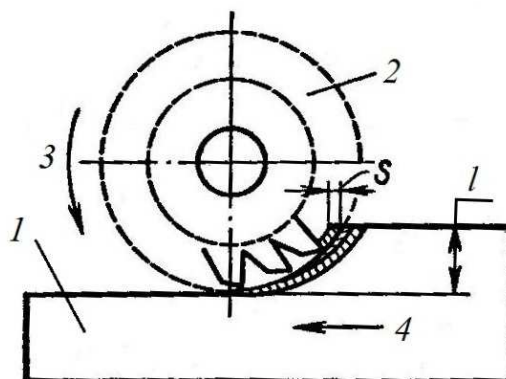
- при скоростной обработке углеродистой стали твердосплавными резцами при тех же подаче и глубине резания ($s = 0,25 \text{ мм/об}$, $h = 1 \text{ мм}$) допустимая скорость резания $v = 223 \text{ м/мин}$, усилие резания $F_z = 657 \text{ Н}$, мощность резания $P_z = 2,4 \text{ кВт}$.

Из сравнения этих данных видно, что при увеличении скорости резания в 3,7 раза, мощность резания возрастает в 3,4 раза.

Анализ формулы (10.6) показывает, что сокращение технологического времени возможно как за счёт увеличения скорости резания, так и за счёт увеличения подачи. Обработка изделия с большими подачами называется силовым резанием.

10.3. Особенности фрезерования

При фрезеровании *главным движением* является вращение режущего инструмента (фрезы), а *движением подачи* – перемещение обрабатываемого изделия (рис.10.3). Иногда движение подачи осуществляется перемещением шпиндельной бабки.



1 – обрабатываемое изделие; 2 – фреза; 3 – главное движение; 4 – движение подачи

Рис.10.3. Схема фрезерования

Вспомогательными движениями на фрезерных станках являются:

- быстрое перемещение стола при подводе детали к инструменту;
- возвращение стола в исходное положение после обработки;
- ускоренное перемещение шпиндельной бабки и др.

Особенность фрезерования заключается в том, что вращающийся относительно неподвижной оси инструмент – фреза – имеет несколько режущих зубьев, каждое из которых снимает стружку только в течение небольшой доли оборота фрезы, затем вращается вхолостую. Сечение стружки перед каждым зубом непрерывно изменяется от нуля до наибольшей величины.

Фрезерованием обрабатываются плоские поверхности, фасонные поверхности, кулачки, зубчатые колёса; нарезаются резьбы, прорезаются прямые и винтовые канавки и т.д. В зависимости от вида обрабатываемой поверхности используются фрезы различной конфигурации.

Скорость резания (м/мин) при фрезеровании определяется с помощью эмпирической формулы:

$$v = \frac{C_v d^q}{T^m s^{y_v} l^{x_v} B^k z^n}, \quad (10.8)$$

где C_v – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала, охлаждения фрезы и вида обработки (грубая или чистовая);

d – диаметр фрезы, мм;

s – подача на зуб фрезы, мм;

l – глубина резания (глубина снимаемого слоя металла за один проход), мм;

B – ширина фрезерования, мм;

z – количество зубьев фрезы;

T – стойкость фрезы, мин.

Стойкость фрезы для цилиндрических, торцевых, дисковых и фасонных фрез при обработке стали, ковкого чугуна, бронзы принимается $T=180$ мин; при обработке серого чугуна принимается $T=240$ мин.

Стойкость концевых фрез принимается соответственно $T=60$ мин и $T=90$ мин.

Значение коэффициента C_v и показателей степеней зависят:

- от вида фрезы (цилиндрическая, дисковая, торцевая, прорезная и т.д.);
- от обрабатываемого материала;
- от величины подачи;
- от качества фрезы;
- от наличия охлаждения.

Например, при обработке серого чугуна цилиндрической фрезой из быстрорежущей стали с подачей $s > 0,15$ мм без охлаждения применяются следующие значения коэффициентов:

$$C_v = 27; \quad q = 0,7; \quad m = 0,25; \quad x_v = 0,6; \quad y_v = 0,5; \quad k = 0,3; \quad n = 0,3.$$

С изменением вида фрезы при обработке того же материала изменяются и значения коэффициентов.

Усилие резания (H), то есть окружное усилие при фрезеровании, определяется согласно следующему выражению:

$$F_z = 9,81 C_F l^{x_F} s^{y_F} B z d^q. \quad (10.9)$$

Мощность резания (кВт):

$$P_z = C_P l^{x_P} s^{y_P} B z d^q n \cdot 10^{-5}. \quad (10.10)$$

Значения коэффициентов и показателей степени зависят от вида фрезы и от обрабатываемого материала: $C_F = 22,5 \dots 82,4$; $C_P = 1,15 \dots 4,22$; $x_F = 0,83 \dots 0,95$; $y_F = 0,65 \dots 0,8$; $q = -(0,83 \dots 1,14)$; $k = -(0,1 \dots 0,17)$.

При грубом фрезеровании на тяжёлых станках для цилиндрических фрез подача достигает $s = 0,2 \dots 0,6$ мм на зуб. Глубина фрезерования l достигает 15 мм и выше. Для станков пониженной жёсткости подача снижается и составляет примерно $0,02 \dots 0,08$ мм на зуб.

Необходимо отметить, что бóльшим подачам соответствуют мёньшие скорости резания и бóльшие мощности при той же глубине фрезерования.

Широко применяется *скоростное фрезерование*, значительно повышающее производительность. Фрезы для скоростного фрезерования обычно снабжены вставными зубьями с напаянными твердосплавными пластинками, осуществляющими снятие стружки. При скоростном фрезеровании мощность значительно возрастает в сравнении с обработкой того же материала фрезой из быстрорежущей стали. Скорости резания достигают 300...400 м/мин и выше.

Расчёт технологического (машинного) времени (*мин*) (например, для цилиндрического фрезерования) за один проход фрезы производится по формуле:

$$t_T = \frac{l_\phi + l_0 + l_\pi}{s_M}, \quad (10.11)$$

где l_ϕ – длина фрезерования, мм;

l_0 – длина врезания, мм;

l_π – перебег фрезы, мм;

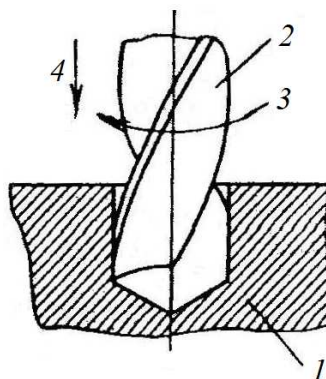
s_M – минутная подача, мм/мин.

Длина врезания определяется исходя из диаметра фрезы и глубины резания:

$$l_0 = \sqrt{l(d-l)}. \quad (10.12)$$

10.4. Особенности сверления

При сверлении (рис. 10.4) режущему инструменту сообщаются одновременно два движения: *главное движение* (вращение сверла) и *движение подачи* (продольное перемещение сверла).



1 – обрабатываемое изделие; 2 – сверло; 3 – главное движение; 4 – движение подачи

Рис. 10.4. Схема сверления

Вспомогательными движениями (например, в радиально-сверлильных станках) являются:

- быстрое перемещение траверсы;
- зажим колонны;
- перемещение шпиндельной бабки.

На агрегатных сверлильных станках к *вспомогательным движениям* можно отнести быстрое перемещение шпиндельных бабок (силовых головок).

Под **скоростью резания** понимается скорость на периферии сверла.

Подачей называется значение передвижения сверла вдоль его оси, приходящееся на один его оборот.

Скорость резания при сверлении (м/мин) находится по эмпирической формуле:

$$v = \frac{C_v d^{z_v}}{T^m s^{y_v}}, \quad (10.13)$$

где C_v – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и материала сверла;

d – диаметр сверла, мм;

T – стойкость сверла, мин;

s – подача, мм/об;

m, z_v, y_v – показатели степеней, зависящие от материала обрабатываемого изделия и диаметра сверла.

Стойкость сверла зависит от его диаметра и составляет от нескольких минут до 270 мин (у свёрл больших диаметров, около 60 мм).

Усилие подачи при сверлении (H) определяется по эмпирической формуле:

$$F_x = 9,81 C_F d^{z_F} s^{y_F}. \quad (10.14)$$

Вращающий момент ($H\cdot м$) определяется по следующей эмпирической формуле:

$$M = 9,81 C_M d^{1,9} s^{y_M} \cdot 10^{-3}. \quad (10.15)$$

Мощность резания (кВт):

$$P_z = \frac{M n}{9550}, \quad (10.16)$$

где M – вращающий момент, $H\cdot м$;

n – частота вращения сверла, об/мин.

Коэффициенты и показатели степеней, входящие в формулы (10.13 ÷ 10.15), находятся в справочнике по режимам резания. Их значения различны для разных материалов и зависят также от диаметра сверла. Например:

- для углеродистой стали $C_v = 7$, $C_M = 33,8$;
- для бронзы $C_v = 27,2$, $C_M = 12,2$;
- для разных марок стали $z_v = 0,4 - 0,6$, $y_v = 0,5 - 0,8$,
 $m = 0,125 - 0,2$ (большие значения относятся к меньшим диаметрам инструмента), $y_F = 0,7$, $y_M = 0,8$, $z_F = 0,4$.

Технологическое (машинное) время при сверлении определяется аналогично тому, как это производится при токарной обработке.

Технологическое время (мин):

$$t_{\text{т}} = \frac{l_{\text{пр}}}{v_{\text{п}}} = \frac{l_{\text{пр}}}{n s}, \quad (10.17)$$

где $l_{\text{пр}}$ – длина прохода, мм;

n – частота вращения сверла, об/мин;

s – подача, мм/об.

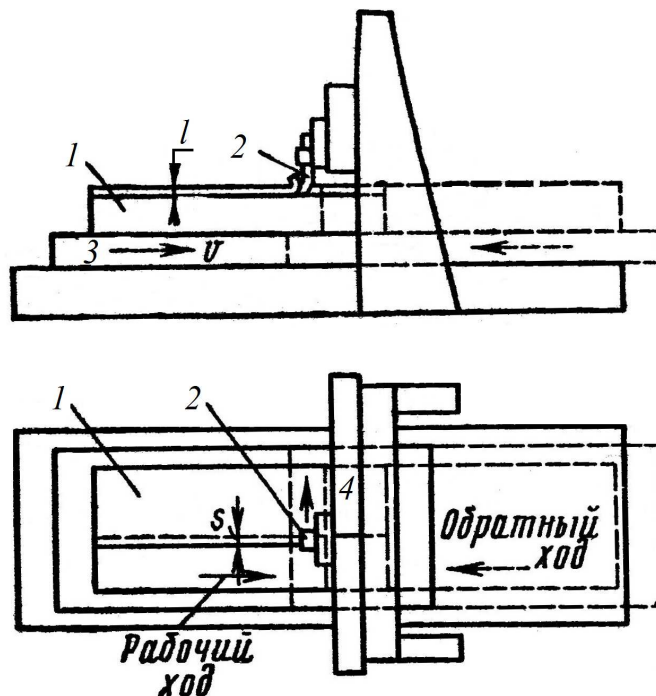
Частота вращения сверла пропорциональна скорости резания

$$n = \frac{v}{\pi d}, \quad (10.18)$$

поэтому с увеличением скорости резания уменьшается технологическое время и повышается производительность.

10.5. Особенности строгания

При строгании (рис. 10.5) снятие стружки происходит в течение рабочего хода, при обратном ходе резец не работает.



1 – обрабатываемое изделие; 2 – резец; 3 – главное движение; 4 – движение подачи

Рис. 10.5. Схема строгания

Главным движением на строгальных станках является продольное перемещение стола при рабочем ходе.

Движением подачи на строгальных станках является перемещение резца перпендикулярно главному движению в течение одного двойного хода.

Вспомогательными движениями на строгальных станках являются:

- быстрое перемещение траверсы и суппортов;
- подъём резца при обратном ходе;
- медленное перемещение стола при наладочных операциях.

Скорость резания – скорость, с которой резец перемещается относительно детали при рабочем ходе.

Глубина резания – расстояние, на которое углубляется резец в изделие при одном проходе. Она определяет толщину снимаемой стружки.

При строгании подача s и глубина резания l принимаются:

- для черновой обработки: $s = 1 - 7 \text{ мм/дв. ход}$, $l = 6 - 30 \text{ мм}$;
- для чистовой обработки широкими резцами $s = 10 - 30 \text{ мм/дв. ход}$ и выше, $l = 0,05 - 0,3 \text{ мм}$;

Определение скорости, усилия и мощности резания производится по формулам, аналогичным тем, которые приведены для точения.

Технологическое (машинное) время (*мин*) за один двойной ход:

$$t_{\tau} = \frac{B + B_0}{i \cdot s}, \quad (10.19)$$

где B – ширина строгания, *мм*;

B_0 – путь подачи при входе резца в изделие и выходе из него, *мм*;

i – частота двойных ходов стола (количество двойных ходов в минуту), *дв. ход/мин*;

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

Для повышения производительности строгальных станков следует при заданной подаче увеличивать количество двойных ходов стола.

Так как при строгании резец испытывает ударную нагрузку, то такие высокие скорости, какие используются при скоростном точении, при строгании не допускаются. Скорости резания при строгании составляют 75–120 м/мин.

10.6. Особенности круглого шлифования

При шлифовании *главное движение* сообщается шлифовальному кругу, а *движением подачи* является его поступательное перемещение.

Движение подачи может быть осуществлено также при поступательном перемещении обрабатываемой детали относительно шлифовального круга.

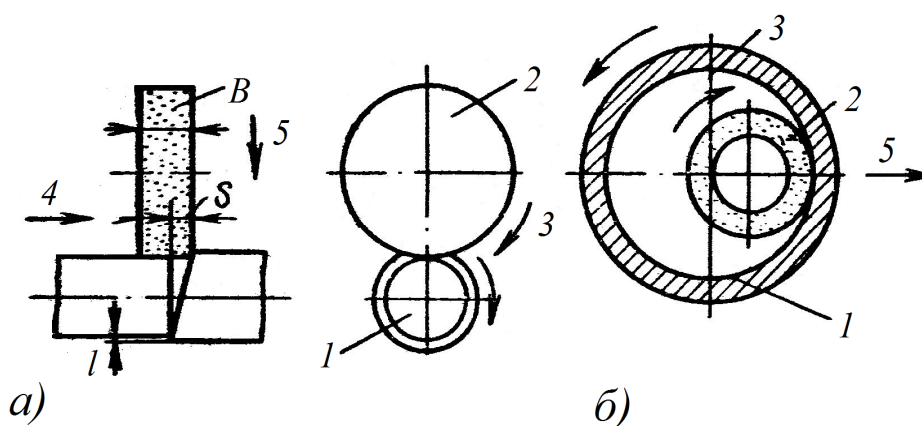
Вспомогательными движениями на шлифовальных станках являются:

- быстрое перемещение шлифовальной бабки;
- перемещение стола и др.

В соответствии с различными видами обработки различают:

- круглое наружное шлифование;
- круглое внутреннее шлифование;
- плоское шлифование.

Наружное и внутреннее шлифование схематически показаны на рис.10.6.



1 – обрабатываемое изделие; 2 – шлифовальный круг; 3 – главное движение;

4 – продольная подача; 5 – поперечная подача

Рис.10.6. Схема круглого шлифования

При наружном круглом шлифовании (рис.10.6, а), а также внутреннем круглом (рис.10.6, б) процесс обработки изделий по длине, превышающей ширину B шлифовального круга, связан с перемещением круга на соответствующую глубину резания и продольной подачей изделия или шлифовального круга. Для улучшения качества обработки изделия ему сообщается вращение в сторону, противоположную вращению шлифовального круга.

Окружная скорость изделия ($м/мин$) при круглом (наружном или внутреннем) шлифовании определяется по формуле

$$v_{\text{и}} = \frac{C_v d_{\text{и}}^v}{T^m l^{x_v} s^{y_v}}, \quad (10.20)$$

где $d_{\text{и}}$ – диаметр обрабатываемого изделия, $мм$;

T – стойкость шлифовального круга, $мин$;

l – глубина шлифования (поперечная подача) на один двойной ход, $мм$;

s – продольная подача на один оборот изделия, $мм$.

Например, для наружного круглого шлифования окружная скорость изделия ($м/мин$) при поперечной подаче круга на двойной ход стола и грубом шлифовании закалённой стали

$$v_{\text{и}} = \frac{0,7 d_{\text{и}}^{0,5}}{T^{0,5} l^{0,5} s^{0,6}};$$

при внутреннем шлифовании и тех же условиях обработки окружная скорость изделия ($м/мин$)

$$v_{\text{и}} = \frac{0,054 d_{\text{и}}^{0,5}}{T^{0,5} l^{0,3} s_{\text{д}}^{0,9}},$$

где $s_{\text{д}}$ – продольная подача на один оборот изделия в долях ширины круга.

Наибольшие значения окружной скорости соответствуют наибольшим диаметрам и минимальным подачам и, наоборот, меньшие окружные скоро-

сти соответствуют минимальным диаметрам и наибольшим подачам. Например:

при обработке изделий из закалённой стали при стойкости шлифовального круга $T=15$ мин,

при постоянной продольной подаче, равной 0,5 ширины круга,

при изменении глубины шлифования в пределах от 0,015 до 0,005 мм на один двойной ход стола,

окружная скорость изделия при наружном шлифовании должна изменяться в пределах от 6 до 52 м/мин. Отмеченное изменение окружной скорости изделия относится к соответствующему изменению диаметров шлифуемого изделия от 20 до 300 мм.

Скорость резания v , определяемая окружной скоростью шлифовального круга, изменяется в сравнительно малых пределах и составляет в среднем 30–50 м/с, а иногда и выше – до 75 м/с. При таких высоких скоростях резания при шлифовании допускаются малые глубины шлифования.

Для наружного круглого шлифования **глубина резания** (шлифования) за один продольный ход принимается:

- при черновом шлифовании $l = 0,01–0,025$ мм;
- при чистовом шлифовании $l = 0,005–0,015$ мм.

Для внутреннего шлифования глубина резания на один двойной ход принимается:

- при черновом шлифовании $l = 0,005–0,02$ мм;
- при чистовом шлифовании $l = 0,002–0,01$ мм.

Соответственно продольные подачи в долях ширины круга:

- для чернового шлифования $s_d = 0,75–0,40$ мм;
- для чистового шлифования $s_d = 0,75–0,40$ мм

(бóльшие значения относятся к бóльшим диаметрам и наоборот).

Мощность резания (кВт)

$$P_z = C_P v_n^k s^{y_P} l^{x_P}. \quad (10.21)$$

Мощность резания (κBm) для наружного круглого шлифования (черновая обработка) изделий из закалённой стали

$$P_z = 1,25 v_n^{0,75} s^{0,5} l^{0,55}$$

Мощность резания при внутреннем шлифовании закалённой стали

$$P_z = 0,35 v_n^{0,35} s^{0,4} l^{0,4} d_n.$$

Мощность резания изменяется в значительно меньших пределах, чем изменяются диаметры обрабатываемого изделия. Например, при изменении диаметра от 20 до 300 мм и выборе оптимальной окружной скорости изделий мощность резания при наружном шлифовании изменяется от 3,6 до 5,9 κBm (меньшее значение относится к меньшему диаметру, большее – к большему диаметру).

10.7. Особенности плоского шлифования

Плоское шлифование может осуществляться двумя способами:

- шлифование периферией круга;
- шлифование торцом круга.

10.7.1. Плоское шлифование периферией круга

При плоском шлифовании периферией круга (рис.10.7) *главное движение* сообщается шлифовальному кругу, вращающемуся относительно неподвижной оси. Поперечная подача осуществляется перемещением шлифовального круга. Стол, на котором закрепляется обрабатываемое изделие, совершает возвратно-поступательное перемещение, выполняя продольную подачу.

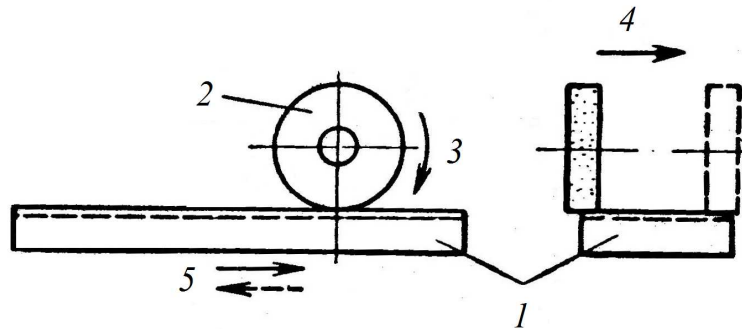
Скорость изделия (стола) ($м/мин$) определяется по эмпирической формуле

$$v_n = \frac{C_v}{T^m s_d l^{x_v}}, \quad (10.22)$$

где T – стойкость шлифовального круга, *мин*;

l – глубина шлифования (поперечная подача) на один двойной ход, *мм*;

s_d – продольная подача в долях ширины круга, *мм*.



1 – обрабатываемое изделие; 2 – шлифовальный круг; 3 – главное движение;

4 – поперечная подача; 5 – продольная подача

Рис.10.7. Схема плоского шлифования периферией круга

Например, при черновой обработке закалённой стали скорость изделия (*м/мин*)

$$v_{\text{и}} = \frac{2,25}{T^{0,7} s_d l^{0,75}},$$

соответственно, мощность резания (*кВт*)

$$P_z = 0,66 v_{\text{и}} s^{0,8} l^{0,8}.$$

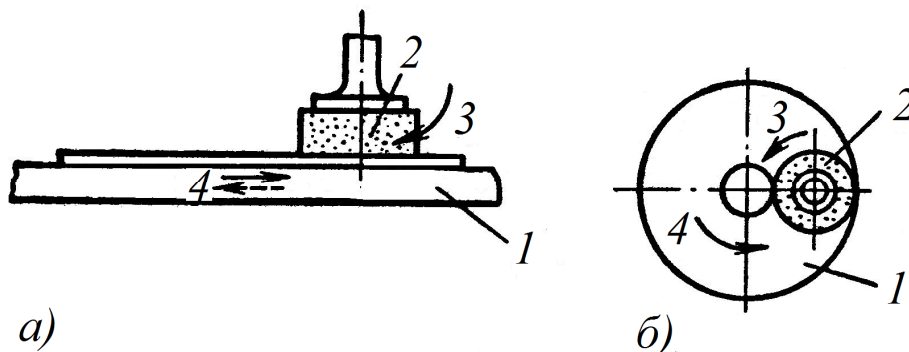
Скорость плоского шлифования, также как и круглого, составляет 30–50 *м/с*.

Обработка изделий периферией круга производится также на станках с круглым столом. При этом обрабатываемая деталь закрепляется на столе и вращается вместе с ним. При этом имеется *два движения подачи*:

- вращение детали;
- прямолинейное перемещение шлифовального круга в радиальном направлении.

10.7.2. Плоское шлифование торцевой частью круга

При плоском шлифовании торцевой частью круга на станках с прямоугольным и круглым столом (рис.10.8) *главное движение* выполняется вращением шлифовального круга.



а – на станках с прямоугольным столом; *б* – на станках с круглым столом;
1 – стол с обрабатываемыми изделиями; *2* – шлифовальный круг; *3* – главное движение;
4 – движение подачи

Рис.10.8. Схема плоского шлифования торцом круга

Движение подачи на станках с прямоугольным столом осуществляется за счёт возвратно-поступательного движения стола с закреплённым на нём изделием (рис.10.8, *а*).

Если ширина обрабатываемой поверхности превышает диаметр шлифовального круга, то следует осуществить также и поперечную подачу. Вертикальное перемещение шлифовального круга, осуществляемое за каждый ход стола (двойной или, иногда, одинарный), соответствует требуемой глубине шлифования.

Скорость возвратно-поступательного перемещения стола определяется по той же формуле (10.22), как и для плоского шлифования периферией круга.

При плоском шлифовании на станках с круглым столом подача изделия совершается за счёт вращения стола (рис. 10.8, *б*). Перемещение шлифовального круга за один оборот стола соответствует глубине шлифования. Из-

делие совершает вращательное движение в сторону, противоположную направлению вращения шлифовального круга.

Скорость (*м/мин*) изделия (стола):

$$v_{\text{и}} = \frac{C_v}{T^m B_{\text{п}}^k l}, \quad (10.23)$$

где $B_{\text{п}}$ – приведённая ширина шлифования (*мм*), определяемая по формуле:

$$B_{\text{п}} = \frac{F_{\text{и}} z}{\pi d_{\text{ср}}}, \quad (10.24)$$

где $F_{\text{и}}$ – площадь поверхности шлифования одного обрабатываемого изделия, *мм*²;

z – количество изделий, шлифуемых одновременно;

$d_{\text{ср}}$ – диаметр средней окружности расположения деталей на столе, *мм*.

Например, при обработке закалённой стали в формуле (10.23) коэффициенты могут иметь следующие значения: $C_v=13$, $m = 0,45$, $k = 0,5$.

Глубины резания при шлифовании торцом круга при черновом шлифовании находятся в следующем диапазоне: $l = 0,015\text{--}0,03$ *мм*.

Мощность резания ($\kappa B m$) при обработке закалённой стали:

$$P_z = 3,58 v_{\text{и}}^{0,3} B_{\text{п}}^{0,3} l^{0,25}. \quad (10.25)$$

Технологическое время (*мин*) при наружном круглом шлифовании с продольной подачей:

$$t_{\text{т}} = \frac{L h k}{n_{\text{и}} s_{\text{д}} B_{\text{кр}} l}, \quad (10.26)$$

где L – длина продольного хода стола, *мм*;

h – припуск на сторону, *мм*;

$n_{\text{и}}$ – частота вращения изделия, *об/мин*;

$B_{\text{кр}}$ – ширина шлифовального круга, *мм*;

$s_{\text{д}}$ – продольная подача в долях ширины круга на один оборот изделия;

l – поперечная подача (глубина шлифования), *мм*.

k – поправочный коэффициент, учитывающий износ шлифовального круга, упругие деформации шлифуемых изделий и узлов станка. Для грубого шлифования $k = 1,2\text{--}1,4$; для чистового шлифования $k = 1,25\text{--}1,7$.

Технологическое время (*мин*) при плоском шлифовании периферией круга на прямоугольном столе с поперечной подачей:

$$t_{\text{т}} = \frac{H L h k}{1000 v_{\text{ст}} s_{\text{д}} B_{\text{кр}} l}, \quad (10.27)$$

где H – величина поперечного хода круга, мм: $H = B_{\text{и}} + B_{\text{кр}} + 5$;

$B_{\text{и}}$ – ширина обрабатываемой поверхности изделия, мм;

$B_{\text{кр}}$ – ширина шлифовального круга, мм;

L – длина хода стола, мм: $L = l_{\text{ф}} + (10 \div 15)$;

$l_{\text{ф}}$ – фактическая длина обработки

l – поперечная подача (глубина шлифования), мм.

$s_{\text{д}}$ – продольная подача в долях ширины круга;

k – поправочный коэффициент, учитывающий износ шлифовального круга, упругие деформации шлифуемых изделий и узлов станка. Для грубого шлифования $k = 1,15\text{--}1,35$; для чистового шлифования $k = 1,25\text{--}1,5$.

Технологическое время (*мин*) при плоском шлифовании торцевой частью круга на круглом столе (при периодической загрузке деталей):

$$t_{\text{т}} = \frac{h k}{n_{\text{ст}} l}, \quad (10.28)$$

где h – общий припуск на обработку, мм;

$n_{\text{ст}}$ – частота вращения стола, об/мин;

l – поперечная подача (глубина шлифования), мм;

k – поправочный коэффициент, учитывающий износ шлифовального круга, упругие деформации шлифуемых изделий и узлов станка. Для грубого шлифования $k = 1,2\text{--}1,35$; для чистового шлифования $k = 1,2\text{--}1,5$.

10.8. Определение мощности электроприводов для типовых механизмов станка

Правильный выбор мощности электродвигателя является важным и ответственным делом, поскольку недостаточная мощность электродвигателя ограничивает производительность станка, и, кроме того, электродвигатель с недостаточной мощностью преждевременно выходит из строя, что приводит к простоему оборудования и дополнительным расходам на ремонт. Электродвигатель с завышенной мощностью не полностью использует свой КПД и имеет сниженный $\cos \varphi$, а также увеличенные капитальные и эксплуатационные расходы.

Для определения мощности на валу главного привода при установившемся режиме необходимо к рассчитанной мощности резания прибавить мощность, обусловленную потерями в механизме передач станка. Для расчёта мощности потерь в станке пользуются значением КПД, зависящего при данной нагрузке от количества звеньев кинематической системы и от скорости механизма.

Общий номинальный КПД станка определяется как произведение коэффициентов полезного действия всех его звеньев:

$$\eta_{н.ст} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_i. \quad (10.29)$$

где $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ - КПД отдельных звеньев кинематической цепи станка при полной (номинальной) нагрузке станка.

Значения КПД отдельных звеньев передач (с учётом потерь в опорах) принимаются приблизительно равными:

- для открытой ремённой передачи без натяжного ролика $\eta=0,96$;
- для открытой ремённой передачи с натяжным роликом $\eta=0,94$;
- для клиноремённой передачи $\eta=0,93-0,95$;
- для зубчатой передачи с опорами трения качения $\eta=0,975-0,985$;
- для зубчатой передачи с опорами трения скольжения $\eta=0,96-0,97$;
- для червячной передачи $\eta = 0,5 - 0,7$;

- для цепной зубчатой передачи $\eta = 0,97-0,98$;
- для цепной роликовой передачи $\eta = 0,96-0,97$;
- для кривошипно-шатунного механизма $\eta = 0,9$.

КПД станка также зависит от скорости его рабочих органов. При одинаковой нагрузке, но больше скорости, КПД станка имеет меньшее значение (рис. 10.9).

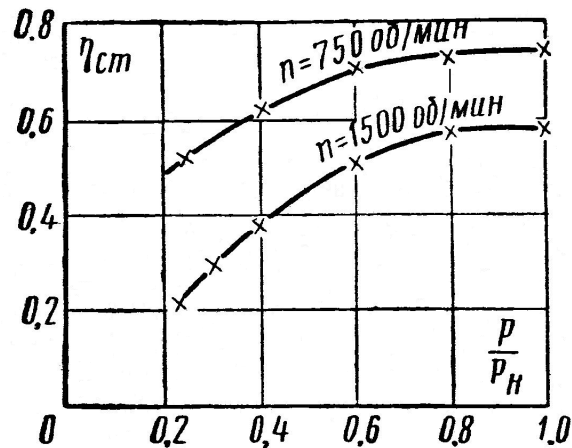


Рис.10.9. Зависимость КПД передач станка от нагрузки при различных скоростях привода

Приведённые ориентировочные значения коэффициентов полезного действия относятся к кинематической цепи главного привода. КПД цепи подачи всегда имеет в несколько раз более низкое значение. Это связано с необходимостью получения довольно низких скоростей подач и с применением в связи с этим замедляющих передач, имеющих низкий КПД. В станках со сложной кинематической схемой при увеличении скорости потери имеют большее значение, чем в станках с более простой кинематической цепью.

Мощность на валу главного привода при установившемся режиме и номинальной мощности резания:

$$P_H = \frac{P_{Hz}}{\eta_{н.ст}}, \quad (10.30)$$

где P_{Hz} – номинальная мощность резания, кВт ;

$\eta_{\text{н.ст}}$ – КПД станка при номинальной нагрузке.

Так как нагрузка станка часто бывает переменной и отличается от номинальной, то необходимо определять КПД для различных нагрузок.

Потери мощности в станке при любой нагрузке P_z :

$$\Delta P = aP_{\text{нз}} + bP_z, \quad (10.31)$$

где a и b – коэффициенты соответственно постоянных и переменных потерь мощности.

Обозначив коэффициент загрузки станка $k = \frac{P_z}{P_{\text{нз}}}$, получим потери мощности

$$\Delta P = P_z \left(\frac{a}{k} + b \right). \quad (10.32)$$

КПД станка при любой нагрузке P_z :

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{P_z}{P_z + \Delta P} = \frac{1}{1 + \frac{a}{k} + b}. \quad (10.33)$$

В частном случае, когда коэффициент загрузки номинальный, $k = 1$, КПД станка:

$$\eta_{\text{н.ст}} = \frac{1}{1 + a + b}. \quad (10.34)$$

Для определения коэффициентов a и b выполним следующие преобразования.

Умножим обе части уравнения (2.6) на $1 + a + b$ и раскроем скобки:

$$\eta_{\text{ст}}(1 + a + b) = 1,$$

$$\eta_{\text{н.ст}} + a\eta_{\text{н.ст}} + b\eta_{\text{н.ст}} = 1.$$

Перенесём $\eta_{\text{н.ст}}$ в правую часть уравнения, а в левой вынесем его за скобки:

$$\eta_{\text{н.ст}}(a + b) = 1 - \eta_{\text{н.ст}}.$$

Разделив обе части уравнения на $\eta_{\text{н.ст}}$, получим:

$$a + b = \frac{1 - \eta_{\text{н.ст}}}{\eta_{\text{н.ст}}}. \quad (10.35)$$

Для практических расчётов ориентировочно принимается:

$$\left. \begin{aligned} a &= 0,6(a + b); \\ b &= 0,4(a + b). \end{aligned} \right\} \quad (10.36)$$

Заменим в правой части уравнения (10.36) сумму на её значение из уравнения (10.35), получим выражения для расчёта коэффициентов постоянных и переменных потерь мощности:

$$\left. \begin{aligned} a &= 0,6 \left(\frac{1 - \eta_{\text{н.ст}}}{\eta_{\text{н.ст}}} \right); \\ b &= 0,4 \left(\frac{1 - \eta_{\text{н.ст}}}{\eta_{\text{н.ст}}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (10.37)$$

Номинальный КПД токарных, фрезерных, сверлильных станков при полной нагрузке составляет в среднем приблизительно $\eta_{\text{н.ст}} = 0,7\text{--}0,8$;

Номинальный КПД шлифовальных станков $\eta_{\text{н.ст}} = 0,8\text{--}0,9$;

Номинальный КПД строгальных и долбежных станков $\eta_{\text{н.ст}} = 0,65\text{--}0,75$.

Для станков, в которых имеются массивные движущиеся части, необходимо дополнительно учитывать потери мощности на трение в направляющих (κBm):

$$\Delta P_{\text{тр}} = \frac{G \mu v}{60 \cdot 1000}, \quad (10.38)$$

где G – вес движущихся частей, H ;

$\mu = 0,05\text{--}0,1$ – коэффициент трения;

v – скорость передвижения, $м/мин$.

В связи с тем, что большинство станков работает с переменной нагрузкой и в различных режимах (длительном, кратковременном, повторно-кратковременном), выбор электропривода и расчёт его мощности необходи-

мо производить в каждом отдельном случае с учётом конкретных технологических условий работы того или иного станка.

Существует несколько методов определения мощности двигателей для станков. Для определения мощности электроприводов, работающих как в длительном, так и повторно-кратковременном режимах, чаще всего используются методы эквивалентных величин и средних потерь. При этом расчёт мощности электродвигателя основывается на применении нагрузочных диаграмм, построенных для установившегося режима работы электропривода (диаграммы статической нагрузки электропривода). По нагрузочным диаграммам производится предварительный выбор мощности двигателя. Затем выбранный двигатель проверяется по нагреву и допустимой перегрузке с учётом переходных процессов.

10.9. Построение нагрузочной диаграммы и определение мощности электропривода токарного станка

Пусть требуется определить мощность двигателя для токарного станка, обрабатывающего деталь, эскиз которой изображён на рис. 10.10.

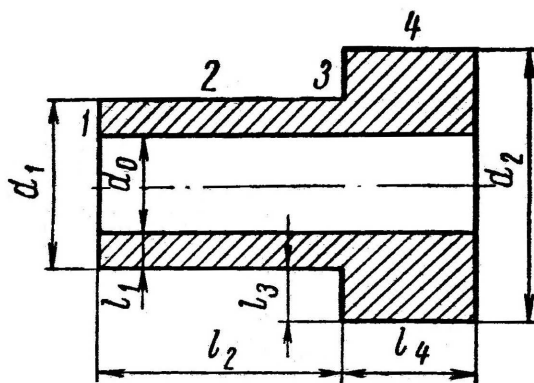


Рис. 10.10. Эскиз детали, обрабатываемой на токарном станке

Токарная операция обработки детали состоит из четырёх переходов (рис. 10.10.):

1 – подрезка;

2 – обточка цилиндрической поверхности;

3 – подрезка;

4 – обточка цилиндрической поверхности.

Будем считать, что управление станком, связанное с выполнением разных переходов, а также с измерением обрабатываемого изделия и заменой одного изделия другим, производится при работающем вхолостую двигателе. КПД станка при полной нагрузке принимается равным $\eta_{н.ст.}$

По технологическим условиям известны материал детали, характер обработки, тип и геометрия резца, частота вращения шпинделя, размер обработки и значения глубины резания и подачи для каждого перехода (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Номер перехода	Длина обработки, мм	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Примечания
1	$l_1 = \frac{d_1 - d_0}{2} =$	$h_1 =$	$s_1 =$	Для упрощения расчётов можно считать: $h_1 = h_3$; $h_2 > h_4$; $s_2 = s_4$; $s_1 < s_3$
2	$l_2 =$	$h_2 =$	$s_2 =$	
3	$l_3 = \frac{d_2 - d_1}{2} =$	$h_3 =$	$s_3 =$	
4	$l_4 =$	$h_4 =$	$s_4 =$	

Для каждого перехода определяются скорость резания, усилие резания и мощность резания по формулам (10.1), (10.2), (10.4). Коэффициенты и показатели степеней находятся из справочника по режимам резания. Если заданные по технологическим условиям значения глубины резания и подачи для соответствующих переходов совпадают с приведёнными в картах справочника, то в этом случае можно непосредственно, без расчёта, выписать из карт значения скорости, усилия и мощности резания в табл. 10.2.

Таблица 10.2.

Номер перехода	Усилие резания, H	Скорость резания, $м/мин$	Мощность резания, $кВт$
1	$F_{z1}=$	$v_1=$	$P_{z1}=$
2	$F_{z2}=$	$v_2=$	$P_{z2}=$
3	$F_{z3}=$	$v_3=$	$P_{z3}=$
4	$F_{z4}=$	$v_4=$	$P_{z4}=$

Делаем допущение, что наибольшей мощности соответствует номинальный коэффициент полезного действия. КПД для разных нагрузок находится по формуле (10.34) с применением формулы (10.36).

Технологическое время для каждого перехода определяется согласно формуле (10.6):

$$t_T = \frac{l_{пр}}{v_n} = \frac{l_{пр}}{n s} \quad t_T = \frac{l}{n s},$$

где $n = 1000 \frac{v}{\pi d}$ - частота вращения шпинделя, $об/мин$.

Полученные данные сводятся в таблицу 10.3.

Таблица 10.3

Номер перехода	Коэффициент загрузки k	КПД η	Мощность на валу двигателя $P, кВт$	Частота вращения шпинделя, $n, об/мин$	Технологическое время $t_T, мин$
1	$k_1=$	$\eta_1=$	$P_1=$	$n_1=$	$t_{T1}=$
2	$k_2=1$	$\eta_2= \eta_{н.ст}$	$P_2=$	$n_2=$	$t_{T1}=$
3	$k_3=$	$\eta_3=$	$P_3=$	$n_3=$	$t_{T1}=$
4	$k_4=$	$\eta_4=$	$P_4=$	$n_4=$	$t_{T1}=$

В табл. 10.3 приведены частоты вращения шпинделя, полученные в соответствии с оптимальной скоростью резания для каждого перехода. Если, согласно паспорту станка, частоты вращения шпинделя отличаются от рас-

чётных, то, выбрав по паспорту ближайшие значения частот вращения, следует произвести соответствующий перерасчёт скорости резания, мощности и машинного времени.

Для построения нагрузочной диаграммы электропривода необходимо учесть периоды пауз. Если считать, что двигатель не отключается, то его нагрузка в периоды пауз обусловлена потерями холостого хода станка.

Мощность на валу двигателя при холостом ходе (κBm) равна произведению номинальной мощности резания на коэффициент постоянных потерь:

$$P_0 = a P_{\text{нз}} . \quad (10.38)$$

Паузы в работе станка определяются по нормативам вспомогательного и подготовительно-заключительного времени, в соответствии с которым необходимо учесть следующие затраты времени:

- время на установку детали;
- время на промер при продольной и поперечной обточках;
- время на снятие детали;
- вспомогательное время на управление станком.

Определив суммарное время на вспомогательные операции и распределив его равномерно между рабочими переходами, строится нагрузочная диаграмма электродвигателя (рис. 10.11).

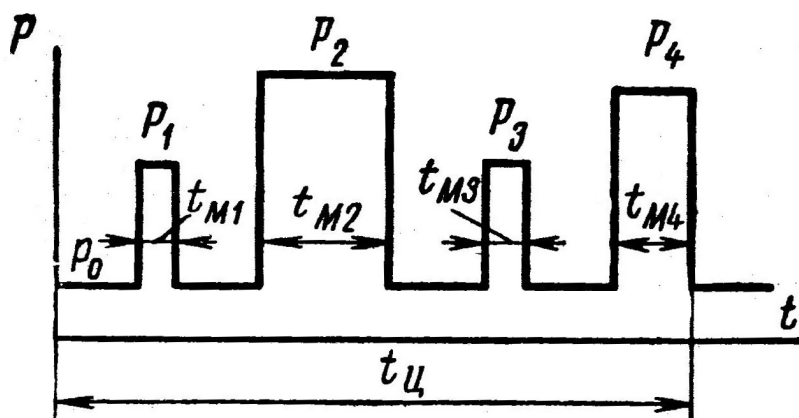


Рис. 10.11. Нагрузочная диаграмма электропривода токарного станка

10.10. Расчёт мощности электродвигателя методом средних потерь

При переменной нагрузке и использовании короткозамкнутого асинхронного электродвигателя переменного тока рассчитывать мощность необходимо методом средних потерь. Этот метод может применяться, когда электродвигатель работает в непрерывном режиме, без отключения от сети, а также если двигатель работает в повторно-кратковременном режиме.

Метод средних потерь заключается в следующем. По каталогу выбирается электродвигатель исходя из среднего значения нагрузки за цикл:

$$P_{\text{д}} \approx (1,2 - 1,3) P_{\text{ср}}, \quad (10.39)$$

затем проверяется его мощность следующим образом.

Если двигатель работает в непрерывном режиме, тогда с помощью кривой зависимости коэффициента полезного действия двигателя от нагрузки строится график потерь мощности в двигателе $\Delta P = f(t)$ для всего цикла. По этому графику определяются средние потери за цикл (κBm):

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta P_i t_i}{t_{\text{ц}}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, \quad (1.40)$$

где ΔP_i – потери мощности в каждый конкретный момент времени;

t_i – значение каждого конкретного момента времени;

$t_{\text{ц}}$ – время цикла работы электродвигателя.

Проверка предварительно выбранного двигателя по нагреву выполняется по условию:

$$\Delta P_{\text{д}} \geq \Delta P_{\text{ср}} \quad (10.41)$$

Если двигатель работает в повторно-кратковременном режиме с частыми чередованиями установившегося режима, выключения, торможения, остановки и последующего включения, тогда формула для определения средних потерь имеет следующий вид:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum \Delta A_{\Pi} + \sum \Delta A_{\tau} + \sum \Delta P t}{t'_{\Pi}} = \frac{\sum \Delta A_{\Pi} + \sum \Delta A_{\tau} + \sum \Delta P t}{\alpha \sum t_0 + \frac{1+\alpha}{2} \sum (t_{\Pi} + t_{\tau}) + \sum t}, \quad (10.42)$$

где ΔA_{Π} – потери энергии за один пуск при заданной нагрузке;

ΔA_{τ} – потери энергии за один период торможения при заданной нагрузке;

$\Delta P t$ – потери энергии в двигателе при заданной нагрузке за период установившегося режима;

α – коэффициент ухудшения теплоотдачи двигателя при неподвижном роторе (для самовентилируемых двигателей, для асинхронных короткозамкнутых двигателей защищённого исполнения мощностью от 1 до 100 кВт $\alpha \approx 0,4 - 0,12$);

$\sum t_0$ – общее время, в течение которого двигатель отключен от сети, с;

$\sum (t_{\Pi} + t_{\tau})$ – общее время пусков и торможений двигателя, с;

$\sum t$ – общее время установившейся работы двигателя, с.

Потери энергии за один пуск под нагрузкой определяются по следующей формуле:

$$\Delta A_{\Pi} = \Delta A_{\Pi x} \frac{J_p + J_{np}}{J_p} \cdot \frac{M_{\Pi x}}{M_{\Pi x} - M_c}, \quad (10.43)$$

где $\Delta A_{\Pi x}$ – потери энергии за один пуск холостую;

J_p – момент инерции ротора двигателя;

J_{np} – приведённый к валу двигателя момент инерции всех элементов станка, связанных с этим валом;

$M_{\Pi x} \approx 0,5(k_M + \lambda)M_H$ – среднее значение пускового момента при холостом ходе;

M_H – номинальный момент;

$k_M = \frac{M_{нач}}{M_H}$ – кратность начального пускового момента;

$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{\text{н}}}$ – кратность максимального момента;

$M_{\text{с}}$ – момент статического сопротивления.

Потери энергии за одно торможение двигателя:

$$\Delta A_{\text{т}} = \Delta A_{\text{тх}} \frac{J_{\text{р}} + J_{\text{нр}}}{J_{\text{р}}} \cdot \frac{M_{\text{тх}}}{M_{\text{тх}} + M_{\text{с}}}, \quad (10.44)$$

где $\Delta A_{\text{тх}}$ – потери энергии за одно торможение двигателя при холостом ходе;

$M_{\text{тх}} \approx 0,9 k_M M_{\text{н}}$ – среднее значение тормозного момента в случае торможения двигателя противовключением при холостом ходе;

Время пуска и торможения двигателя под нагрузкой:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{пх}} \frac{J_{\text{р}} + J_{\text{нр}}}{J_{\text{р}}} \cdot \frac{M_{\text{пх}}}{M_{\text{пх}} - M_{\text{с}}}, \quad (10.45)$$

$$t_{\text{т}} = t_{\text{тх}} \frac{J_{\text{р}} + J_{\text{нр}}}{J_{\text{р}}} \cdot \frac{M_{\text{тх}}}{M_{\text{тх}} + M_{\text{с}}}, \quad (10.46)$$

где $t_{\text{пх}}$ – время пуска электродвигателя на холостом ходу;

$t_{\text{тх}}$ – время торможения электродвигателя на холостом ходу.

Проверка предварительно выбранного двигателя по нагреву выполняется по условию (10.41).

После расчёта двигателя по нагреву следует проверить его по допустимой кратковременной перегрузке.

10.11. Особенности работы электродвигателей с перегрузкой

Если для привода станка используется асинхронный двигатель, то наибольшее кратковременное действующее значение мощности (полученное из нагрузочной диаграммы) должно быть меньше максимально допустимой мощности для данного двигателя. Как известно, кратковременная допустимая

перегрузка асинхронного двигателя лимитируется его максимальным (определяющим) моментом, который превышает номинальный момент примерно в 1,8–2,3 раза. Учитывая, что в промышленных электросетях допускается снижение напряжения на 10%, и введя коэффициент запаса 0,85, то кратковременная перегрузка асинхронного двигателя не должна превышать 1,4 – 1,5 от его номинальной мощности.

Кратковременная перегрузка по току двигателей постоянного тока (нормального исполнения) ограничивается условиями коммутации и не превышает 1,8 – 2,5 от номинального тока.

В электроприводах, работающих в режиме чередования нагрузки и холостого хода, длительность холостого хода в результате пауз в работе станка может оказаться такой, что величина потерь энергии при холостом ходе окажется больше потерь энергии при пусках и остановках двигателя. В этом случае на период пауз двигатель отключается от сети с целью улучшения энергетических показателей электропривода (уменьшения расхода электроэнергии и повышения $\cos \varphi$).

На станках, пуск и остановка шпинделя которых производятся при помощи фрикционной муфты, станочник редко выключает двигатель при замене резца, при установке, снятии или выверке обрабатываемого изделия. Для сокращения длительности холостого хода электропривода в этих случаях могут применяться автоматические ограничители холостого хода. Такие ограничители допускают работу двигателя вхолостую только в течение определённого времени, после чего двигатель автоматически отключается.

10.12. Определение мощности электропривода механизма подачи

Подача режущего инструмента на станках может быть постоянной (на токарных, расточных, и др.) и периодической (на продольно-строгальных, плоскошлифовальных). Подача производится либо от главного привода, либо от отдельного двигателя. Она может осуществляться как в процессе резания

(в токарных и расточных станках), так и во время холостого хода станка (в продольно-строгальных).

Подача от главного привода выполняется в станках, в которых необходимо сохранение постоянства подачи на один оборот изделия (в токарно-винторезных, расточных). Однако применение подачи от главного привода ограничивается усложнением механических связей. Поэтому в крупных станках привод подачи осуществляется от самостоятельного электродвигателя.

Усилие, передаваемое в направлении подачи при линейном перемещении движущегося органа станка, определяется по формуле:

$$F_{\text{под}} = k F_x + \mu N_{\Sigma} + \beta S_{\text{тр}} , \quad (10.47)$$

где F_x – составляющая усилия резания в направлении подачи, H ;

$k \approx 1,2-1,5$ – коэффициент запаса;

$S_{\text{тр}}$ – площадь прилегания взаимнотрущихся поверхностей механизма подачи, см^2 ;

$\beta \approx 0,5 \text{ Н/см}^2$ – удельное усилие прилипания;

μ – коэффициент трения, зависит от скорости перемещения и материала пары скольжения;

N_{Σ} – сумма нормальных сил, действующих на направляющие (вес G и реакция от двух других составляющих усилия резания F_y, F_z):

$$N_{\Sigma} = G + F_y + F_z .$$

Также должны учитываться усилия от собственного трения в винтовых или червячных передачах, в притёртых шпинделях и т.д.

Усилия F_x и $\mu (F_y + F_z)$ преодолеваются только при рабочей подаче.

При определении мощности привода подачи необходимо учитывать два возможных случая его работы:

- а) трогание с места, когда ещё отсутствует рабочая подача;
- б) рабочая подача.

При трогании с места учитываются усилие от веса перемещающихся деталей станка, связанных с подачей, а также сила прилипания, возникающая в процессе трогания. Коэффициент трения при трогании значительно выше, чем при рабочих скоростях подачи. Примерный характер изменения коэффициента трения в функции скорости приведён на рис.10.12.

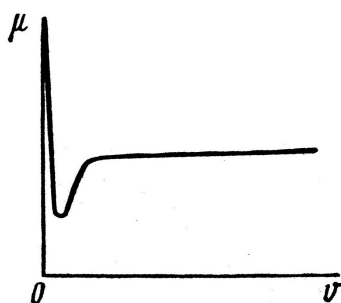
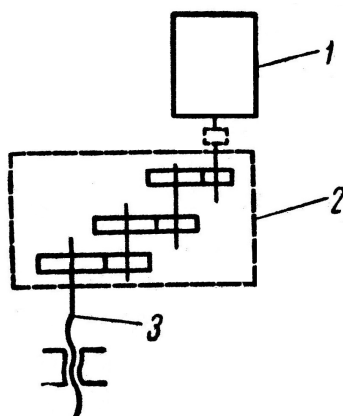


Рис.10.12. Зависимость коэффициента трения от скорости

При рабочей подаче не учитывается сила прилипания. Значение коэффициента трения в выражении (10.47) принимается соответствующим рабочим скоростям.

На рис. 10.13 показана кинематическая схема привода постоянной подачи.



1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – ходовой винт подачи

Рис. 10.13. Кинематическая схема привода подачи

Определение мощности электропривода выполняется в следующей последовательности.

Задаются следующие параметры:

- шаг нарезки ходового винта $l_{\text{ш}}$, мм;
- средний диаметр ходового винта $d_{\text{ср}}$, мм;
- коэффициент трения μ ;
- угол трения ходового винта φ .

Затем рассчитываются угол наклона резьбы, вращающий момент на валу ходового винта и момент на валу двигателя.

Угол наклона резьбы α определяется из формулы:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l_{\text{ш}}}{\pi d_{\text{ср}}}. \quad (10.48)$$

Вращающий момент на валу ходового винта:

$$M_{\text{х.в}} = \frac{F_{\text{под}} d_{\text{ср}} \operatorname{tg} (\alpha + \varphi)}{2}, \quad (10.49)$$

где $F_{\text{под}}$ – усилие подачи.

Момент на валу двигателя:

$$M_{\text{д}} = \frac{M_{\text{х.в}}}{\eta_{\text{п}} i}, \quad (10.50)$$

где $\eta_{\text{п}}$ – КПД передач от ходового винта к двигателю;

i – передаточное отношение.

Мощность двигателя подачи должна выбираться по моменту на валу двигателя $M_{\text{д}}$ с учётом предполагаемой номинальной скорости двигателя.

Если для привода подачи используется регулируемый двигатель постоянного тока (например, по системе генератор – двигатель), то необходимо произвести его проверку по следующим характеристикам:

- по статическому моменту на валу двигателя при минимальной скорости подачи с учётом необходимого снижения момента (или тока) двигателя из-за ухудшения охлаждения;

- по моменту при максимальной скорости двигателя в случае ослабления магнитного потока.

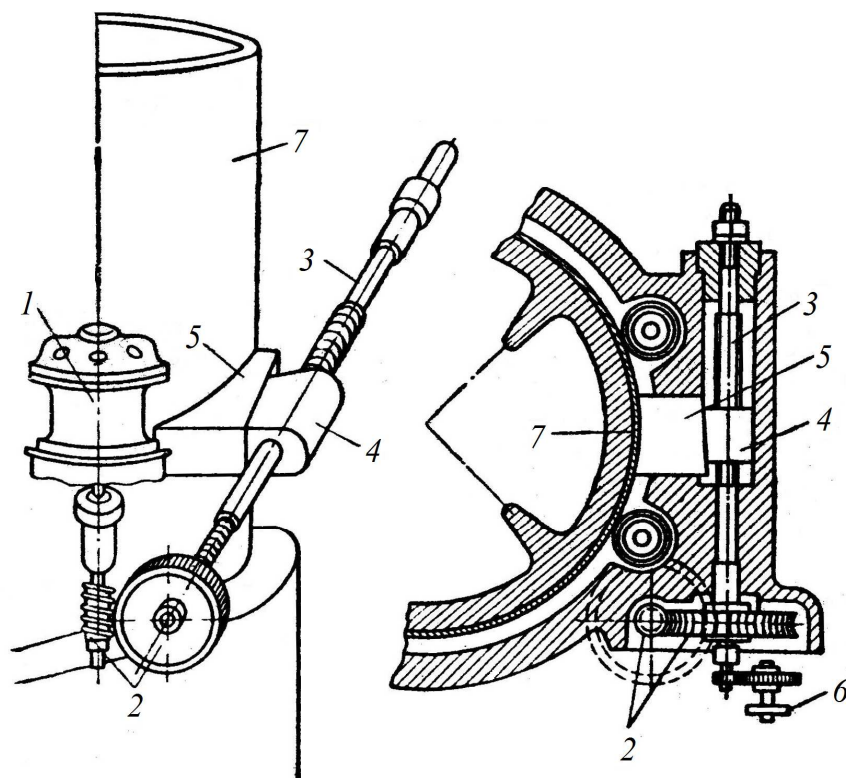
После выбора мощности электродвигателя постоянного тока по наибольшему значению, полученному из двух упомянутых случаев, необходимо его также проверить по пусковому моменту, при преодолении момента трогания.

В случае периодической подачи необходимо определять мощность электропривода не только с учётом максимального статического момента, но и с учётом его режима работы (кратковременный или повторно-кратковременный).

10.13. Определение мощности привода типовых вспомогательных механизмов станков

На станках кроме основных приводов – главного привода и привода подачи – существуют вспомогательные приводы, к которым относятся приводы быстрого перемещения отдельных элементов станка (суппортов, шпиндельных бабок, траверс и т.д.), а также приводы зажимных устройств. Для этих приводов обычно применяются асинхронные короткозамкнутые двигатели.

Привод зажимных устройств предназначен для надёжного закрепления заготовки и подвижных деталей станка для устранения их вибрации при обработке детали. На рис. 10.14 приведена схема привода зажимного устройства для колонны радиально-сверлильного станка.



1 – электродвигатель зажима; 2 – червячная пара; 3 – винт зажима; 4, 5 – клинья;
6 – кулачок конечного выключателя; 7 – колонна

Рис. 10.14. Схема привода зажима колонны
радиально-сверлильного станка

10.14. Методика расчёта мощности электропривода для зажима колонны радиально-сверлильного станка

Для надёжного закрепления колонны должно соблюдаться следующее условие:

$$N = \frac{Ql}{R\mu}, \quad (10.51)$$

где N – нормальное давление на колонну, осуществляемое зажимным устройством, H ;

Q – сила, приложенная к центру тяжести системы «траверса – суппорт», H ;

l – расстояние от оси колонны до центра тяжести, $м$;

R – внешний радиус колонны, $м$;

μ – коэффициент трения.

Момент на валу двигателя ($H \cdot m$) определяется по формуле:

$$M_{\text{д}} = N \frac{d_{\text{ср}}}{2} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{п}} i} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1 \pm 2\varphi_1), \quad (10.52)$$

где $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр ходового винта, m ;

$\eta_{\text{п}}$ – КПД червячной передачи;

i – передаточное число червячной передачи;

α – угол наклона ходовой линии винта, $град$;

α – угол наклона клина, $град$;

φ – угол трения ходового винта, $град$;

φ_1 – угол трения клина, $град$.

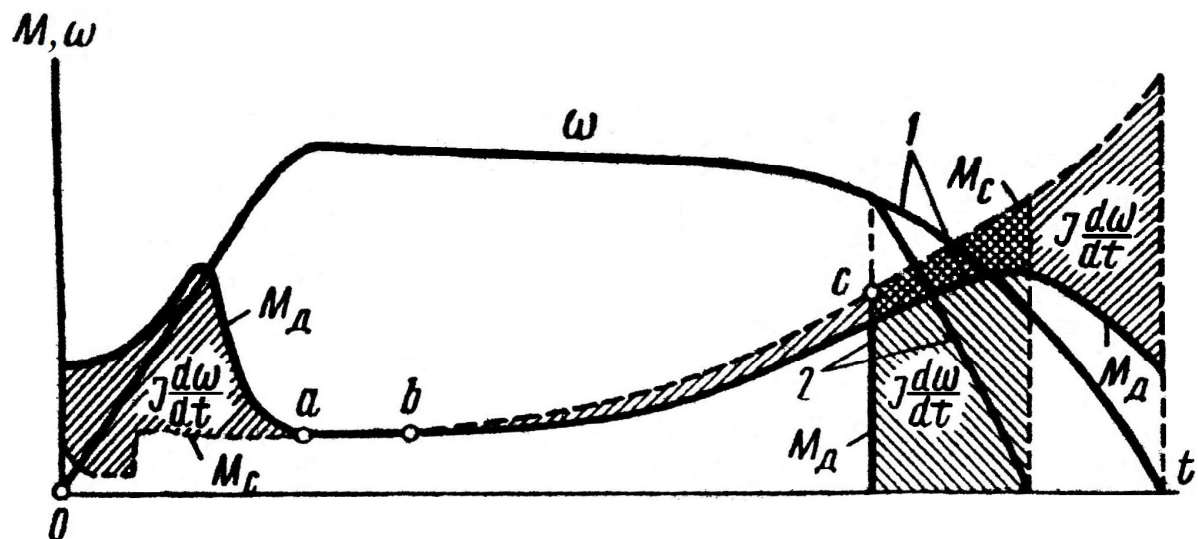
Знак «+» в формуле (10.52) относится к зажиму колонны, знак «–» – к отжатию колонны.

Во время зажима до соприкосновения поверхностей клина и колонны станка электродвигатель развивает незначительный момент, обусловленный трением в передачах механизма. С начала соприкосновения клиновых поверхностей момент сопротивления начинает увеличиваться. Предел статического момента может наступить или при переходе через максимальный момент двигателя, или раньше – при автоматическом отключении двигателя, когда приведённый момент статического сопротивления не достигнет максимального момента двигателя.

Нагрузочная диаграмма электропривода при зажатии колонны изображена на рис. 10.15.

Кривые для случая 1 показывают, что двигатель перегружается и останавливается в режиме короткого замыкания. В случае 2 двигатель автоматически отключается при моменте сопротивления, меньшем, чем максимальный момент электродвигателя, за счёт срабатывания максимального реле.

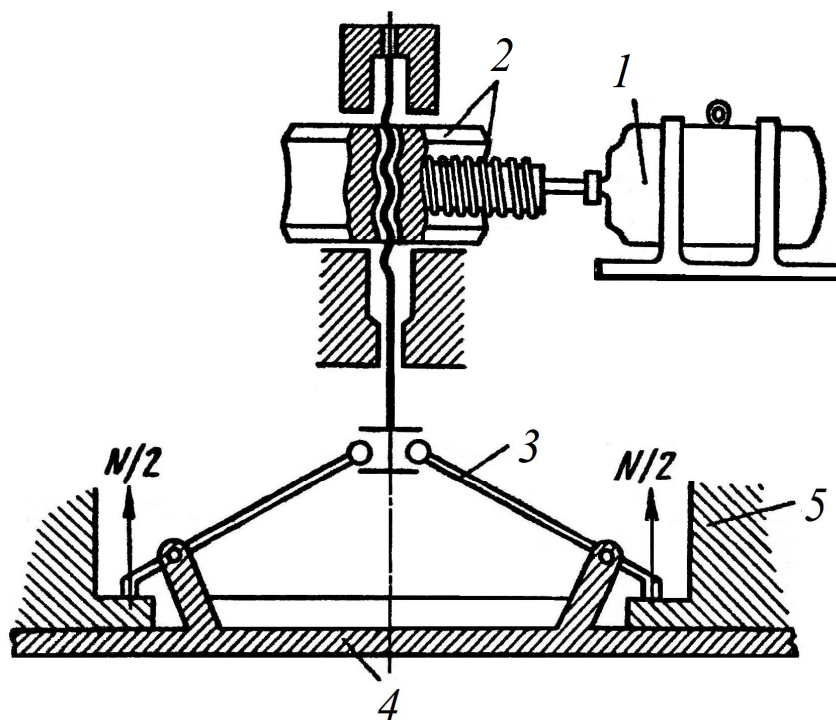
Упрощённая кинематическая схема механизма зажима траверсы (для фрезерных, карусельных, продольно-строгальных и т.д. станков) показана на рис. 10.16.



a – конец разгона двигателя; *b* – начало зажатия;

c – автоматическое отключение двигателя

Рис. 10.15. Нагрузочная диаграмма привода зажима колонны при зажатии



1 – двигатель зажима; *2* – червячная пара; *3* – рычаг; *4* – поперечина; *5* – станина

Рис. 10.16. Схема привода зажима поперечины

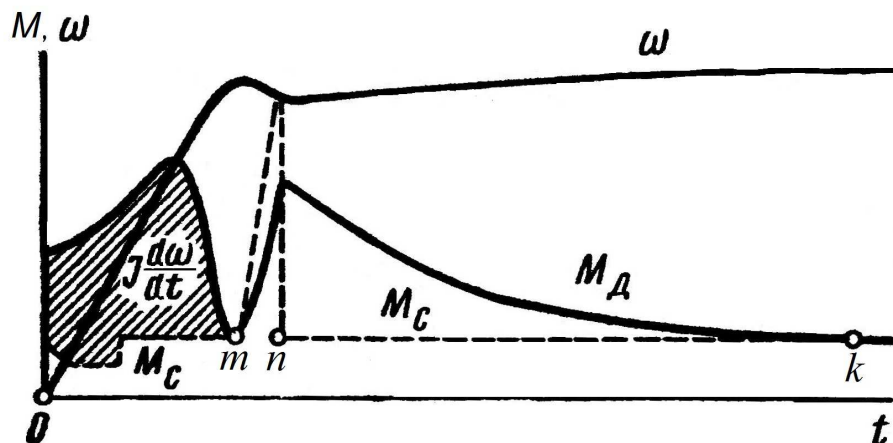
Момент на валу двигателя в данном случае вычисляется по формуле:

$$M_d = \frac{N d_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{2q\eta_{\pi} i}, \quad (10.53)$$

где q – передаточное отношение рычагов;

остальные обозначения те же, что и для выражения (10.52).

Значение начального (пускового) момента двигателя рассчитывается из условия отжатия. При этом наибольшее усилие определяется с учётом предположения, что максимальное реле при зажатии не сработает и электродвигатель остановится. Для того чтобы двигатель мог быть пущен для отжатия, в кинематической цепи зажимного устройства создаётся специальный люфт, во время выбирания которого электродвигатель успеет разогнаться до полной скорости. При отжатии с полной скоростью момент статического сопротивления покрывается моментом двигателя и динамическим моментом привода (рис. 10.17).



m – конец разгона; n – конец отжатия; k – установившийся режим (холостой ход)

Рис. 10.17. Нагрузочная диаграмма привода зажима колонны
при отжатии

Электродвигатели вспомогательных механизмов станков обычно работают в кратковременном режиме и должны обладать повышенным пусковым моментом и высокой перегрузочной способностью.

10.15. Выбор конструкции и типа двигателей для станков

Кроме нормального исполнения электродвигателей на лапах, существуют электродвигатели специальных исполнений, такие как встроенные двигатели, фланцевые двигатели (с фланцем на щите, с фланцем на станине для горизонтальной и вертикальной установки и с фланцем и лапами). Приводные электродвигатели специальных исполнений могут быть смонтированы ближе к рабочему органу.

Встроенные электродвигатели монтируются в самом станке. Станиной встроенного двигателя является соответствующая часть станка (например, шпиндельная бабка шлифовального станка), а валом двигателя является один из валов станка. В шлифовальных станках шпиндель станка и вал двигателя часто представляют собой одно целое.

Фланцевые электродвигатели используются для привода рабочих органов в станках с вертикальной осью вращения (в частности, в вертикально-сверлильных, продольно-фрезерных, плоскошлифовальных и др.). Применение фланцевого двигателя вертикального исполнения, ось которого параллельна оси вращения шпинделя станка, позволяет упростить конструкцию станка, так как в этом случае отсутствуют конические шестерни, предназначенные для изменения направления оси вращения.

Для станков также могут применяться электродвигатели с малыми радиальными размерами и относительно большой длиной, электродвигатели с наружным ротором в виде кольца, а также электродвигатели, у которых при включении ротор смещается в осевом направлении, развивая при этом значительное усилие для преодоления действия механического тормоза, действующего на вал двигателя. Кроме того, выпускаются электродвигатели с

электромагнитными тормозами, встроенными в подшипниковый щит, и электродвигатели с пристроенными редукторами, коробками скоростей и с различными механическими вариаторами для бесступенчатого регулирования скорости вращения.

В зависимости от условий работы станков выполняется защита приводных электродвигателей от вредного воздействия окружающей среды. Для привода станков применяются электродвигатели со следующими способами защиты от воздействия окружающей среды:

- защищённые;
- закрытые;
- взрывобезопасные.

Защищённые электродвигатели имеют решётки, закрывающие вентиляционные отверстия в подшипниковых щитах. Такие двигатели могут применяться, если при работе станка не образуется мелкая металлическая пыль и отсутствует возможность попадания в электродвигатель масла, эмульсии и посторонних предметов. Воздух в цехе, в котором установлен станок, не должен содержать металлической или абразивной пыли. Если при данных условиях возможно попадание на электродвигатель отвесно или под углом капель и брызг масла или эмульсии, то надо применять двигатели с защитой от брызг и капель.

Закрытые обдуваемые электродвигатели имеют вентилятор, надетый на вал снаружи подшипникового щита без отверстий. С внешней стороны вентилятор прикрыт металлическим кожухом, который направляет воздушный поток определенным образом. Воздух засасывается через отверстия в лобовой части кожуха и прогоняется вдоль наружной поверхности корпуса двигателя. Наружная сторона станины имеет рёбра, способствующие увеличению площади охлаждаемой поверхности. Надо учитывать, что при одинаковых габаритных размерах закрытый электродвигатель развивает мощность значительно меньшую, чем мощность, развиваемая двигателем защищённого

исполнения. Например, электродвигатель в защищённом исполнении развивает мощность 7 кВт, а такой же двигатель в закрытом обдуваемом исполнении имеет мощность примерно 4,5 кВт. Это объясняется тем, что поскольку охлаждение закрытого двигателя осуществляется только снаружи, то он охлаждается менее эффективно по сравнению с двигателем защищённого исполнения.

Закрытые обдуваемые электродвигатели применяются в тех случаях, когда при работе станков образуется легко взвешиваемая в воздухе металлическая пыль (абразивная, чугунная), когда возможно попадание на двигатель металлической пыли или мелкой стружки, а также когда возможно попадание в электродвигатель капель и брызг масла или охлаждающей эмульсии. При установке на станках встроенных электродвигателей их охлаждение должно осуществляться чистым воздухом, без примеси пыли.

Взрывобезопасные электродвигатели применяются на станках, а которых производится обработка легковоспламеняющихся сплавов, а также в тех случаях, когда для охлаждения инструмента используется керосин, пары которого могут образовывать взрывоопасную среду.

При выборе двигателей переменного тока для электроприводов станков, работающих с постоянной скоростью, следует ориентироваться на наибольшие значения скоростей (синхронная скорость 1500 или 3000 *об/мин*). В некоторых случаях, обусловленных конструктивными соображениями, можно выбирать двигатели меньшими значениями скоростей (синхронная скорость 1000 или 750 *об/мин*).

При выборе двигателей постоянного тока, применяемых обычно в тяжёлых станках, требующих плавного регулирования скорости, но пускаемых сравнительно редко (токарные, карусельные и др.), также необходимо ориентироваться на наибольшие значения номинальных скоростей вращения. В электроприводах с большим количеством пусков и реверсов (например, глав-

ный привод продольно-строгального станка) чаще применяются низкоскоростные двигатели.

В следящих электроприводах (копировальных станков, станков с программным управлением и т.д.) целесообразно использование специальных исполнительных малоинерционных двигателей постоянного тока с гладким якорем мощностью до 4 *кВт* защищённого исполнения с принудительной вентиляцией (с встроенным тахогенератором или без него), предназначенных для длительного и повторно-кратковременного режимов работы. Такие двигатели имеют независимое возбуждение и допускают широкое регулирование скорости вращения вниз от номинальной при моменте равном номинальному. Также они допускают регулирование скорости вращения вверх от номинальной (изменением тока возбуждения) в диапазоне от 1500 до 5000 *об/мин* при неизменной мощности на валу, равной номинальной. Двигатели с гладким якорем допускают кратковременную перегрузку по току, равную $8I_{\text{ном}}$ при номинальном магнитном потоке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.С. Основы электропривода: учебно-методическое пособие / В.С. Алексеев. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2005. – 126 с.
2. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – 2-е изд. стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
3. Гусев Н.В. Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами: учебное пособие / Н.В. Гусев, В.Г. Букреев – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 213 с.
4. Качин С.И. Электрический привод: учебно-методическое пособие / С.И. Качин, А.Ю. Чернышев, О.С. Качин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 157 с.
5. Качин С.И. Автоматизированный электропривод: учебно-методическое пособие / С.И. Качин, А.Ю. Чернышев, О.С. Качин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 162 с.
6. Мальцева О.П. Системы управления электроприводов. Электропривод постоянного тока: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 53 с.
7. Мальцева О.П. Системы управления электроприводов. Электропривод переменного тока: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 82 с.
8. Сандлер А.С. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков: учеб. пособие / учеб. пособие для втузов. М.: «Высшая школа», 1972. – 440 с.

Электронное учебное издание

Владимир Викторович **Корзин**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2019 г. Поз. № 36.

Подписано к использованию 18.09.2019. Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 7,31.

Волгоградский государственный технический университет.

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.